

Предисловие

Книга Марка Быховского «История развития теории связи» является первой в исторической литературе монографией, посвященной созданию и развитию теории связи, сыгравшей в XX столетии огромную роль в разработке новых систем телекоммуникаций, радиолокации и радионавигации. Эту работу можно рассматривать как продолжение его предыдущей книги «Круги памяти», в которой рассказывалось об истории развития систем радиосвязи и вещания в XX столетии.

Особенностью данной книги является то, что в ней значительное внимание уделяется жизни и деятельности многих как отечественных, так и зарубежных ученых, которые выдвинули пионерские идеи в области теории связи. Эти идеи лежали в основе разработок практически всех современных систем телекоммуникаций, радиолокации и радионавигации.

В первой части книги — «Пионеры информационного века» представлены биографические очерки, посвященные крупнейшим ученым современности, заложившим основы теории связи. Среди них — такие выдающиеся личности, как отечественные ученые академики В.А. Котельников, А.Н. Колмогоров и А.А. Харкевич, чл.-корреспонденты АН СССР А.Я. Хинчин и В.И. Сифоров, так и знаменитые американские ученые Н. Винер, К. Шеннон, С. Райс, Д. Миддлтон и др. Эти исторические эссе интересны тем, что в них рассказывается не только о научных достижениях крупнейших ученых, но и обсуждаются «вечные» вопросы о смысле человеческой жизни, к которым рано или поздно обращается любой мыслящий человек. Они являются гимном мощи человеческого разума и показывают, что для каждого из ученых, о которых рассказывается в книге, жизненным кредо являлось активное участие в общей созидательной деятельности в той области науки, в которой они трудились. Отдавая свой творческий дар, они не только открывали новые Истины, способствуя тем самым прогрессу Человечества, но и примером своей жизни утверждали нравственные принципы человеческого существования.

Вторая часть книги содержит краткие очерки истории развития четырех направлений современной статистической теории связи: статистической радиотехники, теории линейной фильтрации сообщений, теории потенциальной помехоустойчивости и теории информации. В главах второй части дана панорама обширных и напряженных исследований, которые велись на протяжении всего XX в. интернациональным коллективом ученых. В очерках отмечены основные научные результаты, полученные в ходе этих исследований, а также показано то влияние, которое они оказали на развитие техники электросвязи. В главы второй части книги также включены краткие биографии многих отечественных и зарубежных ученых, внесших существенный творческий вклад в развитие отдельных направлений теории связи.

То, что автор монографии большое внимание уделяет людям — создателям новых идей и теорий, является одним из ее достоинств. Каждая из глав второй части книги завершается хронологией основных достижений в затронутой в ней научной области. В хронологии указываются не только даты отмечаемых достижений, но и имена тех ученых, кто получил в этой области наиболее важные результаты.

Правильно, что при этом автор не затрагивает вопросы приоритета при решении тех или иных научных проблем. Ведь, как правило, над одной и той же проблемой почти одновременно и независимо работают несколько ученых, которым практически в одно и то же время удается прийти к ее решению, и здесь хронометраж с точностью до месяцев и даже лет неуместен. Безусловно, что имена всех этих ученых должны быть вписаны в историю человеческих достижений. Одним из примеров подобных достижений, о которых рассказывается в книге, является создание теории потенциальной помехоустойчивости, начало которой было положено знаменитой работой В.А. Котельникова. Несколько позже идеи этой теории были независимо сформулированы в весьма важных для ее дальнейшего развития работах американских и английских ученых.

Другим достоинством данной книги является широта охвата затронутой в ней темы. В ней рассказывается об очень многих результатах в области теории связи, полученных как отечественными, так и зарубежными учеными в XX столетии.

Я думаю, что новую книгу Марка Быховского с интересом прочтут многие. К ним я отношу как тех, кто считает деятельность в области телекоммуникаций своим призванием, так и тех, кого интересует не только история развития этой области знания, но и жизненный путь и нравственные установки ученых, которые, работая в разных странах, независимо вели напряженные поиски Истины. В результате этого коллективного труда в XX в. была создана новая обширная и весьма важная для развития нашей цивилизации научная область — теория связи.

*Член Президиума РАН,
президент Российского НТОРЭС им. А.С. Попова,
руководитель секции НТОРЭС
«История радиотехники и связи»,
академик РАН
Ю.В. Гуляев*

Foreword

Mark Bykhovskiy's book «Pioneers of information era. History outlines of communication theory» is the first book in Russian historical literature devoted to origins and development of communication theory. This theory played a great role in working out of new systems of telecommunications, microwave, and radio-navigation systems. This book has to be considered as a continuation of his preceding book «Circles of Memory» in which the author considered the evaluation history of radio communication and broadcasting systems in the 20th century.

Peculiarity of this book is considerable attention to life and activities of many both Russian and foreign scientists who moved out pioneer ideas in the communication theory field. These ideas laid in basis of working out of practically all modern telecommunication, radiolocation, and radio-navigation systems. The first part consists from essays about the first-rate scientists, who laid the foundation of communication theory. In the first part of the book — «Pioneers of Communication era» the author presents biographic essays about the first-rate scientists of the present, who laid the foundation of information theory. Among those outstanding persons: native scientists, Members of the Academy of Sciences V.A. Kotelnikov, A.N. Kolmogorov, and A.A. Kharkevich, Corresponding Members of the Academy A.Ya. Khinchin, and V.I. Siforov — famous American scientists N. Wiener, C. Shannon, S. Rice, D. Middleton, etc.

These historical essays are interesting not only by information about scientific achievements of the greatest scientists; they discuss «eternal» problems about sense of human life — the issues, for every intellectual person, to advert earlier or later. They represent the hymn of human intellect power and show that for every scientist in this book the active participation in common creative activity work in their scientific area.

By revealing their creative talent they not merely (did more than) opened new Truths of Science supporting progress of the Mankind — by the example of their life they strengthened moral principles of the human being.

The second part of the book contains short sketches of development history four branches of the modern communication theory: statistical radio engineering, theory of linear filtration of messages, theory of potential noise-immunity, information theory. There is also a panorama of extensive and intensive studies by the international body of scientists in the course of the 20th century. The principal scientific results of these researches as well as their influence on the development of electric communication engineering are marked. Here one finds short biographies of many native and foreign scientists who made an important creative contribution in development of single branches of the communication theory.

The author pays considerable attention to the people — creators of new ideas and theories, and it is one of the book's merits. Each chapter is concluded with chronology of the main achievements in touched upon scientific field. The chronologies contain also dates of the achievements mentioned and names of the scientists who brought in the most substantial contribution.

Correctly that the author does not touch priority issues connected with solving of scientific problems. As a rule, a number of scientists work at one time and independently on the same problem and they often find the solution practically simultaneously; in such

cases the time-keeping with exactness in months and even years is inappropriate. There is no doubt that all these scientists names shall be put down in history of human achievements. One sample of such achievements in this book is creation of the optimum noise-proof theory originated by the famous work by V.A. Kotelnikov. Some time later idea of this theory was formulated independently in very important for its development works of the American and English scientists.

Another merit of this book is the coverage breadth of the theme touched in it. The book tells about many results in the field of communication theory received (achieved, obtained) both native and foreign scientists in the 20th century.

I think that many people will read the Mark Bykhovskiy's new book with interest. Among those I consider both people who regard activities in the telecommunication field as their vocation and those who are interested to know not only evolution history of this knowledge field but also the life path and moral rules of the scientist working in different countries carried out independently intensive search of the Truths. As a result of this collective work a new extensive and highly important for development of our civilization area of science – the communication theory, was created.

*Member of the Russian Academy of Science Presidium
President of the Russian NTORES named after A.S. Popov,
Head of the NTORES section
«History of radio engineering and communication»,
Member of the RAS
Yu.V. Gulyaev*

*Книга посвящается светлой памяти выдающихся ученых,
основателей статистической теории связи –
академика В.А. Котельникова и К. Шеннона*

От автора

Данная книга является, по-видимому, первой, посвященной истории создания и развития теории связи, идеи которой в XX в. направляли, и будут в XXI в. направлять мировое развитие телекоммуникаций. Хотя этот пласт знаний человечества начал формироваться всего около 100 лет тому назад, тем не менее ученые и инженеры за столь короткий срок оказали колоссальное влияние на развитие нашей цивилизации. Это привело к взрывному развитию телекоммуникаций в конце XX в. и заложило основы создания информационного общества.

Создаваемые учеными теории и выдвигаемые ими идеи формируют ноосферу — необъятную сферу человеческого духа. Вспомним Коперника, Ньютона, Фарадея, Эйнштейна, Бора (список можно существенно расширить). Упомянутым людям человечество обязано не только созданием теорий, лежащих в основе большинства технических дисциплин, изучая которые люди учились созидать новую технику, но и тем, что с их именами ассоциируются повороты в сознании и приближении миллионов людей к истине. Выше названы выдающиеся люди только в области физики. Но сфера деятельности людей обширна, и в каждой из областей человеческой деятельности много выдающихся личностей, совершивших интеллектуальный переворот в своей области. Великий мыслитель древности Аристотель приравнивал таких людей к смертным богам.

Познание истины происходит таинственным, загадочным образом. Это познание приходит через конкретные личности — через ученых, наделенных творческим, созидательным даром. Отделившись от них, истина получает самостоятельную жизнь, оказывая влияние на ход реальной жизни. Однако это влияние преобразует не только реальную жизнь, но и ноосферу — сферу духа, которая формирует духовный и интеллектуальный облик человека.

Ученый — тот же священнослужитель, обязанностью которого перед людьми является поиск истины. В этом ему способствует внутренний голос его души — данный ему свыше дар интуиции, помогающий увидеть и понять то, что скрыто от его современников. Разумеется, в этих поисках он опирается на те идеи, на тот духовный багаж, которые накоплены человечеством.

В этой книге хочется рассказать не только о генезисе и развитии новых фундаментальных идей в области теории связи, но и о тех людях, которые выдвинули эти идеи и многое сделали для их широкого распространения. Ведь нельзя не согласиться с мыслью английского философа XIX в. Томаса Карлеля: *«История мира — это в первую очередь биографии великих людей»*.

Данная книга разделена на две части. Часть I «Пионеры информационного века» содержит 22 исторических эссе, отражающих жизненный путь выдающихся ученых и инженеров, идеи которых в XX в. оказали определяющее влияние на развитие телекоммуникаций и породили мощный поток идей у их многочисленных последователей. Эти идеи получили материальное воплощение в вызывающем изумление прогрессе техники связи, произошедшем за последние годы.

Однако слава *первопроходцев* обусловлена не только сказанным. Они обессмертили свое имя также и тем, что, открыв новые направления, создали научные школы и вызвали духовный подъем как у своих учеников, так и у других специалистов в области телекоммуникаций, который вовлек их в созидательную деятельность. В результате этого в развитии новых научных направлений приняли участие тысячи ученых многих стран мира. Жизненный путь *первопроходцев* ярко демонстрирует то положение, что человек по своей природе должен быть пособником Творца.

История создания и развития теории связи, как и жизнь и деятельность ее творцов, показывает, что в нашем раздираемом противоречиями мире постоянно идет созидательная научная работа, которую выполняют большие коллективы людей, живущих на разных континентах, в странах с разным политическим строем, разной религией и культурой, говорящих на разных языках и не объединенных формально в одну организацию. Сама возможность согласованного выполнения столь огромной созидательной работы на глобальном пространстве нашей планеты кажется поразительной. Однако это подтверждает глубокую истину Библии, утверждающую единство всех живущих на Земле людей, единство их помыслов, их устремлений к добру и совершенству. Это также убедительно свидетельствует, что в нашем мире непреложно действует установленный Всевышним закон, который предопределяет созидательную сущность человека, стремящегося не к разрушению, а к совершенствованию себя и совершенствованию этого мира.

В части II «Очерки истории создания и развития статистической теории связи» представлены отдельные направления: статистическая радиотехника, теория оптимальной линейной фильтрации сигналов, теория потенциальной помехоустойчивости и теория информации. В очерках отражены основные результаты этих направлений, полученные учеными в XX в. В них также представлены биографии ученых, внесших существенный творческий вклад в развитие отдельных направлений теории связи. Каждая из глав второй части содержит хронологию важнейших достижений в области теории связи за последние 100 лет.

Имена ученых, которым посвящены эссе в первой части книги, в тексте отмечены прямым жирным шрифтом, а тех, краткие научные биографии которых приведены во второй ее части, — жирным курсивом.

Следует отметить, что возможности развития телекоммуникаций, которые были установлены учеными и о которых рассказывается в этой книге, не были бы реализованы, если бы параллельно с развитием теории связи не происходил быстрый процесс совершенствования технологии производства телекоммуникационного оборудования.

Эта книга адресована не только специалистам в области телекоммуникаций, но и всем читателям, которых интересуют общие закономерности развития научных направлений и жизненный путь *первопроходцев* информационной эпохи, проложивших человечеству путь в будущее.

Марк Аронович Быховский, д.т.н., профессор, академик Международной академии связи и Международной академии информатизации, лауреат Премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники. Специалист в области теории информации и помехоустойчивости систем связи, методов и автоматизированных комплексов анализа электромагнитной совместимости (ЭМС) радиосистем, частотного планирования систем подвижной радиосвязи и радиовещания, проблем управления использованием радиочастотного спектра (РЧС). Автор 200 научных работ и 45 изобретений.

Работает заместителем директора Центра анализа электромагнитной совместимости в Научно-исследовательском институте радио (www.caemc.ru) и является заведующим кафедрой систем радиосвязи в Московском техническом университете связи и информатики. Руководил многими комплексными НИР, в том числе выполненными в 1993–1996 гг. специалистами разных ведомств в рамках Программы конверсии РЧС, одобренной Правительством России. Результаты проведенных работ позволили выделить в стране РЧС для развития в ней систем подвижной связи и вещания и других новых радиотехнологий.

В последние годы М.А. Быховский опубликовал ряд статей по истории радиосвязи, привлекающих внимание специалистов. В 2001 г. вышла его книга «Круги памяти. Очерки истории развития радиосвязи и вещания в XX столетии», которая была с интересом принята научной общественностью.

В 2005 г. под его редакцией увидела свет книга «Творцы российской радиотехники. Жизнь и вклад в мировую науку».

Эта новая монография посвящена истории создания и развития теории связи, идеи которой в XX в. направляли и будут направлять в XXI в. развитие в мире телекоммуникаций. Она состоит из двух частей. Первая — «Пионеры информационного века», содержит 22 исторических эссе, отражающих жизнь и деятельность выдающихся ученых и инженеров, идеи которых оказали определяющее влияние на развитие мировой системы телекоммуникаций. Вторая часть посвящена истории создания и развития основных направлений теории связи. В нее также включены ряд кратких биографий ученых, внесших существенный творческий вклад в развитие теории связи.

Книга адресована не только специалистам в области телекоммуникаций, но и тем читателям, кого интересуют закономерности развития научных направлений и жизненный путь выдающихся ученых современности — ПИОНЕРОВ информационной эпохи, которые прокладывали Человечеству путь в будущее.

Данная книга является четвертой в серии книг по истории телекоммуникаций, которая издается по решению Президиума и Исторической комиссии Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова.

Отзывы о книге просьба отправлять по адресу:

105064, г. Москва, ул. Казакова, 16,

Быховскому М.А.,

e-mail: markbykh@hotmail.com; markbykh@yahoo.com.

Часть I

Пионеры

информационного века

Содержание науки можно постигать и анализировать, не вдаваясь в рассмотрение индивидуального развития ее создателей. Но при таком одностороннем – объективном изложении отдельные шаги могут казаться отдельными случайными удачами. Понимание того, как стали возможными и даже необходимыми эти шаги, достигается лишь в том случае, если проследить за умственным развитием отдельных людей, содействующих выявлению направления этих шагов.

Альберт Эйнштейн

ДМИТРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ АГЕЕВ

*Учить других — потребен гений,
Потребна сильная душа.*

Николай Некрасов



Введение

Зарождение теории связи относится к концу 20-х — середине 40-х гг. XX в., когда формировались основные понятия этой теории и устанавливались ее важнейшие закономерности. В данном процессе принимали участие ученые разных стран. К основоположникам теории связи следует отнести выдающегося отечественного ученого и педагога Дмитрия Васильевича Агеева — доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РСФСР. Основной областью его деятельности было преподавание курсов радиотехники.

Однако, обладая огромным творческим потенциалом и чувствуя перспективные тенденции в развитии радиотехники, он выдвинул ряд важнейших идей, которые вошли в золотой фонд теории связи и радиотехники. К его заслугам следует также отнести и то, что он, будучи профессором Горьковского политехнического института (ГПИ), создал одну из крупнейших в нашей стране научных школ, где выполнен ряд оригинальных научных работ в области радиотехники. Под руководством Д.В. Агеева было подготовлено 55 кандидатских диссертаций, 11 его учеников стали докторами наук, а многие — известными специалистами.

В нашей стране Д.В. Агеев пользовался большим авторитетом среди ученых и инженеров. За научные достижения и работу по подготовке кадров он был награжден орденом Трудового Красного Знамени и медалью «За доблестный труд», ему было присвоено звание «Почетный радист СССР».

Биографический очерк

Дмитрий Васильевич Агеев родился 21 февраля 1911 г. в Санкт-Петербурге в семье рабочего. Увлечение радио появилось у него еще в школьные годы, поэтому по окончании школы он сделал попытку поступить в Ленинградский электротехнический институт (ЛЭТИ). Однако она оказалась неудачной, но решение посвятить себя радиотехнике было твердым. Для подготовки в институт он поступил на государ-

ственные курсы, где учился в течение года. Его успехи были столь значительны, что ему рекомендовали учебу на математическом факультете Ленинградского университета. Но его влекла радиотехника, и в 1930 г. он становится студентом радиотехнического факультета Ленинградского электротехнического института связи (ЛЭИС) им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

Закончив ЛЭИС в 1935 г., он остается в аспирантуре. В этом же году публикует две фундаментальные теоретические работы: «О переходных процессах в резонансном усилителе» (совместно с академиком Ю.Б. Кобзаревым) и «Основы теории линейной селекции».

В первой работе впервые к исследованию переходных процессов в многокаскадных приемно-усилительных устройствах был применен метод медленно меняющихся амплитуд, разработанный в 20-х гг. прошлого столетия известным голландским ученым В. Ван дер Полем. Эта работа положила начало в нашей стране важным исследованиям переходных процессов в резонансных линейных цепях. Исследования продолжил академик А.Н. Щукин и известные отечественные профессора И.С. Гоноровский и С.И. Евтянов.

Вторая работа имела принципиальное значение для теории связи. В ней показано, что при использовании линейных методов возможно разделение сигналов трех видов: частотное, временное и компенсационное (по форме).

Кандидатскую диссертацию Д.В. Агеев защитил в 1939 г. Она называлась «Теория селекции и проблема пропускной способности эфира» и была выполнена под руководством М.А. Бонч-Бруевича — крупнейшего отечественного ученого, одного из основателей знаменитой нижегородской радиолaborатории, выполнившего важные исследования в области радиотехники и распространения радиоволн. Диссертация Д.В. Агеева содержала несколько новых идей. Поэтому при ее защите ученый совет признал, что работа является выдающейся и отвечает всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям. Ему было рекомендовано защищать эту работу как докторскую. Но Д.В. Агеев не считал возможным дважды защищать одну и ту же диссертацию и, выполнив новые научные исследования, в 1940 г. представил к защите на степень доктора наук диссертацию «Новый метод многоканального телеграфирования». В ней был исследован новый — групповой метод передачи элементарных сигналов, применение которого позволяло ослабить действие импульсных помех в десятки и сотни раз.

Великая Отечественная война помешала своевременной публикации исследований, вошедших в докторскую диссертацию, и длительное время они оставались известными лишь узкому кругу специалистов. Диссертация была затеряна в недрах Высшей аттестационной комиссии. Ее нашли только в 1948 г., и Президиум Академии наук СССР присвоил Д.В. Агееву степень доктора технических наук.

Зиму 1941 / 42 гг. Д.В. Агеев вместе со своей семьей провел в блокадном Ленинграде. Пережив блокаду, весной 1942 г. ученый вместе с ЛЭИС, в котором он работал, был эвакуирован в Кисловодск, а затем переехал в Тбилиси, где преподавал высшую математику, теоретическую радиотехнику, заведовал кафедрой высшей математики.

Летом 1945 г. ЛЭИС возвратился в Ленинград. Здоровье маленькой дочери Д.В. Агеева было подорвано голодной зимой в блокадном Ленинграде, он попросил о направлении в город с хорошим климатом. Его просьба была удовлетворена, и он

получил назначение в Одесский электротехнический институт связи (ОЭИС). Позже в 1946–1949 гг. Д.В. Агеев работал в ОЭИС, где заведовал кафедрой радиоприемных устройств и читал лекции по теоретической радиотехнике, радиоприемным и усилительным устройствам.

Интересен один из эпизодов биографии Д.В. Агеева, который характеризует его как принципиального и мужественного человека с чувством собственного достоинства.

Тоталитарное государство серьезно деформирует сознание своих граждан, воспитывая в них конформизм и инстинкт безоговорочной поддержки всего, что исходит от вышестоящих руководителей. Любое мнение начальства воспринимается как директива, а проявление инициативы, как правило, безжалостно подавляется. Личность становится «человеком толпы», лишается индивидуальности и самостоятельности и поступает так, как поступают все. В таком обществе лишь немногие решаются на публичное выражение своего отношения к тем или иным событиям общественной жизни, в том числе и в науке. Поведение людей-конформистов и печальные последствия, к которым оно приводит, гениально показаны в сказке Андерсена «Тень». В ней изображен ученый, который пишет об истине, о добре и красоте, но никто не хочет о них слышать. Его тень, усвоив его фразеологию, но не его идеи, отделяется от него и начинает самостоятельную жизнь. В светском обществе она приобретает популярность. В отчаянии ученый, не добившись признания своих идей, соглашается прислуживать своей собственной тени. Тень начинает слыть умнейшим человеком, хотя никаких оригинальных идей не имеет и все, что она излагает, это не ее собственные взгляды, а те, которые подсказывает ученый. В итоге люди начинают принимать тень ученого за самостоятельную личность. Она поднимается на самую вершину общественной пирамиды и начинает выдавать ученого за свою тень. Сам же ученый оказывается в бедственном положении и погибает.

В случае с Д.В. Агеевым дело обстояло следующим образом. Директор Одесского электротехнического института связи, не имея ни одной научной публикации, решил получить ученое звание и защитить диссертацию. В то время в институте Агеев был единственным доктором наук, и ему было предложено выступить с оценкой представленной к защите работы. Внимательно рассмотрев диссертацию директора, Агеев не нашел в ней новых научных результатов и честно написал отрицательный отзыв, не дав тем самым посредственности — «тени» приобрести регалии ученого. В результате со стороны директора началась травля ученого. Он вынужден был искать работу в других городах. Д.В. Агеев был хорошо известен как крупный специалист в области радиотехники, а потому получил приглашения из нескольких вузов. Он выбрал Горьковский индустриальный институт (в настоящее время Горьковский политехнический институт — ГПИ), в котором проработал всю жизнь.

С переходом в ГПИ начинается новый, исключительно плодотворный период в жизни Д.В. Агеева. В 1949 г. его избирают заведующим кафедрой радиотехники, а позже — заведующим кафедрой радиоприемных устройств. Эта кафедра была в составе электротехнического факультета, который появился в результате переименования в 1947 г. радиотехнического факультета.

Понимая важность для страны подготовки специалистов в области радиотехники, Д.В. Агеев предложил восстановить в ГПИ радиотехнический факультет, что и было осуществлено в 1952 г. В этом же году на факультете им были организованы две

новые кафедры: «Радиоприемные устройства», которую возглавил Д.В. Агеев, и «Радиопередающие устройства». В 1955–1959 гг. он был деканом радиотехнического факультета, сыгравшего значительную роль в подготовке отечественных специалистов в области радиотехники.

В ГПИ Д.В. Агеев не только руководил научными исследованиями своих сотрудников, но сам плодотворно разрабатывал многие актуальные проблемы современной радиотехники и стал автором ряда крупных изобретений. Новый тип детектора сигналов фазовой телеграфии, импульсный метод усиления низкочастотных колебаний, метод нелинейной селекции, ряд способов подавления импульсных помех, метод повышения селективности радиотехнических устройств, система связи с многозначной модуляционной характеристикой — таков неполный перечень его работ. Им же выдвинуты новые понятия теории спектров, разработана теория радиоприема ЧМ со следящей настройкой. В 1951 г. Агеев предложил ключевой метод усиления электрических колебаний, а в 1957 г. доказал важную для теории связи теорему о функции времени с ограниченным спектром.

В 1958 г. вышла написанная совместно с Я.Г. Родионовым монография «ЧМ-радиоприем со следящей настройкой», в которой изложена разработанная Агеевым теория, выявившая потенциальные возможности помехоустойчивости. Впоследствии (1973 г.) им были определены предельные возможности разделения сигналов с помощью фильтров с переменными параметрами.

Научные работы Д.В. Агеева

Теория уплотнения каналов связи. Сфера научной деятельности Д.В. Агеева необычайно широка. Он внес фундаментальный научный вклад в ряд направлений теории связи.

Наиболее значительна его работа «Основы теории линейной селекции», которая вошла в его кандидатскую диссертацию, опубликованную в 1935 г. в 10-м номере Научно-технического сборника связи ЛИИС (до Великой Отечественной войны ЛЭИС назывался Ленинградским институтом инженеров связи). Эта статья получила широкую известность среди отечественных специалистов. В ней впервые были определены принципы и предельные возможности разделения сигналов линейными системами в частотной и временной области, а также по форме и было доказано, что необходимым и достаточным условием разделимости сигналов линейными методами является их линейная независимость.

В 1970 г. профессор Л.М. Финк в своей книге «Теория передачи дискретных сообщений» отмечал: «К сожалению, теория уплотнения канала еще мало разработана и наши знания в этой области недалеко ушли от того, что было заложено в 1935 г. в работе Д.В. Агеева».

В диссертации Агеева впервые дана геометрическая трактовка процессов передачи и приема сигналов при наличии помех, широко применяемая ныне в теории информации и помехоустойчивости. В основу теории положена физически реализуемая модель сигналов конечной длительности. Впервые было использовано представление сигналов и помех в многомерном функциональном пространстве. Позже таким пред-

ставлением оперировал В.А. Котельников в своей знаменитой «Теории потенциальной помехоустойчивости». Над теорией помехоустойчивости Д.В. Агеев продолжал работать всю жизнь.

Одним из первых Д.В. Агеев понял важность проблемы эффективного использования радиочастотного спектра (РЧС), поскольку происходит быстрый рост числа радиостанций, работающих в эфире. Решить эту проблему можно, в частности, применяя такие методы передачи, которые позволяли бы в ограниченной полосе частот передавать сигналы большего числа радиостанций. Идеи группового способа передачи сигналов для борьбы с кратковременными нарушениями связи (например, из-за действия мощных импульсных помех), которые были предложены Агеевым в 1938 г. и вошли в его докторскую диссертацию, вели непосредственно к созданию систем широкополосной передачи сигналов (ШПС), в которых для передачи сообщений использовалась не гармоническая, а широкополосная несущая. В статье Д.В. Агеева и его ученика Ю.Н. Бабанова «Передача сигналов с перекрывающимися частотными спектрами» (Радиотехника. 1964. № 10) была описана система, в которой широкополосная несущая формировалась путем модуляции по линейному (или любому другому периодическому) закону частоты задающего генератора. Полезный сигнал модулировал широкополосную несущую таким образом, чтобы его активный спектр в любой момент времени занимал небольшой участок частот и перемещался по определенному закону в пределах частотного диапазона, который был бы значительно больше ширины активного спектра полезного сигнала.

Выражаясь современным языком, в упомянутой работе предлагалось применять для передачи информации широкополосные сигналы с большой базой. Широкополосные системы в настоящее время находят самое широкое применение в системах связи разного назначения (как стационарных, так и подвижных).

К сожалению, в 60-х гг. эта статья уже не носила новаторского характера, так как широкополосные системы связи разрабатывались в США, начиная с середины 40-х гг. Следует отметить, что аналогичный предложенному в статье Д.В. Агеева и Ю.Н. Бабанова метод широкополосной передачи, связанный с изменением частоты несущего колебания за время передачи информационного символа, который долгое время оставался секретным, был изобретен еще в 1940 г. известной американской актрисой Хэди Ламар и ее мужем — композитором Георгом Атсейлом. В отечественной литературе такие широкополосные сигналы называют сигналами с частотно-временной матрицей.

В ГПИ была создана теория разделения сигналов линейными фильтрами с переменными параметрами, определены их предельные возможности, предложена теория построения нелинейных фильтров. Работы в области помехоустойчивости систем связи и эффективных методов селекции сигналов в дальнейшем продолжили ученики профессора Д.В. Агеева доктора технических наук Ю.Н. Бабанов, А.А. Горбачев и др.

Методы подавления импульсных помех. Другим важным направлением, которое интенсивно теоретически и экспериментально исследовалось в ГПИ под руководством Д.В. Агеева, была разработка методов подавления импульсных помех (ИП). Эта проблема весьма актуальна в системах радиосвязи, работающих в диапазоне коротких и ультракоротких волн, в которых действие атмосферных и промышленных помех, носящих импульсный характер, ограничивает чувствительность приемных устройств.

Д.В. Агеевым был предложен оригинальный метод подавления импульсных помех, названный методом преобразования спектра сигнала и его ограничения. Суть состояла в том, что полезный (низкочастотный) сигнал с наложенной на него мощной импульсной помехой, занимающей широкий спектр, пропускался через линейную дифференцирующую цепь, ослаблявшую частотные составляющие полезного сигнала и слабоискажающую ИП. На выходе линейной цепи устанавливался ограничитель с линейным участком, простирающимся до максимально возможных значений полезного сигнала. Этот ограничитель практически не воздействовал на полезный сигнал, а уровень ИП в нем существенно ограничивался. За ограничителем следовала интегрирующая цепь, в которой полезный сигнал восстанавливался, а ИП еще более подавлялась.

Многочисленные методы и оригинальные устройства для борьбы с импульсными помехами разрабатывали и исследовали ученики Д.В. Агеева: А.А. Горбачев, А.М. Шабалин, Б.И. Кузьмин, А.И. Гречихин и др.

Спектральный анализ. Д.В. Агеевым в 1955 г. были научно обоснованы главные понятия спектрального анализа. Введено новое понятие — активная полоса частотного спектра функции времени, и дан способ ее вычисления. Д.В. Агеев исходил из того, что в каждый данный момент времени основной вклад в формирование функции вносит не весь ее спектр, а лишь некоторая активная его часть. Относящаяся к этому часть теории Д.В. Агеева включена в широко известную монографию «Спектры и анализ» академика А.А. Харкевича.

Новое понятие оказалось удобным для анализа систем, обрабатывающих сигналы, мгновенная частота которых изменяется достаточно медленно. Работы Д.В. Агеева в этом направлении были связаны с работами других ученых — академика А.А. Харкевича, американских ученых Р. Фано и К. Пэйджа, которые ввели понятие «мгновенный спектр», определяемый как спектр конечного отрезка процесса, непосредственно предшествующий данному моменту времени.

В 1957 г. Д.В. Агеев доказал одну замечательную теорему, к которой можно с полным основанием отнести слова Стефана Цвейга: «...прекрасна истина, кажущаяся неправдоподобной». Теорема Агеева имела следующую формулировку:

«Пусть на интервале (t_1, t_2) заданы любая непрерывная функция $U(t)$ и произвольная частота F . Тогда можно построить функцию, спектр которой не содержит частот выше F , сколь угодно близкую (в среднеквадратичном смысле) к $U(t)$ на интервале (t_1, t_2) ».

Например, на интервале времени длительностью 1 с можно задать функцию, меняющую свой знак миллион раз и продолжить ее вне этого отрезка времени так, чтобы ширина спектра продолженной функции не превышала величины 0,1 Гц. В прекрасной исторической книге выдающегося отечественного ученого Л.М. Финка «Сигналы, помехи, ошибки...» (Связь. 1978) есть подробное обсуждение этой на первый взгляд парадоксальной теоремы. По воспоминаниям профессора Л.М. Финка, которые он приводит в своей книге, когда в 1957 г. Д.В. Агеев доложил на Всесоюзной научной сессии Научно-технического общества им. А.С. Попова эту теорему, большая часть слушателей не поверила в ее справедливость и стала искать погрешности в представленном доказательстве. Теорема Агеева существенно расширила представления инженеров о закономерностях формирования спектра сигналов и нашла практическое применение при создании цифровых звуковых систем.

Теория следящего приема сигналов с ЧМ. В 1939 г. американским инженером Дж. Г. Чаффи был изобретен демодулятор частотно-модулированных (ЧМ) сигналов с обратной связью по частоте (демодулятор ОСЧ). Как известно, частотная модуляция обладает порогом. Это означает, что для демодулятора ЧМ-сигнала можно указать пороговый уровень полезного сигнала: если принимаемый сигнал имеет более низкий (по сравнению с пороговым) уровень, то прием становится практически невозможным из-за резкого снижения качества приема сигналов. Эксперименты показали, что демодулятор ОСЧ имеет по сравнению с обычным ЧМ-демодулятором пониженный пороговый уровень, т.е. он более помехоустойчив. До исследований, предпринятых в ГПИ Д.В. Агеевым и его учеником Я.Г. Родионовым, теоретических работ, посвященных анализу многих сложных вопросов, касающихся демодулятора ОСЧ, включая вопросы его устойчивости и проектирования, не было. Эти ученые впервые разработали теорию следящего приема ЧМ-сигналов, которая была опубликована в «Трудах ГПИ», а в 1958 г. — в монографии «ЧМ-радиоприем со следящей настройкой». Следящие демодуляторы ЧМ-сигналов стали широко внедряться только в середине 60-х гг. в спутниковых и тропосферных системах связи, для которых весьма актуальной проблемой являлось снижение энергетического потенциала линий связи.

На результатах, представленных в монографии Д.В. Агеева и Я.Г. Родионова, базировались более поздние исследования крупных отечественных специалистов Л.Я. Кантора, А.С. Веницкого, Ю.А. Афанасьева и др., посвященные следящему приему ЧМ-сигналов.

Другие области исследований. Помимо значительного вклада в теорию связи Д.В. Агеев и его ученики получили ряд важных результатов в области радиотехники и внесли вклад в теорию резонанса в пассивных и активных линейных системах с постоянными параметрами на основе спектральной теории резонанса. Эти результаты были изложены в книге Д.В. Агеева и С.С. Зельманова «Основы теории резонанса в линейных системах». Совместно со своим учеником А.В. Зеньковичем Агеев ввел новое понятие — «динамический резонанс» (т.е. резонанс в колебательном контуре с нелинейным активным сопротивлением и зависящей от амплитуды колебаний в нем частотой) и исследовал явление резонанса в линейных системах с переменными параметрами. Д.В. Агеевым и А.В. Зеньковичем разработаны методы оценки искажений, которые возникают при прохождении ЧМ-сигналов через различные связные тракты.

Начиная с 1951 г. Д.В. Агеевым и его учениками В.В. Малановым, К.П. Половым и др. в ГПИ разрабатывалась общая теория усиления радиосигналов, на основе которой было предложено большое число методов повышения энергетической эффективности усилительных устройств. Они развивали новый метод повышения коэффициента полезного действия (КПД) усилителя, основанный на использовании широтно-импульсной модуляции (ШИМ), который был предложен в 1932 г. советскими радиоспециалистами академиком А.Л. Минцем и профессором С.В. Персоном. В соответствии с этим методом подлежащий усилению звуковой сигнал преобразуется в модуляторе в последовательность импульсов постоянной амплитуды с двусторонней ШИМ. Частота импульсной последовательности существенно превосходила частоту В.А. Котельникова, равную $2F_{\text{в}}$, где $F_{\text{в}}$ — верхняя частота спектра усиливаемого сигнала. Импульсы небольшой мощности с ШИМ осуществляют включение тока,

протекающего через мощные усилительные лампы. На нагрузке усилителя выделяется усиленный звуковой сигнал. Поскольку в спектре двусторонней ШИМ спектральные составляющие звуковой частоты имеют значительную интенсивность, КПД усилителя, работающего на данном принципе, оказывается близким к 100%. В традиционных усилителях КПД составляет всего около 20%.

Заключение

Д.В. Агеев прожил большую и плодотворную жизнь, наполненную напряженным созидательным трудом. Им и его многочисленными учениками были выполнены первоклассные работы во многих областях радиотехники. Полученные им результаты носили фундаментальный характер и оказали влияние на исследования, которые проводились позднее другими отечественными исследователями. Они вошли в книги, по которым учились тысячи специалистов.

Однако должного влияния на развитие мировой науки его результаты, к сожалению, не оказали. Одна из причин состоит в том, что часто его работы публиковались несвоевременно, в малодоступных изданиях и становились известными ограниченному числу людей. В ведущих зарубежных журналах работы отечественных ученых публиковались очень редко.

Даже пионерские и весьма важные результаты, полученные Д.В. Агеевым и включенные в его кандидатскую диссертацию, опубликованные в сборнике трудов ЛИИС в 1935 г. в виде краткой статьи, остались неизвестными на Западе. Частично аналогичные выводы были получены через 18 лет американскими учеными Заде и Миллером (Zade L.A., Miller K.S. *Fundamental Aspects of Linear Multiplexing*. Proc. IRE. 1952. № 9).

Другой причиной недостаточного влияния отечественной науки на мировую оказалось то, что она многие десятилетия находилась фактически в изоляции. Отечественные ученые, как правило, не имели возможности участвовать в международных научных конференциях, свободно общаться даже между собой, обмениваться своими идеями с зарубежными коллегами, публиковать результаты в зарубежных научных журналах, пользующихся мировой известностью. Жесткие правила, установленные Государственным комитетом по делам печати, ограничивали возможности наших ученых публиковать свои научные результаты даже в немногочисленных отечественных радиотехнических журналах. Город Горький (ныне Нижний Новгород), в котором жил и работал Д.В. Агеев, был закрытым городом, так как там были расположены предприятия оборонной промышленности, и его жители были ограничены в возможностях контактов с иностранцами. Именно по этой причине г. Горький был выбран для ссылки выдающегося гражданина России академика Андрея Дмитриевича Сахарова. По-видимому, такие ограничения распространялись и на профессора Д.В. Агеева и его учеников.

Изоляция ученых всегда отрицательно влияет на их возможности вести научные исследования. Оковы секретности оказывают самое пагубное влияние и на умственные способности ученых, и на их сравнительное мышление. Необоснованное засекречивание определенных видов научной деятельности нередко ведет к процветанию в

науке посредственностей, которые, пользуясь атмосферой секретности, повторяют результаты, достигнутые в прошлом другими учеными, убеждая руководство, что ведущиеся секретные научные исследования находятся на мировом уровне.

Кроме того, закрытость общества препятствует включению национальных научных достижений в мировую науку. Достижения крупных отечественных ученых не становятся достоянием мировой науки, да и сами ученые не получают должного признания мирового научного сообщества. Политика государства, приводящая к закрытости общества, безусловно, снижает общий культурный уровень нации. Об этом еще в начале XX в. убедительно писал видный русский физик Н.А. Умов, слова которого и сегодня звучат актуально: *«Политическое значение нации может быть прочным лишь при условии, что культурный ее уровень соответствует ее политическому подъему. В наше время оружие, мужество не являются единственными факторами, обеспечивающими успех в борьбе народов за свое развитие и существование.... Если обратимся к нашей стране, то осознаем, что мы, к сожалению, до сих пор большей частью перенимаем и заимствуем и очень мало вкладываем в культурную жизнь человечества».*

По словам великого немецкого ученого Лейбница, *«науки и искусства... постоянно содействуют славе Господней и благосостоянию рода человеческого. Науки и искусства составляют настоящее сокровище человеческого рода, ибо посредством их искусство превозмогает природу и цивилизованные народы отличаются от варварских».*

Русский ученый Д.В. Агеев был одним из тех людей, труды которых пополнили мировую сокровищницу научной мысли и способствовали прогрессу в области связи.

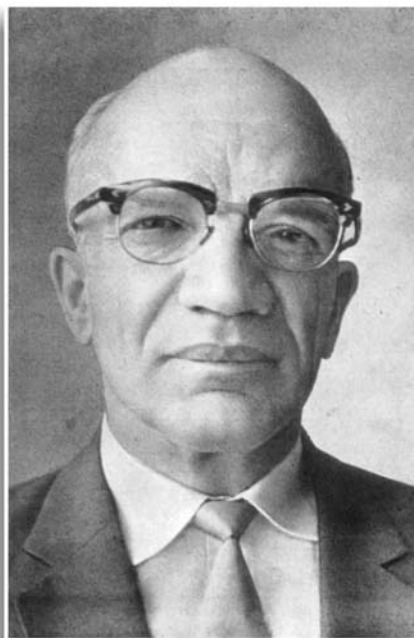
Литература

1. Маланов В.В. О жизненном пути и педагогической деятельности профессора Д.В. Агеева. www.adm.nntu.sci-nnov.ru
2. Зенькович А.В. Научное наследие профессора Д.В. Агеева. www.adm.nntu.sci-nnov.ru
3. Быховский М.А. Круги памяти. Сер. изданий «История электросвязи и радиотехники». М.: Мобильные коммуникации. 2001. Вып. 1.

Владимир Иосифович БУНИМОВИЧ

*Уметь дать направление — признак
гениальности.*

Наполеон



Введение

В ряду выдающихся ученых, усилиями которых в XX в. была создана статистическая теория связи, играющая значительную роль в процессе перехода нашей цивилизации к информационному обществу, достойное место занимает доктор технических наук, профессор Владимир Иосифович Бунимович. Всего около 30 публикаций в списке научных трудов В.И. Бунимовича. Однако многие его работы сыграли огромную роль в становлении и развитии весьма важного в практическом отношении научного направления — статистической радиотехники. Выдающийся отечественный ученый В.И. Бунимович, а также американские ученые С.О. Райс и Д. Миддлтон относятся к первооткрывателям этой области. Они независимо друг от друга разработали примерно в одно и то же время вероятностные методы анализа различных радиоустройств. Работы В.И. Бунимовича и этих ученых открыли новое научное направление в теории связи — статистическую радиотехнику.

Биографический очерк

Владимир Иосифович Бунимович родился 16 июля 1904 г. в Цюрихе (Швейцария). Вскоре после его рождения родители приехали в Россию и стали жить в Таганроге. Его отец по специальности был химик, а мать — врач. В г. Таганроге прошла юность В.И. Бунимовича. Учился он хорошо и, окончив местную гимназию в 1920 г., владел тремя иностранными языками — немецким, английским и французским. Сразу после окончания гимназии В.И. Бунимович поступил в профтехшколу в Таганроге.

Еще в гимназии у него проявился интерес к точным наукам, и в 1922 г. он поступает на физико-математический факультет Донского университета. Этот университет в 1924 г. был закрыт, и В.И. Бунимовича для продолжения учебы перевели в Ленинград. Диплом инженера-физика он получил в 1929 г. после окончания физико-механического факультета Ленинградского политехнического института.

Его инженерная и научная деятельность началась в 1927 г., когда он, будучи еще студентом, стал работать в Ленинградской физико-технической лаборатории под руководством известного отечественного ученого профессора Д.А. Рожанского. В этой лаборатории он занимался проблемами создания умножителей частоты, и в 1930 г. в научных журналах у нас в стране и в Германии появились его первые публикации, посвященные этим проблемам. В 1931 г. он был переведен в Харьковский физико-технический институт, где занимался экспериментальными и теоретическими исследованиями в области ядерной физики. В 1935 г. его привлекают к работам, связанным с созданием радиолокационной техники, и переводят в один из НИИ в Ленинграде, где он создает основы теории полых электромагнитных резонаторов с малыми потерями, являющихся важными элементами передающих устройств радиолокационных станций. В это же время он решает практическую задачу создания высокочастотных волномеров дециметрового и сантиметрового диапазонов. В дальнейшем он разрабатывает разного рода радиотехнические устройства дециметрового диапазона, освоение которого в те годы только начиналось. В 1939—1940 гг. в «Журнале технической физики» он опубликовал фундаментальные научные работы по этой тематике, а в 1940 г. в Ленинградском промышленном институте защитил диссертацию и ему была присуждена ученая степень кандидата физико-математических наук.

Первый жестокий удар Бунимович получил в 1938 г., когда его отец как бывший иностранец по ложному обвинению был арестован и в скором времени погиб в тюрьме.

В 1940 г. он переводится в Ленинградский физико-технический институт АН СССР, где начинает заниматься проблемами, связанными с влиянием шумов на прием радиолокационных сигналов. Своими оригинальными работами в этой области он заложил основы статистической радиотехники.

Война с фашистской Германией приносит ему новое личное горе. Через несколько месяцев после начала войны враг оккупирует Таганрог, и его мать погибает.

В 1943 г. В.И. Бунимовича утверждают в ученом звании старшего научного сотрудника. С 1944 по 1949 г. он занимается исследованиями в лаборатории известного советского ученого академика М.Я. Леонтовича, с которым он работает вместе — сначала в одном из НИИ Ленинграда, а затем в Физическом институте им. П.Н. Лебедева в Москве.

В 1949 г. он был переведен на работу в Геофизический институт АН СССР, в котором в 1950 г. получил академический отпуск для написания ставшей вскоре знаменитой книги «Флуктуационные процессы в радиоприемных устройствах». В 1952 г. его переводят в Московскую телевизионную лабораторию, в которой он выполняет экспериментальные и теоретические исследования методов и средств подавления помех телевидению, входных устройств радиоприемников и специального анализатора спектра.

Написанная им книга легла в основу диссертации на соискание степени доктора технических наук, которую он успешно защитил в 1955 г. В этом же году его переводят на работу в крупнейший отечественный научный центр — Институт радиотехники и электроники (ИРЭ) АН СССР, возглавляемый академиком В.А. Котельниковым. В ИРЭ он проработал до конца жизни. До 1962 г. он занимал в институте должность

старшего научного сотрудника, а в 1962 г. была создана лаборатория статистических методов радиотехники и новых физических принципов построения помехозащищенных систем связи, которую он возглавлял до 1970 г. Затем работал старшим научным сотрудником — консультантом.

В.И. Бунимович был не только выдающимся исследователем, но и крупным педагогом. Преподавать он начал сразу после окончания института в 1930 г. Преподавал в Ленинградском политехническом институте, в Харьковском машиностроительном институте, в Московском педагогическом институте, читая курсы лекций по электрическим колебаниям, математике, теоретической и общей физике.

Первые в нашей стране лекции по теории флуктуационных процессов для аспирантов и научных сотрудников ряда отечественных НИИ были прочитаны В.И. Бунимовичем в 50-е гг. Эти лекции заложили основы курса статистической радиотехники, который вскоре стали преподавать во многих высших учебных заведениях страны. В 1963 г. он был утвержден в ученое звание профессора.

В.И. Бунимович обладал широкой эрудицией и глубокими знаниями. В то же время в кругу коллег он был известен скромным, но щедрым и доброжелательным человеком. Он был полностью лишен тщеславия и сознательно не стремился ни к научным почестям, ни к званиям.

Владимир Иосифович Бунимович скончался в Москве 3 октября 1981 г. в возрасте 77 лет.

Разработка проблем статистической радиотехники

Как уже отмечалось, к разработке проблем статистической радиотехники В.И. Бунимович приступил незадолго до начала Великой Отечественной войны.

В 1945—1946 гг., практически одновременно с американскими учеными С.О. Райсом и Д. Миддлтоном, он опубликовал ряд работ [1—4], заложивших основы статистической радиотехники. В этих работах рассмотрены основные задачи новой научной области, связанные с преобразованием случайных процессов при их прохождении через нелинейные узлы приемных устройств, решен ряд задач по определению статистических характеристик выбросов случайных процессов. Проблемы статистической радиотехники он продолжал разрабатывать и в 50-е гг. [5—7]. Предложенный им метод анализа узкополосных флуктуационных процессов (метод огибающих) [5] сыграл большую роль в становлении современной статистической радиофизики.

В 1951 г. вышла фундаментальная монография В.И. Бунимовича «Флуктуационные процессы в радиоприемных устройствах» [8], которая стала первой в мировой литературе книгой по статистической радиотехнике. В ней ставились и решались проблемы нелинейных преобразований случайных процессов. Эта классическая книга в течение многих лет пользовалась широкой известностью и являлась настольной для отечественных специалистов в области статистической радиофизики и радиотехники. На нее ссылались отечественные авторы научных монографий и учебников, которые издавались в нашей стране во второй половине XX в.

В книге В.И. Бунимовича впервые были развиты: общий метод решения задач, связанный с действием флуктуаций на детектирующие устройства, который впоследствии широко применялся многими исследователями; методы решения задач, связанных с прохождением шумов через детекторы с различными характеристиками; теория модуляционного измерителя некогерентного излучения (радиометра); рассмотрена задача совместного действия шумов и сигнала на квадратичный и линейный детекторы. Изложение материала иллюстрировалось примерами применения представленных в книге методов. Книга В.И. Бунимовича сыграла весьма существенную роль в развитии научных исследований в данной области. Значительный вклад в развитие статистической радиотехники в последующие годы внесли крупнейшие отечественные ученые профессора Б.Р. Левин, Р.Л. Стратонович и В.И. Тихонов.

Работая в ИРЭ, В.И. Бунимович занимался проблемами теории оптимального приема сигналов, созданной академиком В.А. Котельниковым. В конце 50-х — начале 60-х гг. он получил ряд фундаментальных результатов [9, 10] по теории обнаружения и оценки параметров слабых сигналов, принимаемых на фоне случайных шумов.

Заключение

В.И. Бунимович — замечательный отечественный ученый, один из тех, кто в середине XX столетия дал новое направление научным исследованиям в области теории связи, к сожалению, не получил того мирового признания, которое получили другие ученые, работавшие за рубежом. В СССР, тоталитарном государстве, права и свободы отдельной личности игнорировались. Поэтому отечественные ученые в основной массе были лишены возможности свободного общения и обмена научными идеями со своими коллегами, работавшими над подобными же проблемами в других странах. Это наносило существенный ущерб развитию отечественной науки. Ни разу в жизни В.И. Бунимович, как, впрочем, и многие другие крупные советские ученые, не принимал участия в регулярно проводимых за рубежом международных научных конференциях по проблемам теории связи. Только в 1960 г. ему удалось выехать в качестве туриста на две недели в Чехословакию.

О той смертельной опасности, которую несет тоталитарное государство для развития духа нации и ее интеллекта, предупреждал великий русский философ Николай Бердяев, высланный в 20-е гг. из СССР коммунистическим режимом. Он писал: *«Тоталитарное государство есть царство сатаны. Государство не смеет касаться духа и духовной жизни... Выносимы лишь те государства, которые имели бы символическую ценность человека, а не величия государства»*. История показала, насколько верна эта мысль.

Однако ничто не может остановить стремление человека познавать, любить и хотеть. Человеком, охваченным жадной творчеством, был и В.И. Бунимович. Ему посчастливилось открыть новое направление в науке, которое во второй половине XX столетия разрабатывалось многими отечественными и зарубежными учеными.

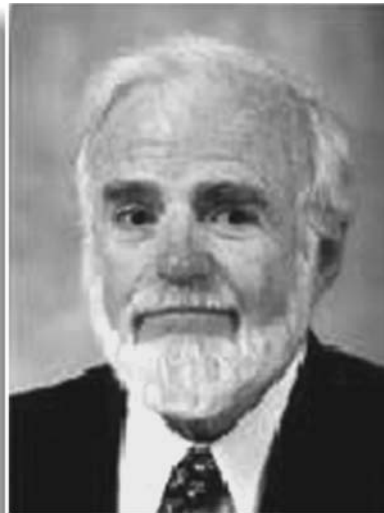
Научные труды В.И. Бунимовича

1. Воздействие флуктуационного напряжения и сигнала на нелинейную систему / Докл. на Всесоюзной научно-технической конференции, посвященной 5-летию изобретения радио А.С. Поповым. Май 1945.
2. Преобразование флуктуаций нелинейной системой // ЖТФ. 1946. Т. 16. С. 631–650.
3. The effect of the fluctuations and signal voltage on a non linear system // Journ. of Physics USSR. 1946. Т. 10. P. 35–48.
4. *Бунимович В.И., Леонтович М.А.* О распределении числа больших отклонений при электрических флуктуациях // Докл. АН СССР. 1946. Т. 53. Вып. 1.
5. Флуктуационный процесс как колебание со случайными амплитудой и фазой // ЖТФ. 1949. Т. 19. С. 1231–1259.
6. Чувствительность радиометра // ЖТФ. 1950. Т. 20. С. 944–953.
7. Выбросы напряжения флуктуационных шумов // ЖТФ. 1951. Т. 21. С. 625–636.
8. Флуктуационные процессы в радиоприемных устройствах. М.: Сов. радио, 1951.
9. Приближенное выражение вероятности правильного обнаружения при оптимальном приеме с неизвестной фазой // Радиотехника и электроника. 1958. № 4.
10. *Бунимович В.И., Морозов В.А.* Об оценке частоты узкополосного сигнала на фоне белого шума // Радиотехника и электроника. 1962. № 1.

Гарри Ван ТРИС

*Мир стареет в былых надеждах,
Но сегодня, как и вчера,
На плечах эту землю держат
И несут на себе Мастера!
Руки вещице простирая
К перекресткам звездных миров,
Время движется Мастерами
и надеется на Мастеров.*

Роберт Рождественский



Введение

Разные люди в разной степени наделены творческим и созидательным даром. Поэтому, как было верно подмечено Иосифом Бродским, «...демократический принцип, столь желанный во всех сферах человеческих начинаний, неприменим, по меньшей мере, в двух из них — в искусстве и науке. В этих двух сферах применение демократического принципа приводит к знаку равенства между шедевром и хламом, между открытием и невежеством». Люди, наделенные творческим даром, вершат историю: они вносят ощутимый вклад в развитие человеческой цивилизации и поднимают человечество на новую ступень. Эти люди составляют элиту человеческого общества. Их жизнь оказывает значительное влияние на других людей, показывая колоссальные возможности человеческой личности, утверждая ту важнейшую истину, что жизнь человека имеет осмысленную цель — совершенствовать себя и окружающий мир. Лишь на этом пути человек может достигнуть счастья и заслужить благодарную память потомков.

Сфера влияния крупной личности не ограничена кругом ближайших учеников и последователей. Она гораздо шире и нередко охватывает людей, живущих в разных концах земного шара. В этом смысле деятельность творческих личностей способствует не только обогащению духовной сферы человечества путем распространения определенных идей и знаний и изменению материальных условий жизни, но также, что имеет особо важное значение, способствует единению всех живущих на Земле людей. Они являются катализаторами прогресса всего человечества. Их влияние особенно усиливается сейчас, в связи с быстрым и глобальным развитием во всем мире телекоммуникаций, объединяющих людей в единое информационное общество.

В ряду ученых, внесших значительный вклад в развитие теории связи, Гарри Ван Трис не относится к первооткрывателям новых научных направлений, подобно В.А. Котельникову, С.О. Райсу, К. Шеннону, Н. Винеру, Р.Л. Стратоновичу, Д. Миддлтоу. Однако Г. Ван Триса следует отнести к тем энциклопедически

образованным ученым, кто, обобщив огромный теоретический материал, разработанный предшественниками, и представив его в систематизированном и методически отработанном виде, открыл возможность освоить его тысячам специалистов во всем мире.

Гарри Ван Трис является одним из крупнейших американских ученых в области связи и одним из тех Мастеров, благодаря которым время, согласно выражению Р. Рождественского, «...движется вперед».

Биографический очерк

Гарри Ван Трис получил степень бакалавра в Военной академии США, позже в университете штата Мэриленд — магистерскую степень, а в 1961 г. в Массачусетском технологическом институте (МТИ) защитил докторскую диссертацию.

Период с 1961 по 1972 г. — это время активной академической деятельности Г. Ван Триса. Он — профессор МТИ, активно ведет исследовательскую работу и занимается преподаванием.

В 1972 г. начинается новый период в жизни Г. Ван Триса, который продолжается до 1988 г. В это время он занимает ответственные посты в крупных государственных компаниях, производящих радиоэлектронное оборудование для армии США.

С 1972 по 1975 г. он был главным научным специалистом государственного Агентства военной связи. Он разрабатывает программу научных исследований, организует для ее реализации инженерный центр, а в составе этого Агентства — Управление по разработке военных систем спутниковой связи. Его деятельность направлена на замену в военной связи морально устаревших аналоговых систем цифровыми. С 1975 по 1978 г. Г. Ван Трис — помощник вице-президента Корпорации спутниковой связи по разработке перспективных систем связи; возглавляет отдел систем связи и, в частности, разрабатывает планы развития системы ИНТЕЛСАТ.

С 1979 по 1981 г. он занимает руководящие посты в управлении Минобороны США, ответственном за проведение исследований, разработку и закупку командных, связных и разведывательных систем. Годовое финансирование новых разработок этих систем составляло 30 млрд долл. Деятельность Г. Ван Триса в этот период тесно связана с проектированием архитектуры военных спутниковых систем. В частности, он инициатор программы создания системы MILSTAR.

С 1981 г. он работал сначала вице-президентом, а с 1985 г. — президентом одного из отделений крупнейшей государственной компании М/А-СОМ по производству радиоэлектронного оборудования для армии США. В этой компании 1600 специалистов разрабатывали модемы и декодеры для систем связи, а также спутниковые терминалы для военных систем. Компания выпускала терминалы для наземной и спутниковой связи в диапазоне метровых волн, модемы, терминалы для ядерных сил США и для президентской связи. Годовой объем производства компании составлял 90 млн долл.

С 1988 г. Г. Ван Трис возглавлял созданный им в Университете Джорджа Масона в Калифорнии крупный научный Центр перспективных исследований в области управления, связи и разведки, был почетным профессором информационных технологий и проектирования систем связи.

Г. Ван Трис — почетный член Международного института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE), Информационного агентства США, член Национальной академии наук США, почетный член общества связи и других общественных и правительственных групп, занимающихся проблемами связи и информатизации.

Научные результаты в области теории связи

Гарри Ван Трис получил основные научные результаты в годы работы в МТИ. Его докторская диссертация была значительным научным исследованием, в котором разработана методология синтеза нелинейных систем управления с обратной связью. Эта работа выполнена под руководством профессора Ю.В. Ли — известного американского ученого, ученика и близкого сотрудника Норберта Винера в Группе статистической теории связи — одного из подразделений лаборатории электроники МТИ, сотрудником которой Г. Ван Трис состоял в 1959—1963 гг. В этой работе использовался математический аппарат функциональных рядов Вольтерра. Впервые такой подход к исследованию нелинейных систем, на входе которых действуют полезные сообщения, искаженные гауссовским шумом, был развит Винером. Позже этот метод стал широко применяться для расчета нелинейных систем управления и радиотехнических систем.

Докторская диссертация Г. Ван Триса была опубликована в 1962 г. издательством МТИ в виде книги «Синтез оптимальных нелинейных систем управления». В 1964 г. ее перевели и издали в СССР. Развитый в ней подход к исследованию нелинейных систем позже был применен Г. Ван Трисом к исследованию явления порога при приеме частотно-модулированных (ЧМ) сигналов с помощью систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Данная проблематика в конце 60-х гг. была весьма актуальна для систем спутниковой связи, в которых широкое применение находили системы с ЧМ.

Несколько оригинальных научных работ Г. Ван Триса посвящены анализу помехоустойчивости оптимальных систем приема ЧМ-сигналов и систем разносенного приема ЧМ-сигналов в каналах с переменными параметрами. Им был предложен простой метод определения порогового уровня сигнала для систем ФАПЧ, используемых для демодуляции ЧМ-сигналов. При больших уровнях полезных сигналов ФАПЧ работает в линейном режиме, и в этом режиме анализ ее помехоустойчивости позволяет легко определить величину среднеквадратической ошибки слежения за фазой принимаемого сигнала. Г. Ван Трис предложил простой эвристический критерий для определения порогового уровня ЧМ-сигнала, согласно которому порог при приеме ЧМ-сигналов с помощью системы ФАПЧ наступает тогда, когда среднеквадратическое значение ошибки слежения за фазой принимаемого сигнала становится равным 0,2 рад. Этот критерий определения порогового уровня согласуется с данными экспериментальных исследований.

Научные результаты были получены Г. Ван Трисом в работах, посвященных анализу потенциальной помехоустойчивости приема аналоговых сигналов. Он рассмотрел проблему одновременной передачи нескольких сообщений по параллель-

ным каналам связи и получил интегральные уравнения, в которые входят корреляционные функции передаваемых сообщений, отношения сигнал/шум в каналах связи и корреляционная матрица частных производных передаваемых по каналам связи сигналов по информационным параметрам. Эти результаты являются важным обобщением классического неравенства Крамера—Рао на случайные процессы. Решение полученных Г. Ван Трисом уравнений позволяет определить нижнюю границу среднеквадратической оценки полезных сообщений, передаваемых по этим каналам.

Наиболее значимой заслугой Г. Ван Триса является создание уникальной четырехтомной монографии по теории оптимального приема сигналов в разных каналах связи. Эта книга была переведена и издана в России и Китае. В ней обобщены и изложены с единых позиций многочисленные результаты теории оптимального приема дискретных и аналоговых сигналов, полученные более чем за 30-летнюю историю ее развития.

Во всех томах книги приведено большое число задач разной сложности, предназначенных для углубленного изучения основного материала. Автор создавал ее для трех категорий специалистов. К первой относятся студенты — выпускники и аспиранты, ко второй — ученые, ведущие исследования, к третьей — инженеры, занятые на практической работе. По сегодняшний день эта книга является наиболее полной монографией по всем затронутым в ней вопросам. Она была переиздана 27 раз. Во всем мире по ней осваивали теорию оптимального приема сигналов несколько поколений ученых и инженеров.

В конце 60-х — начале 70-х гг. Г. Ван Трис выпустил в издательстве МТИ содержательные учебники по теории вероятностей и теории случайных процессов для студентов и аспирантов.

Заключение

Объединение в единую теорию новых идей, выдвинутых выдающимися учеными на протяжении длительного времени, — созидательная задача.

Можно утверждать, что книги Евклида, по которым уже два тысячелетия во всем мире люди осваивают начала математики, оказали на развитие человеческой цивилизации большее влияние, нежели военные походы Александра Македонского и Наполеона. Следует отметить, что большая часть результатов, собранных в трудах Евклида, не принадлежит ему самому, а получена ранее другими учеными древности. Заслуга Евклида в том, что он изложил все известные в то время результаты.

Гарри Ван Трис выполнил гигантскую созидательную работу и написал книги, в которых систематически и с единых позиций представлены все научные достижения одного из важнейших разделов теории связи — теории потенциальной помехоустойчивости. Как его собственные научные исследования, так и его книги вошли в золотой фонд мировой науки. Уникальность личности Г. Ван Триса состоит не только в удивительной интеллектуальной мощи, позволившей ему за относительно короткое время своей академической деятельности написать несколько фундаментальных монографий в области статистической теории связи. Она состоит так-

же в том, что талант ученого и педагога сочетается в нем с талантом крупного научного деятеля — организатора научных исследований и перспективного планирования развития крупных отраслей радиосвязи в своей стране, где способности личности и ее деловые качества оцениваются, как правило, очень высоко.

Основные публикации Г. Ван Триса

1. Synthesis of Optimum Nonlinear Control Systems. Cambridge, Mass.: Mass. Inst. of Tech. Press. 1962. (Синтез оптимальных нелинейных систем управления / Пер. с англ.; Под ред. А.Ю. Ишлинского. М.: Мир, 1964.)
2. Detection, Estimation, and Modulation Theory. N. Y.: Wiley. 1968. P. I. (Теория обнаружения, оценок и модуляции / Пер. с англ.; Под ред. В.И. Тихонова. М.: Сов. радио, 1972.)
3. Detection, Estimation, and Modulation Theory. N. Y.: Wiley. 1968. P. II. (Теория обнаружения, оценок и модуляции / Пер. с англ.; Под ред. В.Т. Горяинова. М.: Сов. радио, 1975.)
4. Detection, Estimation, and Modulation Theory. N. Y.: John Wiley and Sons. 1968. P. III. (Теория обнаружения, оценок и модуляции / Пер. с англ.; Под ред. В.Т. Горяинова. М.: Сов. радио, 1977.)
5. Array Processing. N. Y.: Wiley. 1971.
6. Probability. Mass. Inst. of Tech. 1970. V. I–V.
7. Random Processes. Mass. Inst. of Tech. 1971. V. I–V.

Норберт ВИНЕР

Всякое творчество есть по сути своей молитва.

Всякое творчество направлено в ухо Всемогущего.

Анна Ахматова

Введение

События XX в. уже стали историей. Двадцатое столетие подарило миру много ярких личностей, благодаря творческой работе которых в научной сфере, в области искусства, в инженерном деле человечество поднялось на высокую ступень развития и перед ним открылись новые захватывающие дух горизонты.

Одним из блестящих людей, интеллектуальные достижения которых открыли новые направления в математике, теории информации, теории случайных процессов, является выдающийся американский ученый Норберт Винер. Идеи Винера и полученные им результаты имеют огромное значение для специалистов в области связи. Винер отчетливо понимал, какое влияние на развитие общества оказывает совершенствование техники связи. Он писал: *«Стало очевидно, что техника управления и техника связи неотделимы друг от друга и что они концентрируются не вокруг понятий электротехники, а вокруг понятия сообщения»*. И еще: *«...если 17-е столетие и начало 18-го столетия — век часов, то настоящее время есть век связи и управления»*.

Главная книга Винера «Кибернетика, или управление и связь в животном и машине» вышла в 1948 г. в США и во Франции. Неожиданно для многих, в том числе и для автора, стала научным бестселлером и в мгновение ока превратила Винера, по его словам, «...из ученого-труженика, пользующегося определенным авторитетом в своей специальной области, в нечто вроде фигуры общественного значения». Во многих странах развернулись интенсивные исследования. Позднее она была переведена на многие языки. На русском языке книга вышла в СССР только в 1958 г.

Идеи, содержащиеся в книге Винера, не у всех и не сразу нашли признание. Попытка подвести научные основы под проблемы управления социальными процессами в обществе вызвала неприятие в коммунистических странах, так как эти идеи находились в противоречии с господствовавшей идеологией. В 1952 г. один из крупных советских ученых в области связи писал: «Винер и другие, исходя из внешней, поверхностной аналогии и спекулируя на нечеткости и двусмысленности некоторых терминов и понятий, пытаются перенести закономерности радиосвязи на биологические и психологические явления, говорят о “пропускной способности” человеческого мозга и т.д. Естественно, все эти попытки придать кибернетике наукообразный характер с помощью заимствованных из другой области терминов и понятий отнюдь не делают кибернетику наукой — она остается лжетеорией, созданной реакционерами от



науки и философствующими невеждами, находящимися в плену идеализма и метафизики...» Разумеется, в пятидесяти основных томах второго издания Большой советской энциклопедии не нашлось места таким словам, как «Винер», «Информация», «Кибернетика», «Семиотика» и т.п. Поэтому в 1958 г. был выпущен дополнительный, 51-й том, куда вошли все эти понятия и определения. Догматически-идеологический подход к оценке новых научных идей (в генетике, кибернетике и т.д.) существенно затормозил развитие науки и техники в СССР.

Однако остановить прогресс и повернуть историю вспять невозможно. Первым официальным выступлением в отечественной печати в поддержку кибернетики была статья «Основные черты кибернетики» (С.Л. Соболева, А.И. Китов и А.А. Ляпунов), опубликованная в 1955 г. журналом «Вопросы философии». *«К сожалению, многие, выступавшие против кибернетики как “сплошной мистификации”, не имели о ней достаточного представления»*, — говорилось в статье. Далее подробно объяснялось, в чем состоят основные идеи кибернетики и почему они никак не противоречат марксистской философии. Однако этого было мало, чтобы победить околонучных оппонентов, профессионалов борьбы *«за советскую науку против ее идейных противников»*. В 1957 г. С.Л. Соболев и А.А. Ляпунов выпускают книгу «Кибернетика и естествознание». Кибернетика становится частично разрешенной, в Институте математики организуется отдел кибернетики, во главе исследований — член-корреспондент АН СССР А.А. Ляпунов.

Академик А.И. Берг, поняв несомненную важность и перспективность идей Винера для науки и практики, сумел преодолеть предубеждения против нового направления и в 1959 г. организовал и возглавил «Совет по кибернетике» при Президиуме Академии наук СССР, сыгравший важную роль в развитии исследований по проблемам кибернетики в нашей стране.

Винер, подобно крупнейшим ученым прошлого, таким, например, как Леонардо да Винчи, Лейбниц и Дарвин, был энциклопедически образованным и разносторонним ученым XX столетия, оставившим после себя огромное научное наследие не по числу написанных трудов, а по количеству содержащихся в них новых идей и тому влиянию, которое оказали они на развитие науки и техники и на мировоззрение миллионов людей.

Биографический очерк

Норберт Винер родился 26 ноября 1894 г. в г. Колумбия, штат Миссури. Родители Норберта — Лео и Берта Винер в конце XIX в. эмигрировали в США из России. Его отец Лео Винер — уроженец г. Белосток в Польше, был выдающимся филологом, в совершенстве владел многими иностранными языками. Он был знатоком и последователем философской системы Льва Толстого и перевел 24 тома его сочинений на английский язык. О его феноменальной работоспособности свидетельствует то, что эту титаническую работу он выполнил всего за два года. В Колумбии он был профессором современных языков в Миссурийском университете, а позже стал профессором славянских языков старейшего в США Гарвардского университета в Кембридже, штат Массачусетс.

По семейному преданию, Винеры вели свой род от знаменитого еврейского ученого и богослова Моисея Маймонида из Кордовы. Еще великим философом Спинозой

было отмечено, что «...самое полезное в жизни — совершенствовать свое познание и ум, и в этом состоит высшее счастье и блаженство человека». Отец Винера воспитанию и образованию своих детей уделял серьезное внимание.

Норберт Винер был вундеркиндом, и отец сознательно готовил его к карьере ученого. В 3 года он начал читать, в 7 лет он уже читал Дарвина и Данте, в 11 — окончил среднюю школу, а в 14 — высшее учебное заведение Тафтс-колледж, получив степень бакалавра искусств. В 17 лет закончил аспирантуру Гарвардского университета и стал магистром искусств, а в 18 — доктором философии по специальности «математическая логика». Норберт Винер, как и его отец, знал многие европейские языки — французский, немецкий, датский, испанский, английский, голландский, китайский. Имел философское образование. У Норберта были две сестры — старшая Констанс и младшая Берта и брат Фриц. Старшая сестра, так же как и Винер, стала математиком, а младшая — химиком.

После окончания Гарвардского университета Винер получил стипендию и два года провел в Европе. В 1913—1915 гг. он обучался в двух университетах: Кембриджском — в Англии и Геттингенском — в Германии. В Кембридже он занимался у Бертрана Рассела — философа и крупного английского математика-специалиста в области математической логики, а также у известного специалиста в области теории чисел Дж. Х. Харди. В Геттингене Винер слушал лекции выдающегося математика XX в. Д. Гильберта и философа Э. Гуссерля.

Завершив образование в 1915 г. в Колумбийском университете Нью-Йорка, Винер получает место ассистента на кафедре философии в Гарварде. Поначалу его научная карьера не складывалась. Одно время он был журналистом, намеревался поступить на службу в армию. В 1919 г. он наконец получает работу в знаменитом Массачусетском технологическом институте (МТИ), в котором проработал всю жизнь. Этому институту он посвятил книгу «Я — математик», указав в посвящении, что обязан ему «...возможностью работать и размышлять обо всем, что меня интересует».

Академическая карьера Винера протекала медленно, но успешно. Его имя приобретает авторитет среди ученых в Америке и Европе. Он издает нашедшие признание книги по математике: «Обобщенный гармонический анализ», «Тауберовы теоремы», «Интеграл Фурье и некоторые его применения», совместно с английским математиком Р. Пэйли выпускает монографию «Преобразование Фурье в комплексной области». Книга «Интеграл Фурье и некоторые его применения» в 1963 г. была переведена на русский язык. Совместно с немецким математиком Э. Хопфом он выполняет исследование о радиационном равновесии звезд и вводит в науку уравнение Винера-Хопфа, сыгравшее большую роль при разработке Винером теории оптимальной линейной фильтрации. Эта теория оказала впоследствии большое влияние на развитие теории связи. В 1932 г. Винер становится профессором МТИ.

Как это нередко бывает с крупными учеными, Винер был рассеянным человеком, постоянно погруженным в свои мысли. Один из его учеников вспоминал, что когда Винер читал лекции (а они всегда были импровизацией, и читал он их, не пользуясь записями), он становился к слушателям спиной и начинал писать на доске формулы, разговаривая как бы сам с собой. Время от времени он останавливался, говорил сам себе, что в выкладках допущена ошибка, стирал написанное и начинал снова заполнять доску сложными формулами. После завершения лекции, не прощаясь, быстро выходил из аудитории. Слушателям понять его лекции было сложно. Тем не менее

все лекции пользовались огромной популярностью. Несмотря на странности характера, отношение Винера к людям было доброжелательным. Некоторые его ученики стали впоследствии крупными учеными.

В 1926 г. Винер женился. Его жена Маргарет Энгеман была преподавателем современных языков в Джунитата — колледже в Пенсильвании. В 1928 г. у них рождается дочь Барбара, а в 1930 г. — дочь Пегги. Барбара впоследствии стала журналисткой, а Пегги — биохимиком и работала в крупной фармацевтической фирме.

На 1935—1936 гг. Винер избирается вице-президентом Американского математического общества (АМО). В 30-е гг. Винер сближается с мексиканским ученым-физиологом Артуром Розенблютом и участвует в организованном им методологическом семинаре совместно с представителями разных наук, где обсуждается широкий спектр научных проблем, в том числе проблемы биологии и медицины. В эти годы Винер вырабатывает универсальный подход к проблемам современной науки.

Во время Второй мировой войны Винер работает в военной лаборатории МТИ, где создавались радиолокационные системы, и занимается разработкой проблем автоматического управления огнем зенитной артиллерии. Но главным для Винера и его коллег было проектирование вычислительной машины, предназначенной для управления зенитным огнем. Напрашивалось размышление о том, как человек или животное осуществляет целенаправленное действие. Так возникла новая наука, идеи которой изложены в книге «Кибернетика».

В 1942 г. он составляет для военных секретный отчет о результатах выполненных исследований. Только в 1949 г. они были рассекречены и изданы в виде монографии «Интерполяция, экстраполяция и сглаживание стационарных временных рядов». Книга содержала основы статистической теории связи. Она была издана в желтом переплете, и ее, вследствие математической сложности, инженеры-связисты называли «желтой опасностью».

Вышедшая в 1948 г. самая знаменитая книга Винера «Кибернетика», принесшая ему мировую славу, по сути — сборник идей, позволяющих с единых методических позиций изучать широчайший спектр проблем техники, физики, биологии, физиологии, медицины, психологии, социологии. Именно об идеях такого глобального масштаба Иосиф Бродский замечательно сказал: «Главное — это величие замысла». Винер показывает, как наука может упорядочить огромный материал из разных областей, наладить сотрудничество ученых разных специальностей, вооружить их общепонятным языком и взаимоприемлемой методикой. Одна из глав книги посвящена непосредственно проблемам информации и связи. Книга содержит также философские размышления о путях развития науки и человека.

В последующие годы Винер занимался разработкой и популяризацией идей кибернетики. Свои мысли он излагал в книгах и статьях: «Человеческое использование человеческих существ» (в книге «Кибернетика и общество». ИЛ. 1958), «Акционерное общество Бог и Голем» (в книге «Творец и робот». Прогресс. 1966), «Мое отношение к кибернетике — ее прошлое и будущее» (Сов. радио, 1967).

В 1958 г. выходит фундаментальная монография Винера «Нелинейные проблемы в теории случайных процессов», которая в 1961 г. переведена на русский язык. Эта книга также сыграла важную роль в развитии теории связи.

В 1960 г. Н. Винер посещает СССР, где участвует в работе Первого конгресса Международной федерации автоматического управления. Он выступает в Политехническом музее с лекциями о мозговых волнах, публикует несколько статей в советских научных и философских журналах.

Винером написано несколько художественных книг. В 1951 и 1956 гг. были опубликованы две его биографические книги: первая — «Бывший вундеркинд» посвящена детству и юношеским годам ученого, вторая — «Я — математик» рассказывает о становлении и развитии его как ученого. В 1959 г. вышел художественный роман Винера «Искунитель», посвященный изобретателю, сделавшему великое открытие.

Винер активно общался и сотрудничал со многими выдающимися учеными. В 20–30-е годы он устанавливает научные контакты с крупнейшими европейскими специалистами — математиками М. Фреше, Ж. Адамаром, физиками Н. Бором, М. Борном, Дж. Берналом, активно участвует во многих международных математических конгрессах, подолгу живет в Кембридже и Геттингене. В 1935–1936 гг. посещает Китай и читает лекции в пекинском университете Цинхуа, а в 1953–1954 гг. совершает научное турне и выступает с лекциями в ряде университетов в Индии.

Винер заслужил широкое признание в научной среде. За свои достижения в области математики он был награжден премиями АМО: в 1933 г. — премией Боша, в 1934 г. — премией как лучший лектор, в 1947 г. — премией Гиббса. В 1963 г. Винер за выдающиеся научные заслуги в области математики, техники и биологии награждается высшей американской наградой для ученых — Национальной медалью науки.

Норберт Винер скончался в Стокгольме 18 марта 1964 г. в возрасте 69 лет.

Вклад Винера в теорию связи и информации

Работы Н. Винера и других крупнейших ученых современности — А.Н. Колмогорова, А.Я. Хинчина, К. Шеннона, В.А. Котельникова, С.О. Райса, Д. Миддлтона, Р.Л. Стратоновича образуют фундамент современной теории связи. Они касаются вопросов, связанных с теорией преобразования Фурье, операционным исчислением Хевисайда, теорией случайных процессов и теорией информации.

Проблемами теории связи Винер начал заниматься еще в 20-х гг., когда по заданию кафедры электротехники МТИ начал работать над строгим логическим обоснованием операционного исчисления Хевисайда.

Основопологающей для теории связи является работа Винера «Интерполяция, экстраполяция и сглаживание стационарных временных рядов», которая сыграла главную роль в создании методов синтеза оптимальных устройств обработки принимаемых сигналов. Содержащиеся в ней результаты позволяли синтезировать оптимальные физически реализуемые линейные фильтры, которые на своем выходе формировали наиболее точную оценку действующего на их входе сигнала или его экстраполяцию (предсказание), используя все ранее принятые значения этого сигнала. Исходными данными для такого синтеза являлись корреляционные функции (спектры мощности) сигналов и шумов, действующих на входе фильтра, а переходная характеристика оптимального фильтра определялась интегральным уравнением Винера–Хопфа с ядром, равным корреляционной функции процесса на входе фильтра.

Теория оптимальной линейной фильтрации играет решающую роль в современной теории связи. Линейные фильтры в качестве основных элементов используются в любых (в том числе и нелинейных) устройствах обработки принимаемых сигналов.

Вспоминая историю разработки теории оптимальной линейной фильтрации, Винер в своей автобиографической книге «Я — математик» написал: *«Когда я писал свою первую работу по теории прогнозирования, я не предполагал, что некоторые из основных математических идей этой статьи уже опубликованы до меня. Но вскоре я обнаружил, что незадолго до Второй мировой войны советский математик Колмогоров напечатал в Докладах Французской академии наук небольшую, но очень важную заметку, посвященную этой же теме. В своей работе Колмогоров ограничился изучением дискретных последовательностей, в то время как я изучал случай непрерывного времени. Колмогоров ничего не говорил о фильтрах и вообще не касался вопросов, имеющих хоть какое-нибудь отношение к электротехнике».*

Таким образом, авторами основных положений, образующих фундамент современной теории и практики связи, являются два выдающихся ученых — академик А.Н. Колмогоров и Н. Винер.

В 1942 г., работая в военной лаборатории МТИ, Винер провел исследование прохождения случайного сигнала через нелинейное устройство. Эта работа была, по-видимому, одной из первых, в которой статистические методы применялись к проблемам приема сигналов. К крупным научным заслугам Винера следует отнести применение статистических методов к вопросам теории связи и их популяризацию. Сегодня эти методы получили повсеместное распространение.

У каждого создателя имеются как предшественники, так и последователи. К своим предшественникам Винер относил американского физика Уилларда Гиббса, заложившего математический фундамент статистической механики. Еще великий Ньютон, говоря о преемственности научных идей, как-то заметил: *«Если я видел дальше, чем другие, то потому, что стоял на плечах гигантов».*

В последующие годы теория оптимальной линейной фильтрации Винера–Колмогорова получила дальнейшее развитие. Советский ученый А.М. Яглом провел по совету А.Н. Колмогорова исследование идей работы своего учителя, опубликованной в Докладах Французской академии наук в 1939 г. Результаты исследования были опубликованы в журнале «Успехи математических наук» в 1952 г. В статье «Введение в теорию стационарных случайных функций» приведены формулы, позволяющие определить характеристики оптимальных линейных фильтров, экстраполяторов или интерполяторов принимаемых случайных сигналов, а также выражения для ошибки фильтрации, экстраполяции или интерполяции этих сигналов.

Профессор Ю.В. Ли — ученик Винера, бывший в 30-х гг. аспирантом МТИ, откликнулся на предложения своего учителя и в 1960 г. написал книгу «Статистическая теория связи», в которой винеровская теория оптимальной линейной фильтрации была представлена в доступной для инженеров форме. Винер питал большой интерес к прикладным исследованиям и привлек своего аспиранта к решению практических задач. В книге изложены разработанные этими учеными методы синтеза оптимальных линейных систем средствами ортогональных функций. На основе этих методов они в начале 30-х гг. изобрели и получили патенты, в которых воплотились математические идеи Винера о применении ортогональных функций Лагерра к проектированию электрических фильтров.

В 1958 г. Винер в совместной работе с американским ученым П. Массани обобщил свою теорию на многомерный случай, когда несколько линейных комбинаций N -сигналов передаются по M -каналам связи, в каждом из которых действуют шумы. Многомерная обработка нескольких сигналов связана с их приемом в телевизионных и сейсмических системах, может иметь место в задачах, в системах комплексной обработки навигационных сигналов и во многих других. В 1960 г. в этой области важные результаты получили американские ученые Е. Вонг и Дж. Томас.

Следует отметить, что независимо от Винера методы оптимизации характеристик фильтров в приемных устройствах радиолокационных систем по критерию максимума отношения сигнал/шум на выходе были разработаны в середине 40-х гг. американскими учеными Д. Норсом (1943 г.), Ван Флеком, Д. Миддлтоном (1944 г.) и членом-корреспондентом Академии наук СССР В.И. Сифоровым (1946 г.).

Теория оптимальной линейной фильтрации послужила основой для теории оптимального приема сигналов с разными видами модуляции (амплитудной, частотной, импульсной).

Научным достижением Винера является введение (практически одновременно с другим крупнейшим ученым Клодом Шенноном) понятия количества информации, которое совершило радикальный переворот в области связи. Это понятие и ряд других результатов по теории информации приведены в третьей главе его книги «Кибернетика». Независимо от Шеннона Винер вывел знаменитую формулу, определяющую пропускную способность канала связи:

$$C = F \ln(1 + P_s/P_n),$$

где F — полоса частот канала связи, P_s и P_n — мощности полезного сигнала и шума.

Винер был знаком с Шенноном с начала 30-х гг., когда Шеннон был студентом на математической кафедре МТИ. Он высоко оценивал научные достижения Шеннона, считая его одним из крупнейших ученых XX в. В книге «Я — математик» Винер, вспоминая свое знакомство с Шенноном, писал: «...пути, по которым мы шли в науке, если и не совпадали полностью, то, во всяком случае, пролегли очень близко, и наши научные связи значительно расширились и углубились».

Следует отметить, что открытие основ теории информации Винер разделяет с Шенноном, однако последний внес в ее развитие решающий вклад. В фундаментальной работе Шеннона «Математическая теория связи» (которая, как и книга Винера «Кибернетика», была опубликована в 1948 г.), а также в других его работах были установлены основные количественные зависимости предельной помехоустойчивости передачи информации от пропускной способности канала связи, скорости передачи информации и длины используемого кода, а также определены предельные возможности устранения избыточности из передаваемых сообщений.

Весьма важным для теории связи является разработанный Винером в 1958 г. метод анализа нелинейных систем, на входе которых действует случайный сигнал. Этот метод Винер изложил в курсе лекций для избранной группы аспирантов — электротехников МТИ. Метод Винера позволяет решать одну из самых сложных и важных для практики задач теории связи — определять энергетический спектр сигнала на выходе устройства, если известны характеристики нелинейного устройства и статистические характеристики сигнала, поступающего на его вход. Подобная задача является типичной для устройств разного назначения, в которых обрабатываются сигналы. Уже многие десятиле-

тия параметры линейных устройств инженеры определяют, подавая на их вход гармонические сигналы. Однако последние не могут быть использованы для идентификации нелинейных устройств. Метод Винера позволяет также осуществлять идентификацию нелинейных устройств, подавая на их вход случайные сигналы.

Заключение

Норберт Винер был человеком яркой индивидуальности, который внес значительный вклад в прогресс науки и мировоззрения людей XX столетия.

Он полагал, что ученый должен быть чрезвычайно требовательным, в первую очередь к себе, но он сможет прийти к важным научным результатам, только будучи внутренне свободным человеком: *«...ученые не должны быть одним из винтиков современной научной фабрики... быть из-за “духа времени” интеллектуальными лакеями или табельщиками, отмечающими время прихода и ухода с работы... Ученому необходимы контакты с людьми, обладающими ярко выраженной индивидуальностью. Он должен быть в курсе того, что происходит вокруг, иначе его работа не даст настоящих результатов. Он должен жить в мире, где занятия наукой обеспечивают возможность существовать, где есть товарищи, беседуя с которыми можно совершенствовать свои способности».*

Винер считал, что к науке нельзя подходить с утилитарных позиций. В своей книге «Я — математик» он писал: *«Научные традиции, как рожи секвойи, могут существовать тысячи лет; древесина, которую мы потребляем сейчас, — результат вложений, сделанных солнцем и дождем много веков тому назад. Прибыль от этих вложений налично... Некоторые научные идеи, возникшие еще во времена Лейбница, то есть около 250 лет тому назад, только сейчас нашли применение в промышленности».*

Винер оптимистически смотрел на будущее кибернетики. В интервью, данном «Литературной газете» во время посещения СССР в 1960 г., он утверждал: *«Кибернетика — наука, находящаяся в самом начале своего становления. Она найдет самые различные применения в нашей жизни, причем такие, о которых мы сегодня даже не подозреваем».* Вместе с тем он считал, что ученый несет моральную ответственность за те последствия, к которым может привести применение выдвинутых им идей. Он предвидел широкое внедрение кибернетики и вычислительной техники и подчеркивал социальную опасность, связанную со злоупотреблением их могущественными силами: *«Первая промышленная революция была обесцениванием человеческих рук вследствие конкуренции машин... Современная промышленная революция должна обесценить человеческий мозг, по крайней мере, в его наиболее простых и рутинных функциях. Средний человек со средними или еще меньшими способностями не сможет предложить для продажи ничего, за что стоило бы платить деньги».*

Выход один — построить общество, основанное на человеческих ценностях, отличных от купли-продажи. Для строительства такого общества потребуются большая подготовка и большая борьба, которая при благоприятных обстоятельствах может вестись в идейной плоскости, а в противоположном случае — кто знает как».

У каждого человека в распоряжении только одна жизнь и эта жизнь должна быть наполнена трудом и творчеством, или, если использовать приведенные в эпиграфе к данной статье слова Анны Ахматовой, жизнь каждого человека должна быть непрерывной молитвой. Такой была жизнь Норберта Винера.

Эндрю ВИТЕРБИ

То, что сегодня наука, — завтра техника.
Эдвард Теллер

Введение

Эндрю Витерби — один из крупнейших инженеров в области телекоммуникаций и одновременно видный ученый в области теории связи. Его активная деятельность как инженера и ученого началась в 1957 г.

К этому времени В.А. Котельниковым, А.Н. Колмогоровым, С.О. Райсом, Д. Миддлтоном, Н. Винером и К. Шенноном уже были получены фундаментальные результаты в области теории связи:

- разработаны основы теории информации (К. Шеннон, Н. Винер);
- заложены основы теории оптимального приема сигналов в присутствии помех (В.А. Котельников, Д. Миддлтон);
- создана теория оптимальной линейной фильтрации сигналов (А.Н. Колмогоров, Н. Винер);
- создан математический аппарат, позволяющий анализировать влияние случайных шумов на прием полезных сигналов (С. Райс, Д. Миддлтон, В.И. Бунимович);
- разработан ряд конструкций кодов, корректирующих ошибки (Р.В. Хэмминг, П. Элайс, Д. Слепян и др.).

Теория указывала на огромные возможности совершенствования систем связи, основанные на обработке сигналов, передаваемых по каналам связи (кодирование), и использовании оптимальных алгоритмов обработки принимаемого сигнала и шума на приеме. Внедрение научных достижений в технику связи сдерживалось недостаточно развитой технологией производства оборудования, поскольку обработка сигналов на передаче и приеме требовала весьма большого числа операций.

Новые научные результаты образовывали тот интеллектуальный арсенал, который постепенно осваивали молодые инженеры, оканчивающие высшие школы. Это требовало хорошей математической подготовки и больших усилий. Результаты открывали перед учеными и инженерами удивительные перспективы развития теории связи и выполнения оригинальных разработок нового оборудования.

Витерби оказался одним из тех, кому удалось внедрить в технику связи многие из идей, которые были выдвинуты его предшественниками. В нем соединились талант ученого, педагога и инженера. Им были предложены оригинальные и весьма плодотворные научные идеи в области теории связи. С его именем связано внедрение но-



вых научных результатов в важнейшие разработки систем, предоставляющих услуги связи миллионам людей. Он прекрасно владел теорией и многие годы преподавал в крупнейших университетах США — в Калифорнийском университете (КУ) в Лос-Анджелесе, в Массачусетском технологическом институте, в Южнокалифорнийском (ЮКУ) и Мичиганском университетах и др. Кроме того, он один из крупнейших бизнесменов современности, организаторов производства и основателей солидных телекоммуникационных компаний Linkabit и Qualcomm.

Биографический очерк

Эндрю Витерби родился в Италии 17 февраля 1935 г. в еврейской семье. В 30-х гг. к власти в Италии пришли фашисты во главе с Муссолини и были приняты расистские законы. Из-за нарастающего в стране антисемитизма его отец, врач по профессии, был вынужден в 1939 г. эмигрировать в США. Два года семья Витерби жила в Нью-Йорке, а в 1941 г. переехала в Бостон. Витерби учился в одной из старейших школ США — средней латинской школе, основанной еще в 1635 г. Он закончил ее в 1952 г.

Еще в школьные годы Витерби мечтал поступить в Массачусетский технологический институт (МТИ). Он поступил в него и успешно окончил в 1957 г., получив степень бакалавра и магистра.

Сразу после окончания МТИ он начинает работать в лаборатории реактивных двигателей (Jet Propulsion Laboratory — JPL). В 1957—1963 гг. в исследовательском секторе он занимается разработкой систем телеметрии, проектированием следящих систем и, в частности, систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). С самого начала своей деятельности в JPL он принимает участие в программе по созданию одного из первых в мире спутников связи «Эксплорер-1». Большое влияние на его инженерную карьеру оказало то, что в JPL он приобрел опыт разработки радиосистем, в которых используется технология расширения спектра, применявшаяся, в частности, в системах инерциального наведения ракет.

В начале 60-х гг. семья Витерби переезжает на западное побережье США. Он начинает преподавать в КУ и занимается проблемами цифровой связи. В 1960—1962 гг. пишет докторскую диссертацию, выполняет первые теоретические работы в этом направлении. Диссертацию он успешно защитил в 1962 г. в ЮКУ. После защиты с 1963 г. продолжал преподавать в КУ, совмещая научную и преподавательскую деятельность с консультационной. В качестве консультанта он продолжал работать в компании JPL, а также в таких крупных компаниях, как «Хьюз» и «Локхид», консультируя их по проблемам, связанным с созданием систем связи.

Работает Э. Витерби много и плодотворно и в 1966 г. выпускает свою первую книгу «Принципы когерентной связи». Она базировалась на лекциях, которые он читал в различных университетах США. Книга Витерби получила мировое признание. В 1970 г. в СССР вышел ее русский перевод под редакцией профессора Б.Р. Левина.

Одной из сложнейших проблем теории связи, имеющих важное практическое значение, является проблема создания достаточно простых в реализации алгоритмов декодирования кодов, исправляющих ошибки. Эта проблема привлекла внимание

Витерби, и в 1966 г. он разрабатывает весьма эффективный алгоритм декодирования сверточных кодов, который сегодня носит его имя. Алгоритм Витерби в апреле 1967 г. был опубликован в журнале *IEEE Transaction of Communication Technology* и сразу же привлек внимание ученых.

В 1968 г. начинается новый этап биографии Витерби. Вместе со своими коллегами по КУ — крупным американским ученым профессором Ирвином Джекобсом и Леном Клейнроком он создает консалтинговую компанию Linkabit, которая заняла прочные позиции на телекоммуникационном рынке США. В этой компании под руководством Витерби и Джекобса были выполнены многие важные исследования и разработки в области связи для нужд Министерства обороны США. Компания Linkabit сотрудничала с рядом крупных американских компаний, производящих оборудование связи для армии США, и, в частности, с одной из крупнейших правительственных компаний M/A-COM, занимающейся производством систем спутниковой и авиационной связи. В начале 80-х гг. Linkabit стала достаточно крупной компанией, имела годовой доход 25 млн долл. и в ней работало 1400 человек. В середине 80-х гг. она была приобретена компанией M/A-COM.

Работая вице-президентом, а позже президентом компании Linkabit, Витерби до 1973 г. не прекращал преподавательской и исследовательской работы в качестве профессора в школе инженерных и прикладных наук в КУ. В 1973 г. вышла его вторая книга «Принципы цифровой связи и кодирования», написанная совместно с коллегой по университету — известным американским ученым профессором Джимом Омурой. В основу ее были положены учебные курсы, которые читались авторами в КУ и ЮКУ. Эта книга также получила международное признание и в 1982 г. была издана на русском языке под редакцией профессора К.Ш. Зигангирова.

После продажи компании Linkabit Витерби и Джекобс весной 1985 г. организовали новую телекоммуникационную компанию Qualcomm. Сначала в ней работало всего семь инженеров и один секретарь. Высокий научный потенциал и коммерческий опыт ее основателей обеспечили быстрое развитие компании, и на сегодня в ней работают более 8000 специалистов. Это одна из крупнейших телекоммуникационных компаний мира, производящих широкий спектр самого современного оборудования.

Витерби был главным инженером компании. В ней был разработан целый ряд систем связи с кодовым уплотнением каналов (CDMA) на основе технологии расширения спектра. Из наиболее известных достижений Qualcomm отметим систему сотовой подвижной связи, которая получила широкое распространение во многих странах.

В 1995 г. Витерби выпускает свою третью книгу «CDMA — Principles of spread spectrum communication» (Reading, MA; Addison — Wesley) — «CDMA — принципы построения систем связи с расширением спектра», в которой изложены основные положения теории систем CDMA. В книге впервые были представлены многочисленные свойства технологии CDMA, которая ранее применялась исключительно в военных системах, а в последнее десятилетие XX в. начала широко использоваться в коммерческих радиосистемах.

17 февраля 2000 г. Витерби исполнилось 65 лет, и он принял решение выйти на пенсию. Однако он остался членом совета директоров компании Qualcomm и на общественных началах продолжал участвовать в деятельности различных правитель-

ственных, академических и инвестиционных организаций. Он, заслуженный профессор ЮКУ, продолжал преподавать на факультете, готовящем инженеров-электриков и специалистов компьютерной техники.

Жена Витерби Аудри, математик по профессии, оказывала ему постоянную помощь и поддержку в его научной деятельности, являясь первым читателем и критиком его статей и книг, содействуя четкому изложению содержащихся в них идей.

Выдающийся ученый и инженер современности Эндрю Витерби получил международное признание. В 1978 г. он был избран членом Национальной инженерной академии, а в 1996 г. — членом Национальной академии наук США. Он — почетный доктор ряда университетов Франции, Италии, Израиля. За заслуги в развитии теории и техники связи он стал лауреатом Международной премии Общества Маркони. Институтом инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE) ему были присуждены премии имени Александра Грэхема Белла и Клода Шеннона, а в Германии — премия имени Эдуарда Рейна. Крупнейшая японская телекоммуникационная компания NEC также отметила его премией. Кроме того, Национальная академия наук США наградила его почетной медалью Христофора Колумба.

Разработки новых систем связи и научные исследования

Сфера инженерной и научной деятельности Витерби необычайно широка и охватывает многие направления современной техники связи. Его научная, педагогическая и инженерная деятельность тесно переплетены. Важной чертой творчества Э. Витерби является то, что результаты его весьма глубоких научных исследований, внесших существенный вклад в теорию связи, всегда были направлены на решение конкретных инженерных проблем. Полученные им результаты сразу же находили практическое применение в новых системах связи, создаваемых под его руководством и с его участием. За полвека было выполнено много новых разработок, которые получили широкое распространение во всем мире.

Как уже упоминалось выше, первый период его деятельности как инженера начался в JPL, куда он попал сразу же после окончания МТИ и принял деятельное участие в разработке следящих систем управления ракетами и спутниками связи, важным элементом которых была система ФАПЧ. Он осуществлял руководство разработкой систем телеметрии и следящих систем управления ракетами в авиации, морских и сухопутных войсках, в которых применялась технология CDMA. Одним из преимуществ этой технологии является то, что системы с расширением спектра способны эффективно подавлять преднамеренные и непреднамеренные помехи, обусловленные действием других радиосредств, работающих в том же частотном канале.

Начиная с 1960 г. в центре интересов Витерби оказываются научные исследования в области помехоустойчивости аналоговых и цифровых систем связи. Он изучает теорию кодирования и цифровых систем связи, пишет и успешно защищает в ЮКУ докторскую диссертацию. Но и в этот период он не прекращает инженерной деятельности, консультируя фирмы, разрабатывающие системы телеметрии и радиосвязи.

В период до середины 60-х гг. Витерби исследует динамику процессов слежения за фазой и процессов захвата принимаемого сигнала в системах ФАПЧ в отсутствие шума, а также весьма сложные вопросы статистической динамики этих систем, работающих в присутствии на их входе, помимо полезного сигнала, аддитивного гауссовского шума.

В 60-е гг. в спутниковых системах связи широко использовалась частотная модуляция (ЧМ). Важным элементом приемников ЧМ-сигналов были следящие демодуляторы, в качестве которых часто использовались системы ФАПЧ. Витерби принадлежат первоклассные теоретические исследования вопросов выбора оптимальных фильтров в цепи обратной связи таких систем, определения их пороговых характеристик (зависимости $\rho_0 = f(\rho)$ — отношения сигнал/шум на выходе демодулятора от отношения сигнал/шум на его входе при небольших значениях ρ). Результаты имели большое практическое значение и использовались для проектирования следящих демодуляторов в спутниковых системах связи.

В этот же период Витерби выполняет исследования помехоустойчивости приема двоичных сигналов в каналах связи, в которых имеют место флуктуации фазы опорного генератора, используемого для синхронного детектирования принимаемых сигналов. Он исследует прием многопозиционных сигналов и публикует результаты по помехоустойчивости приема аналоговых сигналов в цифровых системах связи.

Научные результаты, полученные Витерби в этот период, развивают и дополняют те, которые были получены другими учеными — В.А. Котельниковым, В.И. Тихоновым, Г. Ван Трисом, К.В. Хелстромом и др. Эти результаты Витерби вошли в его первую книгу.

Труднопреодолимым препятствием в применении корректирующих кодов в системах связи в 60-е гг. была значительная сложность декодеров. В 1966 г. начался второй период деятельности Витерби. Он находит и теоретически исследует новый, весьма эффективный алгоритм декодирования сверточных кодов, который вскоре нашел широкое применение при создании различных систем связи. В отличие от разработанных ранее, он позволял достичь максимально возможной помехоустойчивости декодирования и обеспечить достаточно простую реализацию декодера. Это стимулировало появление многочисленных работ по созданию простых в реализации декодеров, в которых обеспечивается прием сообщений по методу максимума правдоподобия.

Следует, однако, отметить, что в 1967 г., когда был опубликован алгоритм Витерби, еще никто не думал о возможности его практической реализации. По оценке самого Витерби, для этого потребуются тысячи регистров. Всего через год его коллега Дж. Хеллер доказал, что нужны всего 64 регистра. В те годы устройство с таким числом регистров должно было представлять собой большую стойку. Прогресс в области микроэлектроники продолжал идти быстро, и сейчас для реализации алгоритма Витерби требуется только небольшая микросхема.

Инженерная интуиция Витерби позволила ему на ранней стадии оценить перспективность внедрения разработанного им алгоритма в системах связи разного назначения. Компания Linkabit в 1965 г. заключила свой первый контракт с Электронной лабораторией военно-морского флота в Сан-Диего на разработку устройства помехоустойчивого кодирования для систем связи морского флота. Позже аналогичное устройство разрабатывалось для Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США (НАСА). В 1969 г. для НАСА был разра-

ботан действующий макет кодера-декодера Витерби, а в 1970 г. — программное обеспечение. В том же году был разработан модем на скорость 1200 бит/с для системы коротковолновой связи, в котором для передачи сообщений применялись широкополосные сигналы. В 1973 г. в компании была изготовлена первая микросхема — сигнальный процессор, реализующий алгоритм Витерби.

После публикации работы Витерби появились многочисленные исследования, направленные на нахождение эффективных сверточных кодов, определение достижимой помехоустойчивости их приема и оптимизации параметров. На основании алгоритма Витерби различные компании стали производить декодеры сверточных кодов для систем передачи информации со скоростью передачи от единиц килобит в секунду до сотен мегабит в секунду. В течение многих лет в спутниковых цифровых системах связи, в частности в геостационарных системах, использовались преимущественно сверточные коды с декодером Витерби. Применение сверточного кода с длиной кодового ограничения $K = 7$ и со скоростью $1/2$ (эта скорость показывает, какую часть цифрового потока, передаваемого по каналу связи, составляет информационный поток) позволяет на 5 дБ (в три раза) снизить мощность расположенного на спутнике связи передатчика, которая необходима для приема сигналов с высоким качеством. Это дает возможность, в частности, существенно сократить размеры передающей или приемной антенн в системе спутниковой связи и повысить ее экономическую эффективность.

В последние годы в спутниковой связи (в системах непосредственного спутникового вещания и в системах с приемными антеннами с малой апертурой — в системах VSAT) использование сверточных кодов, декодируемых с помощью алгоритма Витерби, дополняется применением кодов Рида—Соломона. Два метода кодирования используются совместно в каскадных кодах. Обычно на первом этапе информация кодируется с помощью кода Рида—Соломона, а затем применяется сверточное кодирование. На приеме первый этап декодирования основан на применении декодера Витерби, а затем используется декодер Рида—Соломона.

Компания Linkabit разрабатывала оборудование для коррекции ошибок в каналах связи для правительства, цифровые модемы спутниковой связи, реализованные на микропроцессорах, командные линии связи для управления бомбардировщиками военно-воздушных сил США и другое радиотехническое оборудование.

В 1972 г. крупный американский ученый Д. Форни опубликовал в 3-м номере журнала IEEE Transaction on Information Theory результаты исследования, которое показало возможность использования алгоритма Витерби для подавления межсимвольной интерференции в каналах связи. Это научное направление также получило существенное развитие. На основе таких исследований многими фирмами были созданы соответствующие устройства — эквалайзеры, позволяющие подавлять межсимвольную интерференцию в высокоскоростных каналах связи, в которых временные задержки приходящих в место приема сигналов могут охватывать до нескольких десятков символов.

Опыт разработки цифровых систем связи, который был накоплен в компании Linkabit, нашел отражение во второй книге Витерби «Принципы цифровой связи и кодирования», написанной им в 1973 г. вместе с коллегой по университету известным американским ученым профессором КУ Джимом Омурой. В этой книге были рас-

смотрены многие практические вопросы применения в системах связи блочных и сверточных кодов, включая создание простых декодеров, ряд вопросов теории кодирования источников информации — теории преобразования аналоговых сигналов в цифровой поток с наименьшей погрешностью.

В 1980 г. в компании Linkabit были начаты работы по созданию систем спутниковой связи, оснащенных приемными антеннами с малой апертурой (системы VSAT). Создание таких систем дало большой коммерческий эффект, и они получили широкое распространение во всем мире. В этих системах была применена технология передачи и приема сообщений, которая ранее использовалась только в военных спутниковых системах. Развертывание работ в этом направлении имеет любопытную историю. В середине 70-х гг. одна из крупнейших американских телекоммуникационных компаний — AT&T заключила контракт с шахом Ирана по созданию телекоммуникационной инфраструктуры страны. Предполагалось, что будут в основном использованы системы спутниковой связи. Вследствие произошедшей в Иране в марте 1979 г. революции компания AT&T собиралась свернуть начатые работы. Витерби предложил менеджеру компании завершить ее. Это предложение было принято, и в начале 80-х гг. в компании Linkabit началась разработка оборудования, явившегося прототипом систем VSAT, и компания приступила к реализации еще одного коммерческого проекта — создания устройства для скремблирования телевизионного сигнала, что весьма важно для систем непосредственного спутникового телевизионного вещания. Вначале было разработано специальное устройство засекречивания ТВ-сигнала по заказу компании M/A-COM, которое осуществляло его полное преобразование в цифровую форму. Однако это устройство оказалось весьма сложным и стоило несколько тысяч долларов США, что для массового пользователя неприемлемо. Более простое устройство, основанное на случайном изменении полярности ТВ-сигнала каждой строки, стоимость которого составляла всего несколько сот долларов, было разработано позднее. Для этого была создана специальная интегральная схема — сигнальный процессор. Устройства скремблирования ТВ-сигналов получили широкое распространение и применяются в системах непосредственного спутникового ТВ-вещания, обслуживающих миллионы абонентов.

Третий период деятельности Витерби начался весной 1985 г., когда он вместе с Джекобсом основали компанию Qualcomm. Вначале компания имела всего несколько правительственных заказов на разработку систем связи для сухопутных, военно-морских и военно-воздушных сил. Это были системы телеметрии и системы двусторонней связи для самолетов, танков и других подвижных платформ.

Позже в компании разрабатывался ряд научных программ, в которых рассматривались возможности создания спутниковых военных систем связи на основе использования множества спутников, расположенных на низких орбитах. Заказчик этих работ — компания Ford Aerospace отказалась от этих проектов, предпочтя создание геостационарных спутниковых систем связи. Однако идеи, выдвинутые специалистами компании Qualcomm, позже нашли применение при создании глобальных систем подвижной связи. Эти проекты явились, в частности, прототипом глобальных спутниковых систем подвижной связи Iridium и Globalstar.

Глобальная сеть спутниковой подвижной связи Globalstar, состоящая из 48 спутников, создана и осуществляет связь с существующими наземными телекоммуникационными системами. В ней используется цифровая технология CDMA. Она позво-

ляет своим мобильным и стационарным пользователям обмениваться телефонными сообщениями, отправлять и получать факсы из любой точки мира. Компания Qualcomm являлась разработчиком и производителем наземных Центров управления, шлюзов и пользовательских терминалов для системы Globalstar. Э. Витерби — один из основателей компании Globalstar.

На основе разработок начала 90-х гг. компания Qualcomm создала спутниковую систему OmniTRACS для управления грузовым транспортом. Эта система в настоящее время используется коммерческими грузовыми флотилиями и транспортными компаниями и предоставляет услуги по передаче данных, определению местоположения транспортных средств и управлению информацией для заказчиков в 33 странах. В системе OmniTRACS действуют более 300 000 терминалов и обрабатывается свыше одного миллиарда входящих сообщений в год.

Компании Linkabit и Qualcomm приобрели солидный опыт по созданию разнообразных систем связи на основе технологии CDMA. Один из сотрудников компании Клейн Гилхаузен предложил использовать эту технологию для создания системы сотовой подвижной связи. В 1982 г. Витерби выступил на семинаре IEEE с докладом «Перспективы создания сотовых систем подвижной связи на основе технологии расширения спектра». Эта статья не вызвала интереса у научной общественности. Однако Витерби и его коллеги Клейн Гилхаузен, Ирвин Джекобс и Батч Уивер продолжали прорабатывать практическую реализацию этой идеи. Одна из важнейших проблем — создание высокоточной системы автоматической регулировки мощности сигналов, принимаемых приемником базовой станции, — была ими вскоре успешно решена. Следует отметить, что к идее использования технологии CDMA для создания сотовых систем связи в этом же году пришел отечественный ученый профессор Л.Е. Варакин. Его теоретические исследования были изложены в статье, опубликованной в журнале «Электросвязь» (1982. № 12).

В 1989 г. разработка компанией Qualcomm системы CDMA для сотовой связи была завершена и успешно прошла испытания в Сан-Диего. В 1993 г. Американской ассоциацией промышленности электросвязи был принят стандарт IS-95 на эту систему. Началось ее активное внедрение не только в США, но и во многих других странах. В настоящее время сотовые сети, использующие технологию CDMA, обслуживают более 100 млн абонентов. На основе этой технологии компанией Qualcomm была разработана новая система сотовой подвижной связи третьего поколения CDMA 2000, в которой обеспечивается высокоскоростная передача данных (со скоростью до 2 Мбит/с), позволяющая предоставлять абонентам широкий перечень мультимедийных услуг связи, в том числе услуги мобильного Интернета.

Компания Qualcomm является одной из крупнейших в мире компаний, производящих современное цифровое радиооборудование, основанное на технологии CDMA. Это оборудование сотовой связи в диапазонах 800 и 2000 МГц, оборудование стационарных беспроводных сетей связи, систем цифрового спутникового вещания, систем VSAT, радарных систем и др.

В 1995 г. Витерби выпускает свою третью книгу «CDMA — принципы построения систем связи с расширением спектра». Важным достоинством технологии CDMA является то, что ее применение позволяет существенно повысить эффективность использования радиочастотного спектра. При заданной полосе частот, выделенной для

работы системы, в ней можно обслужить гораздо большее число абонентов, чем в традиционных системах с частотным или временным разделением каналов. Другие преимущества этой технологии — возможность работы в условиях сильной многолучевости. Они характерны для сотовых систем связи. Кроме того, в системах с CDMA возможен мягкий хэндоф с использованием нескольких соседних базовых станций, а также повышение чувствительности приема сигналов и др. В книге рассмотрены вопросы генерации сигналов CDMA, синхронизации, модуляции и применения кодов, корректирующих ошибки. Рассмотрены также сетевые вопросы создания сотовой связи на основе этой технологии.

Заключение

Конец 40-х гг. — важная веха в истории развития телекоммуникаций. В эти годы получены многие фундаментальные результаты теории связи и открыт транзисторный эффект. Это создало предпосылки для развития современной технологии производства радиоэлектронного оборудования. В течение нескольких десятилетий полученные в ходе исследований результаты развивались и углублялись многими учеными. В 70-х гг. XX столетия накопленный уровень знаний создал предпосылки для быстрого прогресса в области телекоммуникаций, который, в свою очередь, привел к бурному развитию экономики и культуры во многих странах мира. Это показывает, сколь большую роль играют фундаментальные исследования, не ставящие своей целью быстрое достижение практических результатов, но играющие роль мощного катализатора, ускоряющего прогресс человечества.

Эндрю Витерби принадлежит к категории разносторонне одаренных людей. Его жизнь и деятельность соответствуют тому девизу, который звучит в притче Соломона:

*Главное — мудрость: приобретай мудрость
и всем умением твоим приобретай разум.
Высоко цени ее, и она возвысит тебя.*

Прекрасно разбираясь в теории связи, зная возможности современной технологии производства радиоэлектронного оборудования, Витерби ясно видел перспективные направления разработок новых систем. Благодаря этому в компаниях, которые были организованы при его активном участии, разрабатывалась наиболее совершенная техника связи, реализующая те возможности, на которые указывала теория. Эта техника нашла широкое применение во всем мире.

Роланд Львович ДОБРУШИН

Величайшая тайна жизни скрыта в том, что удовлетворение получает лишь дающий и жертвующий, а не требующий и поглощающий... И всякое творчество есть любовь, и всякая любовь есть творчество.

Николай Бердяев



Введение

В XX в. колоссальное развитие получила технология изготовления электронного оборудования, основанная на применении полупроводников и интегральных схем. Новая технология дала возможность реализации практически любых самых сложных алгоритмов обработки сигналов, и это оказало значительное влияние на развитие связи. Однако совершенствование средств связи зависит не только от достигнутого уровня технологии. Может быть, в первую очередь оно определяется идеологией построения оптимальных систем, основные положения которой разработаны в теории связи. Основы ее были заложены К. Шенноном, Н. Винером и В.А. Котельниковым.

Роланд Львович Добрушин — один из крупнейших математиков, разрабатывавших проблемы теории информации. Им были выполнены первоклассные математические исследования, строго обосновывающие важнейшие теоремы теории информации. Кроме того, им проведены важные исследования, обобщающие результаты Шеннона для широкого класса каналов связи, которые в работах Шеннона не рассматривались. Он был замечательным педагогом.

Автору этого очерка посчастливилось слушать лекции Р.Л. Добрушина в МГУ по проблемам последовательного декодирования, идеи которого выдвинули американские ученые Дж. М. Возенкрафт и Б. Рейффен. Р.Л. Добрушин одним из первых обратил внимание на эти идеи и начал их пропагандировать и разрабатывать. Его лекции были содержательны по существу и интересны с психологической точки зрения. Слушая Добрушина, можно было наблюдать редкий феномен — ученого, находящегося в «экстазе творчества». Добрушин был увлечен излагаемой темой и старался возможно глубже проникнуть в нее. Он как бы не замечал слушавшую его аудиторию и, разговаривая сам с собой, писал математические формулы, напряженно мысля при этом. Движение его мысли захватывало аудиторию и ощущалось физически.

Р.Л. Добрушин был прекрасным организатором. В своей лаборатории в Институте проблем передачи информации (ИППИ) Академии наук СССР он собрал творческий коллектив блестящих математиков, работы которых в области теории информации получили мировое признание.

Он относился, выражаясь словами Бердяева, приведенными в эпитафии, к людям «дающим и жертвующим». Один из его сотрудников Ю.Д. Апресян вспоминал: «Я ощутил масштаб личности Р.Л. Добрушина в деле, которое близко касалось меня, а потом и той лингвоматематической группы, которая сейчас известна под названием “Лаборатория компьютерной лингвистики” ИППИ. История эта началась в 1972 г., когда я не прошел очередной переаттестации в Институте русского языка АН СССР и стал искать работу. Роланд Львович был одним из первых, кто предложил мне помощь. По тому, как он это сделал, я понял, что имею дело с человеком, не довольствующимся простой галочкой для своего списка добрых дел. Пустые демонстрации его не интересовали. Он ясно формулировал цель и конечный результат и сразу начинал действовать. Его доброта была активной — она воплощалась не в сочувствии, а в деле. Он договорился со своим директором В.И. Сифоровым о моем переходе в его, Добрушина, лабораторию в ИППИ. Шаг нетривиальный, если учесть, что он приглашал в математическую лабораторию лингвиста, к тому же *persona non grata*, и что это решение ему пришлось бы отстаивать на бюрократических уровнях Академии наук».

Биографический очерк

Роланд Львович Добрушин родился 20 июля 1929 г. в Ленинграде. Отец его из еврейской семьи лесопромышленников. Семья отца была многочисленной (у него было много сестер и братьев) и дружной. В советские годы он работал в ленинградском порту инженером и занимался экспортом леса.

Мать происходила из протестантской немецкой семьи, в которой все говорили на немецком языке. До революции эта семья жила в Риге, а после присоединения Латвии к СССР переехала на Васильевский остров в Ленинград. Немецкое имя Роланд, которое Добрушин получил при рождении, свидетельствует о его немецких корнях. Он был крещен в протестантской вере, однако не был верующим человеком. Дед по линии матери был высококвалифицированным краснодеревщиком и делал модели кораблей флота. Некоторые из этих моделей выставлены в Морском музее в Санкт-Петербурге. Поскольку в годы Советской власти запись «латыш» в паспорте была опасной и могла повлечь за собой ссылку в Сибирь, мать была записана русской. Она была художницей, но в Академию художеств ее как дочь кустика не приняли.

Трагически сложилось детство Роланда. В возрасте шести лет он потерял отца, а вскоре после окончания Великой Отечественной войны от туберкулеза скончалась мать. В 16 лет он был усыновлен своим дядей — известным советским скульптором Иосифом Чайковым, одна из скульптур которого «Футболисты» в течение многих лет стояла перед Третьяковской галереей.

Еще в средней школе проявились недюжинные способности Добрушина к математике. В восьмом классе его школьный друг как-то затащил его на городскую математическую олимпиаду. Добрушин решил все предложенные задачи и занял первое место. С этого момента он осознал свое призвание и стал упорно заниматься математикой. В 1947 г. после окончания школы он поступил на механико-математический факультет МГУ, который закончил в 1952 г. Начиная с первого курса он посещал семинар по теории вероятностей известного российского математика Е.Б. Дынкина. Эта область в дальнейшем стала основной в его исследованиях.

На старших курсах Р.Л. Добрушин становится учеником крупнейшего математика XX в. академика А.Н. Колмогорова и ведет самостоятельные научные исследования в области марковских случайных процессов. Он проявляет исключительные способности, и благодаря авторитету и усилиям А.Н. Колмогорова сразу после окончания МГУ его оставляют в аспирантуре. Это было весьма не просто, так как 50-е годы — это годы борьбы с космополитизмом и общегосударственным антисемитизмом (евреев в МГУ не принимали даже в качестве студентов).

В 1955 г. Р.Л. Добрушин защитил кандидатскую диссертацию «Локальная предельная теорема для цепей Маркова». Он становится ассистентом на кафедре теории вероятностей, возглавляемой Колмогоровым, где и проработал до 1967 г. В университете одной из областей его научных интересов стала статистическая физика, и он вел научный семинар. В этом направлении он продолжал активно работать всю жизнь и получил ряд основополагающих результатов.

В середине 50-х гг. А.Н. Колмогоров на своей кафедре в МГУ разворачивает исследования в области теории информации. К этим исследованиям он привлекает своего ученика Р.Л. Добрушина, который в 1961 г. защищает докторскую диссертацию «Теория информации и кодирование».

В 1967 г. его пригласили заведовать лабораторией теории кодирования в ИППИ. Параллельно он вел семинар по статистической физике в МГУ, семинар по теории кодирования и читал курсы лекций по теории информации в Физико-техническом институте. Р.Л. Добрушин был блестящим педагогом. Его лекции были всегда глубоко продуманы и содержательны. У него было много учеников и последователей.

Отношения, которые складывались между властью и Р.Л. Добрушиным, являлись препятствием и для его научной карьеры и определялись тем, что в силу своей честности и неподкупности он не мог воспользоваться тем жизненным правилом, о котором еще 1000 лет тому назад писал Омар Хайям:

*С той горсточкой невежд,
Что нашим миром правят
И выше всех людей себя по званию ставят,
Не ссорься. Ведь того, кто не осел, тотчас
Они крамольником, еретиком ославят.*

В своей лаборатории Р.Л. Добрушин собрал замечательный коллектив математиков, активно работавших в данной области науки. В лаборатории был выполнен ряд весьма важных исследований прикладного характера. Результаты этих исследований были широко известны и публиковались не только в нашей стране, но и в ведущих научных журналах за рубежом. В течение многих лет Добрушин был заместителем главного редактора журнала «Проблемы передачи информации» и много сделал для того, чтобы этот журнал приобрел мировую известность. Он был редактором раздела теории информации в реферативном журнале. Им написано большинство статей на эту тему в пятитомной Математической энциклопедии. Он был членом редакционных коллегий ряда крупнейших иностранных журналов по теории вероятностей и статистической физике.

Р.Л. Добрушин был членом Московского математического общества, Международной ассоциации математической физики, почетным членом Американской академии наук и искусств, иностранным членом Национальной академии наук США, членом Akademia Evgorea. Из приведенного перечня видно, что научные заслуги Р.Л. Добрушина получили широкое признание за рубежом, но, к сожалению, не были в должной мере признаны в официальных кругах своей страны.

Р.Л. Добрушин был крупной личностью и пользовался мировой известностью. После его кончины появились некрологи в ряде отечественных и зарубежных изданий. Популярная английская газета «Independent» 29 ноября 1995 г. писала:

«Добрушин будет помниться не только как выдающийся математик, но и как неординарная фигура. Человек с сильным характером, он быстро стал одиозной фигурой для официальной советской системы. В 1959 г. на собрании механико-математического факультета МГУ он выступил против официальной точки зрения, после чего стал неудобным для местной партийной организации. Служебное продвижение стало невозможным, его даже не допустили к защите докторской диссертации в МГУ (в конце концов он защитил ее в Институте прикладной математики АН СССР). Тем не менее он продолжал открыто не повиноваться властям. В 60-х гг. он участвовал в подписании многих писем протеста, в которых осуждались политические судебные процессы и другие репрессии против растущего диссидентского движения. Он ушел с мехмата в 1965 г. — один из примеров того, как лучшие математики и физики вольно или невольно покидали МГУ из-за невозможности их дальнейшей там работы под возрастающим давлением партийной организации.

Добрушин стал заведующим лабораторией ИППИ АН СССР. Эта лаборатория стала Меккой для ученых, приезжающих со всего мира. Такие визиты позволяли поддерживать регулярный обмен идеями между учеными, разделенными “железным занавесом”. К неудовольствию властей контакты имели не только чисто математический характер: помогать диссидентам и отказникам было постоянной заботой Добрушина. И это несмотря на то, что он никогда формально не участвовал в диссидентских группах и не собирался покидать страну.

Тем не менее существовал один аспект профессиональной жизни Добрушина, который полностью контролировался властями: выборы в Академию наук. У него не было ни малейшего шанса быть избранным консервативным математическим отделением Академии отчасти в силу своей репутации диссидента, а также из-за его нерусского происхождения.

Другой аспект его жизни, также полностью контролируемый властями, был связан с возможностью выезжать из СССР. Невероятная популярность Добрушина, как профессиональная, так и личная, выражалась во множестве приглашений и премий. В 1982 г. он избирается почетным членом Американской академии наук и искусств, но не был выпущен на презентацию. И вплоть до 1988 г., несмотря на перестройку и гласность, он не получал разрешения на выезд в страны Запада. Он получил возможность выезжать только после того, как к этой проблеме было привлечено внимание самого М.С. Горбачева».

Роланд Львович Добрушин скончался в Москве 12 ноября 1995 г. В течение четырех лет после его кончины публиковались научные работы, которые он написал вместе со своими учениками и коллегами.

Научная деятельность в области теории связи

В научной деятельности Р.Л. Добрушина можно выделить три периода. Первые пять лет после окончания МГУ (1952–1957 гг.) он занимался исследованиями марковских случайных процессов. Эти исследования вошли в его кандидатскую диссертацию.

Начиная с 1958 г. основной областью его научных интересов становится теория информации. В этом направлении он активно работает вплоть до 1963 г. С 1964 г. центром его интересов становятся исследования проблем статистической физики, где ему удалось получить ряд важных результатов. Однако и после 1964 г. он выполняет ряд оригинальных работ по теории информации. Кроме того, в это время он обратился к проблемам теории сетей связи и для их решения применил методы статистической физики.

Основные теоремы теории информации были доказаны К. Шенноном. К сожалению, в СССР идеи этой теории были восприняты далеко не сразу. Конец 40-х — начало 50-х гг. характеризуется не только героическим трудом народов СССР по восстановлению разрушенного во время Великой Отечественной войны хозяйства, но и усилением «холодной войны» и репрессий внутри страны. Это годы лысенковщины, приведшей к разгрому отечественной научной школы генетики, и борьбы с «космополитизмом», когда любое внимание к идеям, исходящим из-за рубежа, расценивалось как низкопоклонство перед Западом и могло повлечь за собой жестокое наказание.

Идеи теории информации и кибернетики также первоначально были отнесены к вредным для советского человека и были отвергнуты отечественными учеными-философами как не соответствующие марксизму-ленинизму. Все это существенно затормозило развитие науки в нашей стране.

Однако крупнейшие отечественные ученые, такие как академики А.Н. Колмогоров, А.Я. Хинчин, А.И. Берг, А.А. Харкевич, ясно сознавали всю глубину и перспективность новых идей, родившихся на Западе. После смерти Сталина несколько ослабевает идеологический пресс в обществе. В середине 50-х гг. в СССР начинают разворачиваться исследования в области теории связи. Появляются переводы статей Шеннона и других западных ученых.

Академик А. Н. Колмогоров был, по-видимому, первым, кто обратил внимание на глубокий характер и важность для математики разработки проблем теории информации. Отечественная наука быстро осваивает это новое научное направление, и Колмогоров и Хинчин в эти годы публикуют важные математические работы по теории информации. А.Н. Колмогоров привлекает к исследованиям в данном направлении своих учеников в МГУ Р.Л. Добрушина и М.С. Пинскера. Этими учеными в скором времени были получены важнейшие математические результаты теории информации.

Теоремы кодирования, установленные Шенноном, обладавшим, по словам Колмогорова, изумительной математической интуицией, не были им доказаны строго. Кроме того, на практике при передаче информации используются разные виды каналов связи, которые Шеннон в своих основополагающих работах не рассматривал. Это каналы со случайно изменяющимися параметрами, к которым относятся, в частности, каналы с многолучевым распространением радиоволн. В таких каналах работают коротковолновые системы связи, а также системы, где используются эффекты рассеяния радиоволн в тропосфере, ионосфере и др. В работах Шеннона не рассматривались каналы с ошибками в синхронизации, каналы, статистические характеристики которых точно неизве-

стны, так же как неизвестны точно статистические характеристики передаваемых по каналу связи сигналов, широкополосные каналы связи, в которых одновременно осуществляется передача сообщений от нескольких источников информации.

Теория информации оказалась привлекательным полем деятельности для многих математиков, и Р.Л. Добрушин начал активно работать над ее проблемами. Вначале он сосредоточивается на выяснении того, при каких наиболее общих условиях относительно каналов связи и источников информации верна теорема Шеннона. В 1959 г. он ввел новое и очень важное для теории информации понятие «информационной устойчивости пар случайных величин» и установил, что информационная устойчивость последовательности передающих устройств, задающих канал, и последовательности сообщений является достаточным условием для доказательства теоремы кодирования Шеннона.

Р.Л. Добрушин дал важные обобщения теоремы Шеннона для случаев, когда статистические характеристики канала связи и передаваемого по каналу сообщения известны лишь частично. Он выполнил важные исследования каналов с ошибками в синхронизации, ввел понятие «пропускная способность» и доказал в 1967 г. для них теорему Шеннона. Вместе с Н.Д. Введенской в 1968 г. он исследовал важный класс таких каналов с выпадением символов и предложил для них приближенные методы вычисления пропускной способности.

В 1959–1960 гг. Р.Л. Добрушин исследовал ряд важнейших теоретико-информационных понятий и характеристик (энтропия, информация, энтальпия, пропускная способность). Он предложил простой и эффективный статистический метод оценки энтропии стационарной последовательности по наблюдениям.

Вместе с Я.И. Хургиным и Б.С. Цыбаковым он выполнил исследования пропускной способности многолучевых каналов с замираниями. В 1962 г. совместно с Б.С. Цыбаковым исследовал важный класс систем передачи информации, в которых, помимо шумов в каналах связи, действуют дополнительные шумы до кодирования сообщений и после их декодирования. Совместно с М.С. Пинскером получил простое доказательство результата американского математика Дж. Вольфовица: пропускная способность канала с памятью всегда не меньше пропускной способности соответствующего ему канала без памяти.

Р.Л. Добрушину принадлежит ряд глубоких исследований, относящихся к асимптотике логарифма вероятности ошибки декодирования для различных дискретных каналов без памяти в оптимально построенной системе связи. Эта функция зависит от скорости передачи информации и длины используемого кода. Он рассмотрел обычный симметричный двоичный канал, канал со стиранием и канал, в котором передача сообщений осуществляется с использованием обратной связи.

Важнейшей проблемой теории информации является поиск таких алгоритмов декодирования передаваемых по каналу связи сообщений, которые имели бы невысокую сложность декодирования, оцениваемую числом операций, необходимых для выделения полезного сообщения из принятого сигнала. Шенноном было показано, что почти любой случайно выбранный код с заданной избыточностью, определяемой пропускной способностью канала связи, является оптимальным с точки зрения помехоустойчивости приема. Однако сложность декодирования такого кода значительна и возрастает экспоненциально с ростом его длины.

Американские ученые Дж. М. Возенкрафт и Б. Рейффен в 1961 г. предложили алгоритм последовательного декодирования, который, по их предположению, позволял существенно уменьшить сложность декодирования сообщений. Р.Л. Добрушин исследовал этот алгоритм и показал, что в противоречии с гипотезой упомянутых ученых сложность предложенного ими метода декодирования растет по экспоненциальному закону с ростом продолжительности передачи. Он также показал, что при некоторых модификациях этого алгоритма сложность может быть существенно уменьшена таким образом, что она будет возрастать по степенному закону с увеличением длины кода. В дальнейшем усовершенствования и исследования алгоритма последовательного декодирования были выполнены в работах американских ученых Р.М. Фано, Ф. Джелинека и отечественного ученого К.Ш. Зигангирова — сотрудника ИППИ.

В 1972 и 1973 гг. совместно с С.И. Гельфандом и М.С. Пинскером Р.Л. Добрушин доказал существование «хороших» кодов, удовлетворяющих границе Варшавова–Гильберта (эта граница определяет минимальное расстояние между кодовыми комбинациями кода с заданной избыточностью), сложность декодирования которых возрастает линейно с ростом их длины.

Помимо разработки теории информации Р.Л. Добрушин с 1976 г. участвовал в разработке проблем теории коммуникационных сетей. Сети связи состоят из пространственно распределенных серверов (коммутиционных устройств), осуществляющих по тем или иным принципам маршрутизацию сообщений, передаваемых по сети связи, и соединяющих эти устройства каналов связи. Из экономических соображений пропускная способность этих каналов должна быть выбрана минимально необходимой, однако достаточной для того, чтобы вероятность потери передаваемого сообщения в сети была не выше заданной величины, определяющей качество обслуживания.

Задачи исследования сетей связи сложны. Для их решения Р.Л. Добрушин применил методы и подходы, выработанные в статистической физике. Он показал, что эти методы применимы к коммуникационным сетям, образованным большим числом обслуживающих устройств, которые обрабатывают случайные потоки сообщений. Его идеи, гипотезы, постановка тех или иных задач и рецепты их технического решения оказались чрезвычайно важными для многих исследователей, занимающихся системами связи. Подходы, предложенные Р.Л. Добрушиным, позволяли найти распределения вероятностей длин очередей, обслуживаемых серверами, входящими в сеть связи. Им, в частности, были изучены вероятности больших отклонений для этих распределений. Результаты позволяли определять вероятность потери сообщения, передаваемого по сети связи, — важнейшую характеристику качества обслуживания абонентов в сети.

Добрушин опубликовал несколько обзоров по теории информации в отечественных и зарубежных журналах, подводя итоги исследований в этой области, выполненных к 1961, 1966 и 1972 гг. Эти обзоры дают интересный материал по истории развития науки.

Заключение

В науке XX в. Р.Л. Добрушин оставил заметный след. Это не только выдвинутые им новые плодотворные идеи в области теории информации и теории связи, которые получили мировое признание. Его несомненной заслугой является создание в ИППИ

лаборатории, которая сегодня называется «Добрушинской математической лабораторией» и активно ведет научные исследования.

Р.Л. Добрушин был не только крупным и творчески одаренным ученым. Он был просветителем и оказал большое влияние на развитие исследований в области теории связи в нашей стране, постоянно уделяя внимание пропаганде и распространению идей теории информации, укреплению и расширению связей между отечественными и зарубежными учеными. Он был инициатором и редактором переводов на русский язык многих книг по теории связи. Они сыграли значительную роль в образовании отечественных ученых и инженеров, специализирующихся в области связи. Под его редакцией (вместе с О.Б. Лупановым) и с предисловием А.Н. Колмогорова в 1962 г. была издана книга «Работы по теории информации и кибернетике», включающая все опубликованные работы К. Шеннона. Под его редакцией на русском языке вышли замечательные книги американских ученых — В.Б. Давенпорта и В.Л. Рута «Введение в теорию случайных сигналов и шумов» (1960 г.), Р.М. Фано «Передача информации. Статистическая теория связи» (1965 г.), Дж. Возенкрафта и И. Джекобса «Теоретические основы техники связи» (1969 г.).

Ценность человека не только проявляется в уровне его интеллекта, но и связана с его моральными качествами. Р.Л. Добрушин был внутренне свободным человеком с мышлением, независимым от ограничений, налагаемых авторитетами и социальными предрассудками, а также от шаблонных ограничений и привычек вообще. Он обладал духовным аристократизмом не в смысле сознания своей привилегированности, а в смысле осознания своего служения. Он был личностью, строго придерживающейся высоких этических принципов. Он уважал человеческую свободу и не мог оставаться в стороне, когда эта свобода попиралась государством, уничтожившим тем самым творческий порыв, творческое горение. Именно поэтому он не мог не выступать в защиту студентов МГУ, проявивших свободомыслие, поэтому он был среди тех, кто решался выразить свое возмущение против преследования в СССР диссидентов. Он помогал устроиться на работу тем, кто из-за своих политических взглядов лишился возможности продолжать исследования в других советских научных институтах. Он поступал так, потому что не мог поступать иначе, хотя хорошо знал, что это вызовет неудовольствие властей и за этим может последовать преследование и его самого.

Патриот и демократ по убеждениям, Р.Л. Добрушин участвовал в том мощном подъеме демократического движения, которое наметилось в Академии наук в конце 80-х годов. Наряду с другими деятельными людьми он активно формировал это движение, полагая, что стране необходимы немедленные перемены во внутренней и внешней политике, которые сделают ее граждан свободными и приведут к быстрому прогрессу в науке и во всех других сферах жизни.

Литература

1. Роланд Львович Добрушин (к 70-летию со дня рождения). ИППИ. М.: Эдиториал УРСС, 1999.
2. Памяти Роланда Львовича Добрушина // Проблемы передачи информации. 1996. № 3.
3. Прелов В.В. Теория информации в Институте проблем передачи информации // Радиотехника. 1999. № 12.

Андрей Николаевич КОЛМОГОРОВ

*Человек, который никогда не пытался
сравниваться с богами, не вполне еще человек.*

Поль Валери

Введение

Еще Галилео Галилей заметил: *«Философия написана в величественной Книге, которая постоянно открыта у нас перед глазами (я имею в виду Вселенную), но которую невозможно понять, если не научиться предварительно ее языку и не узнать те письмена, которыми она начертана. Ее язык — язык математики».*

Это замечание сближает творчество ученого-математика и поэта. И тот, и другой творят Слово — язык, который позволяет запечатлеть и передать в будущее новые идеи, направляющие развитие нашей цивилизации.

Существующий математический язык подсказывает новые математические идеи, новые логические конструкции, которые дают другим людям инструмент для познания окружающего нас мира.

Знаменитый российский поэт Иосиф Бродский отмечал: *«Пишущий стихотворение, однако, пишет его не потому, что он рассчитывает на посмертную славу, хотя часто он надеется, что стихотворение его переживет, пусть ненадолго. Пишущий стихотворение пишет его потому, что язык подсказывает или просто диктует следующую строчку».* Так же и математику существующий математический язык подсказывает новые математические идеи, новые логические конструкции, которые дают другим людям инструмент для познания окружающего нас мира. Правда, чтобы услышать эту подсказку, «услышать (как было сказано другим знаменитым российским поэтом Борисом Пастернаком) будущего зов» удастся только избранным, тем, кого Господь награждает талантом и трудолюбием.

Андрей Николаевич Колмогоров — один из тех, кто в XX в. создал новые логические схемы — универсальные средства выражения идей, применимые во многих областях человеческой деятельности. Весьма символично, что по инициативе Колмогорова еще в 1956 г. в МГУ открылся первый в нашей стране семинар по математической лингвистике, а в 1959 г. на филологическом факультете было создано отделение по прикладной лингвистике.



А.Н. Колмогоров был в математике универсалом и внес огромный вклад во многие ее разделы. Он издал фундаментальные работы по математической логике и гидромеханике, теории множеств и функций и классической механике. Он автор ряда основополагающих работ по стиховедению.

Биографический очерк

Андрей Николаевич Колмогоров родился 25 апреля 1903 г. в Тамбове. Его отец Николай Матвеевич Катаев был агрономом. Мать Мария Яковлевна Колмогорова скончалась при родах, и он был усыновлен и воспитывался ее сестрой Верой Яковлевной. Дед Колмогорова по материнской линии был крупным помещиком, дворянином и предводителем дворянства Угличского уезда Ярославской губернии, а дед по линии отца — священником. Раннее детство Колмогоров провел в родовом имении Туношне, принадлежавшем родителям его матери. В его раннем воспитании соединились, с одной стороны, устой богатого дворянского дома, а с другой — привычки либеральной интеллигенции.

Жизнь Андрея Николаевича Колмогорова — пример счастливой и созидательной судьбы человека, рано осознавшего свое предназначение. Его духовный рост неуклонно продолжался всю жизнь.

Один из учеников А.Н. Колмогорова математик В.А. Успенский в своих воспоминаниях писал: *«Я никогда не встречал человека, ведущего более полноценную жизнь, чем Колмогоров. Профессиональные занятия математикой (и притом на высшем доступном человеческому интеллекту уровне) гармонически сочетались с чтением стихов, созерцанием картин, слушанием музыки, путешествиями, высокой физической культурой — именно культурой, а не спортом: состязательным спортом Колмогоров не занимался никогда»*. Интересно отметить, что размышления о своем будущем сопровождали его всю жизнь. В 1943 г. в возрасте 40 лет он начал вести дневник: *«...Записывать, что сделано, что хочется изменить в своей жизни, что нужно сделать, и потом проверять исполнение — идея не новая, но одинаково полезная и в 16, и в 40 лет. ...К сорока годам я стал живее чувствовать, как жизнь течет и уходит, ...насколько прожитое уже имеет самостоятельную ценность по сравнению с предстоящим далее. Поэтому и возникла потребность фиксировать настоящее в самый момент перехода его из небытия, как еще не бывшего, в небытие, как уже прошедшее...»* Он составляет план, который иронично называет «Календарный план того, как сделаться великим человеком, если на это хватит охоты и усердия». В нем он намечает активную научную деятельность до своего 60-летия, а позже — подготовку учебников для средней школы, полного собрания своих математических работ и написание «Истории форм человеческой мысли». Его биография показывает, что ему удалось реализовать, по крайней мере, часть своих замыслов.

В 1910 г. Колмогоров поступает в подготовительный класс частной гимназии, организованной в Москве двумя женщинами — энтузиастками просвещения Евгенией Арнольдовной Репман и Верой Федоровной Федоровой. В этой гимназии царили демократические порядки: обучение мальчиков и девочек велось совместно, отсутствовала введенная царским правительством процентная норма приема евреев, осуществлялись многие педагогические эксперименты. Гимназия способствовала формированию в учениках любви к

знаниям и благородства характера. Колмогоров на всю жизнь сохранил к ней чувство глубокой признательности. Он вспоминал о той благотворной атмосфере, которая царила в гимназии: «...Значительная часть учителей сама увлекалась наукой. ...Многие школьники состязались между собой в самостоятельном изучении дополнительных материалов, иногда даже с коварными замыслами посрамить своими знаниями менее опытных учителей... По математике я был одним из первых..., но первыми более серьезными научными увлечениями в школьное время для меня были сначала биология, а потом русская история». Колмогоров много читает. Он самостоятельно изучает книгу К.А. Тимирязева «Жизнь растений» и высшую математику по Энциклопедическому словарю Брокгауза и Ефрона. В школьные годы у Колмогорова начали складываться глубокие дружеские связи и его отношение к дружбе между людьми как к высшей духовной ценности.

В 1920 г. он заканчивает школу и поступает на физико-математический факультет МГУ. Решение стать математиком пришло не сразу. В своих автобиографических воспоминаниях он писал: *«Техника тогда воспринималась как что-то более серьезное и необходимое, чем чистая наука. Одновременно с математическим отделением Университета я поступил на металлургический факультет Менделеевского института, в котором прозанимался около двух месяцев. Но скоро интерес к математике перевесил сомнения в актуальности профессии математика. Вместе с тем первым научным докладом, который я сделал в 17-летнем возрасте в МГУ, был доклад в семинаре профессора С.В. Бахрушина о новгородском землевладении».*

Еще студентом с 1922 г. Колмогоров начинает преподавать в средней школе. Интерес к преподаванию сохранялся у него всю жизнь, и он многое сделал для реформирования школьного математического образования в нашей стране.

С МГУ, который А.Н. Колмогоров закончил в 1925 г., неразрывно связана вся его жизнь. В годы учебы в университете А.Н. Колмогоров активно участвовал в работе семинаров, проводимых крупными русскими математиками Н.Н. Лузиным, А.К. Власовым и В.В. Степановым. Он выполнил ряд важных математических работ, одна из которых — построение ряда Фурье — принесла ему мировую известность. В это время он стал учеником академика Н.Н. Лузина.

Будучи с 1925 г. аспирантом Н.Н. Лузина, Колмогоров начал в сотрудничестве с другим учеником Лузина, впоследствии крупнейшим советским математиком академиком А.Я. Хинчиным, исследования в теории вероятности. В этой области он добился выдающихся результатов.

С 1929 г., после окончания аспирантуры, А.Н. Колмогоров защитил докторскую диссертацию и стал старшим научным сотрудником Научно-исследовательского института математики и механики при МГУ и одновременно заведующим кафедрой математики в Индустриально-педагогическом институте им. Карла Либкнехта. К этому времени относится начало его дружбы с выдающимся советским математиком Павлом Сергеевичем Александровым, который был на семь лет старше Колмогорова. Эта дружба началась с лодочного похода по Волге, который организовал Колмогоров, пригласив в нем участвовать Александрова, и продолжалась всю жизнь.

На закате жизни Колмогоров писал: «Для меня эти 53 года нашей тесной и неразрывной дружбы явились основой того, что вся моя жизнь в целом оказалась преисполненной счастья, а основой моего благополучия явилась непрестанная заботливость со стороны Павла Сергеевича».

А.Н. Колмогоров был человеком, в котором естественным образом совмещались высочайший интеллект, порядочность и способность любви к ближнему. Это проявлялось в его отношениях с учениками, многие из которых были его друзьями и впоследствии стали выдающимися учеными, в его многогранной общественной деятельности, на которую он не жалел ни сил, ни времени, способствуя развитию в стране исследований в области математики, в его активном участии в реформе математического образования в средней школе.

В одном из его писем изложены следующие мысли о дружбе:

«...человечество всегда мне представлялось в виде множества блуждающих в тумане огоньков, которые лишь смутно чувствуют сияние, рассеиваемое всеми другими, но связаны сетью ясных огненных нитей, каждый в одном, двух, трех... направлениях. И возникновение таких прорывов через туман к другому огоньку вполне разумно называть ЧУДОМ». И еще: «...скажу только, что по собственному опыту знаю, что наша человеческая любовь происходит по образцу некоторого индуктивного процесса: любовь к данному “избранному” человеку, в котором действительно на каждую черточку его существа радуешься и в котором всякое проявление красоты человеческой воспринимаешь, порождает такую большую радость и освобождает такую большую “энергию любви”, что эта радость ни во что другое не может перейти, как любовь ко всем людям и ко всему миру — пусть несовершенную, но такую, на которую данный человек способен. А этот проблеск универсальной любви дает новый толчок к любви индивидуальной...»

...Если люди научатся радоваться, они сами собой научатся и любить, потому что невозможно радоваться всей душой — и в то же время хоть к кому-нибудь относиться не по-человечески. А радоваться легче всего и проще всего — имея “избранного друга”...»

С июня 1930-го по март 1931 г. Колмогоров находился в своей первой научной командировке в Европе. Он имел разносторонние научные контакты и обсуждал с крупнейшими немецкими и французскими математиками вопросы теории функций, диффузных случайных процессов, теории множеств, теории вероятностей и интуиционистской логики. В Геттингене, который в 30-х гг. был Меккой математиков, он встречался с Д. Гильбертом, Г. Вейлем, Р. Курантом, Э. Ландау, Э. Нетер. Во Франции он установил научные связи с М. Фреше, П. Леви, Э. Борелем и А. Лебегом.

В 1931 г. Колмогоров становится профессором МГУ, и у него появляются первые ученики, а в 1933 г. его назначают директором Института математики и механики при МГУ. В этой должности он работает до 1939 г. и затем — с 1951 по 1953 г.

В 1935 г. А.Н. Колмогоров и С.П. Александров приобретают загородный двухэтажный дом в деревне Комаровка на берегу реки Клязьма, недалеко от подмосковной станции Болшево. В этом доме и протекала в основном их творческая жизнь. В Москву они приезжали еженедельно лишь на два-три дня: для преподавания, решения административных вопросов и встреч с людьми. Дом в Комаровке был всегда полон гостей — учеников А.Н. Колмогорова и С.П. Александрова, которые приезжали сюда не только для обсуждения математических проблем, но и для многокилометровых лыжных прогулок со своими учителями или пеших и лодочных походов. В Комаровке бывали многие выдающиеся иностранные математики — Адамар, Фреше, Хопф и др.

С 1938 по 1946-й и с 1948 по 1960 г. А.Н. Колмогоров заведует отделом теории вероятностей Математического института им. Стеклова АН СССР, а с 1983 г. и до конца жизни — в этом же институте заведует отделом математической статистики и теории информации.

В 1939 г. А.Н. Колмогорова избирают действительным членом АН СССР и одновременно (до 1942 г.) академиком-секретарем Отделения физико-математических наук.

В 1942 г. А.Н. Колмогоров женится на Анне Дмитриевне Егоровой, с которой он учился в одном классе в школе. Детей у А.Н. Колмогорова не было.

Будучи крупнейшим специалистом по проблемам турбулентности, А.Н. Колмогоров в 1946 г. организует в Институте теоретической геофизики АН СССР лабораторию атмосферной турбулентности и становится ее заведующим. В этой лаборатории он работал до 1949 г.

В 1953 г. А.Н. Колмогоров был избран почетным членом Московского математического общества, а в период с 1964 по 1966-й и с 1973 по 1985 г. был его президентом. В течение нескольких месяцев в 1954 г. А.Н. Колмогоров работал профессором в университете им. Гумбольдта в Берлине и в Парижском университете. Он принимал участие во многих международных математических конгрессах.

Колмогоров внес уникальный вклад в дело распространения математических знаний. Он входил в редколлегии многих математических журналов: «Математический сборник», «Доклады АН СССР», «Успехи математических наук». В 1956 г. он основал журнал «Теория вероятностей и ее применение», главным редактором которого являлся до 1966 г., т.е. до прекращения выпуска.

С 1954 по 1956 г. и с 1978 г. до своей кончины А.Н. Колмогоров был заведующим отделением математики механико-математического факультета МГУ, а с 1954 по 1958 г. — деканом этого факультета. В 1935 г. он основал кафедру теории вероятностей, которой заведовал до 1966 г. С 1980 г. до конца жизни он руководил кафедрой математической логики.

Колмогоров много выступал в разных аудиториях с лекциями по широчайшему кругу научных проблем. Умевший блистательно излагать свои мысли на бумаге, в устном изложении он, как отмечали в воспоминаниях его ученики, был невероятно трудно воспринимаем. В.А. Успенский, возможно с некоторым преувеличением, писал: «...Колмогоров всегда предполагал, наличие у собеседника или слушателя интеллекта, равного колмогоровскому. ...Колмогоров считал, что весь мир населен Колмогоровыми. Поэтому его лекции для школьников были доступны скорее старшекурсникам университета, чем школьникам. Его лекции для аспирантов с интересом и с пользой для себя слушали доктора наук, доклады для докторов наук не понимал никто, кроме докладчика».

В 1960 г. он организовал лабораторию вероятностных и статистических методов, которой заведовал с 1966 по 1976 г. Лаборатория была задумана как небольшой институт со штатом около 130 человек. Задачами ее были: изучение и дальнейшая разработка вероятностно-статистических методов, их пропаганда и широкое внедрение в научную, инженерную и медицинскую практику, педагогическая и издательская деятельность. Лаборатория располагала большим помещением для специализированной библиотеки, помещением для ЭВМ, аудиторией на 100 человек. Формированию библиотеки уделялось особое внимание, и книги для нее приобретались на валютные средства, пожертвованные лично А.Н. Колмогоровым.

В 1970-м и 1971–1972 гг. А.Н. Колмогоров участвует в двух четырехмесячных плаваниях на научно-исследовательском судне «Дмитрий Менделеев». Будучи научным руководителем этих рейсов, он совместно со своими учениками принимал участие в исследованиях турбулентности океана и определении ее статистических параметров.

С 1963 по 1968 г. А.Н. Колмогоров возглавлял математическую секцию комиссии АН СССР и Академии педагогических наук по определению содержания среднего образования, а с 1968 по 1978 г. — комиссию по математике Учебно-методического совета Министерства просвещения СССР. В 1966 г. его избирают действительным членом Академии педагогических наук. В 1963 г. он выступает одним из инициаторов создания при МГУ школы-интерната, в которой сам преподавал. Совместно с академиком И.К. Кикоиным он участвовал также в основании физико-математического журнала «Квант» (1970 г.) для юношества. До 1987 г. он был первым заместителем главного редактора и руководил математическим разделом журнала. Делами отечественной средней школы А.Н. Колмогоров был занят до последних дней своей жизни. С 1936 г. А.Н. Колмогоров много сил отдавал работе по изданию Большой и Малой советских энциклопедий. Он возглавлял математический отдел и сам написал немало блестящих статей, посвященных отдельным темам, а также крупнейшим математикам.

Колмогоров был избран членом академий и научных обществ, а также почетным профессором университетов многих стран мира (Англии, Германии, Франции, США, Польши, Румынии, Венгрии, Индии, Финляндии, Голландии). Он являлся членом Международного статистического института и Международной академии истории науки.

А.Н. Колмогорову и А.Я. Хинчину в 1941 г. за цикл работ по теории случайных процессов была присуждена Государственная премия СССР. Заслуги А.Н. Колмогорова были отмечены многими премиями и наградами. В 1963 г. ему была присуждена Международная премия Бальцана, которая была установлена видным итальянским журналистом и издателем в 1961 г., чтобы отмечать научные достижения в тех областях, которые не охватываются Нобелевскими премиями. В 1981 г. за выдающиеся научные достижения в области математики А.Н. Колмогорову присуждается Международная премия Вольфа. За работы по теории возмущений гамильтоновых систем он, совместно с академиком В.И. Арнольдом, в 1965 г. стал лауреатом Ленинской премии. Он был также лауреатом премий им. Чебышева (1949 г.) и им. Лобачевского (1987 г.).

Ему было присвоено звание Героя Социалистического Труда (в 1963 г.), он был награжден семью орденами Ленина и другими наградами СССР, венгерским орденом Знамени, золотой медалью им. Гельмгольца Академии наук ГДР и золотой медалью Американского метеорологического общества.

Колмогоров был глубоким ценителем литературы, музыки, живописи, знаток скульптуры и архитектуры.

Необыкновенная широта интересов А.Н. Колмогорова, огромный диапазон и разнообразие тех областей математики, в которых он работал в различные периоды своей жизни, делают его крупнейшим математиком XX столетия. Он создал одну из наиболее значительных научных школ. Среди его учеников 12 членов Академии наук СССР (девять действительных членов и три члена-корреспондента, имеющих разные математические специальности — дифференциальные уравнения, теория вероятностей и математическая статистика, алгебра, механика, кибернетика, информатика). Среди учеников А.Н. Колмогорова весомый вклад в теорию связи внесли видные российские специалисты Р.Л. Добрушин и М.С. Пинскер (теория информации) и А.М. Яглом (теория оптимальной линейной фильтрации сигналов).

По числу крупнейших ученых, которые вышли из научной школы Колмогорова, ее можно поставить в один ряд со школами великих физиков XX в. Резерфорда и Бора. К сожалению, жизнь Андрея Николаевича протекала в период «холодной войны», когда контакты между советскими учеными и их западными коллегами были очень ограничены, его школа, в отличие от школ Резерфорда и Бора, не стала интернациональной.

Андрей Николаевич Колмогоров скончался 20 октября 1987 г.

Вклад Колмогорова в теорию связи

Основополагающие результаты А.Н. Колмогорова определили пути развития многих разделов математики XX в. и других ветвей науки. Академики Н.Н. Боголюбов, Б.В. Гнеденко и С.Л. Соболев писали: «А.Н. Колмогоров занимает уникальное место в современной математике, да и в мировой науке в целом. По широте и разнообразию своих научных занятий он напоминает классиков естествознания прошлых веков».

Значительное влияние работы Колмогорова оказали на развитие нескольких направлений в теории связи, а именно статистических методов анализа радиотехнических систем, теории оптимальной линейной фильтрации и теории информации. Следует отметить, что два первых направления Колмогоров разрабатывал, развивая «математический язык» и не имея в виду каких-либо конкретных прикладных задач. Проблемы теории информации привлекли его внимание после ознакомления со знаменитой статьей Клода Шеннона «Математическая теория связи».

Статистические методы исследования стали применяться в радиотехнике с середины 30-х гг. Однако их интенсивное использование с конца 40-х гг. было связано с обработкой принимаемых сигналов в присутствии шумов. Такие задачи возникли с созданием радиолокационной техники и необходимостью расширить зону действия радиолокационных станций путем повышения чувствительности приемных устройств. Аналогичные задачи стояли и перед разработчиками систем радиосвязи.

В создании статистических методов анализа радиотехнических систем значительную роль сыграла одна из самых замечательных работ А.Н. Колмогорова «Об аналитических методах в теории вероятностей», которая была завершена в 1930 г. В статье П.С. Александрова и А.Я. Хинчина, написанной в 1953 г. и посвященной пятидесятилетию со дня рождения А.Н. Колмогорова, сказано: *«Во всей теории вероятностей XX столетия трудно указать другое исследование, которое оказалось бы столь же основополагающим для дальнейшего развития науки и ее приложений, как эта работа Андрея Николаевича. В наши дни из нее развилась обширная область учения о вероятностях — теория случайных процессов, по своему объему и количеству своих приложений могущая соперничать с “классическими” частями теории вероятностей. Управляющие марковскими процессами дифференциальные “уравнения Колмогорова”, строго и во всей широте математически обоснованные, содержали в себе в качестве частных случаев все те уравнения (Смолуховского, Чепмена, Фоккера—Планка и др.), которые до тех пор кустарно, без достаточного основания и четкого выяснения лежащих в их основе предпосылок, выводились и применялись физиками по отдельным поводам. На этих уравнениях Колмогорова основывалось и про-*

должна основываться огромное количество исследований во всех странах мира; они оказались основными как для дальнейшего развития теории, так и для математической обработки самых разнообразных прикладных задач».

В теории связи уравнения Колмогорова позволяют по стохастическим дифференциальным уравнениям, описывающим процесс, протекающий в исследуемой системе обработки сигналов (в общем случае нелинейной), найти распределение вероятности перехода этого процесса из состояния в момент времени t в другое состояние в момент времени $s > t$.

В статистическую радиотехнику эти уравнения, по-видимому, были впервые введены одним из крупнейших советских ученых Р.Л. Стратоновичем. В книге «Избранные вопросы теорий флуктуаций в радиотехнике» (Сов. радио. 1961) он, используя эти уравнения, рассмотрел ряд практически важных задач, возникающих при приеме случайных сигналов и связанных с определением статистических характеристик выбросов случайных процессов, а также с воздействием шумов на автоколебательные системы.

В 40-х гг. наметилась тенденция полностью автоматизировать работу радиоприборов и уменьшить роль человека-оператора. В это время в радиотехнических системах начинают применяться нелинейные следящие устройства, которые работают при действии флуктуационных помех. Одна из важнейших проблем, возникающих при конструировании таких систем, — срыв слежения. Явления срыва слежения наблюдаются, например, в системах автоподстройки частоты и фазы, которые обычно часто используются в современной радиотехнике, в том числе и в устройствах приема сигналов с частотной модуляцией со сниженным порогом. Такие устройства широко применяются также в системах автосопровождения радиолокационных целей. Разработанный Колмогоровым математический аппарат оказывается адекватным тем сложным процессам, которые протекают в следящих устройствах, и он начинает широко применяться для их анализа.

В 1941 г. Колмогоров опубликовал фундаментальную работу «Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей», которая заложила основы теории оптимальной линейной фильтрации. Содержащиеся в ней идеи в кратком виде были опубликованы в Докладах Французской академии наук еще в 1939 г. В США аналогичные идеи независимо были разработаны во время Второй мировой войны американским ученым Норбертом Винером. В 1949 г. секретный отчет о результатах выполненных им исследований был рассекречен и издан в виде монографии «Интерполяция, экстраполяция и сглаживание стационарных временных рядов».

Два выдающихся ученых современности академик А.Н. Колмогоров и Норберт Винер — авторы основных положений теории оптимальной линейной фильтрации, образующей фундамент современной теории и практики связи. В последующие годы эта теория развивалась отечественными и зарубежными учеными: А.М. Ягломом, М.С. Пинскером, Ю.В. Ли, Л.А. Заде и Дж. Р. Рагазини, Р.Л. Стратоновичем, Р.Е. Калманом, Р.С. Бьюси, Х. Кушнером и др.

Большое значение для теории связи имеют работы Колмогорова по теории информации, к проблемам которой он обратился в начале 50-х гг. под влиянием работ Клода Шеннона. Еще в 1954 г. Колмогоров отмечал значение Шеннона для чистой

математики и важность создания прочного математического фундамента для теории информации. В 1956 г. в его пленарном докладе «Теория передачи информации» на сессии АН СССР по научным проблемам автоматизации производства были изложены основные идеи теории информации.

А.Н. Колмогоров показал, что наряду с вероятностным шенноновским подходом к определению количества информации возможны, а во многих случаях более естественны иные подходы: комбинаторный и алгоритмический. Выводы Колмогорова привели к созданию нового раздела науки — алгоритмической теории информации.

Работы Колмогорова и его учеников заложили, по словам Р.Л. Добрушина, «...традицию изложения результатов теории информации на уровне математической строгости, которой с тех пор неизменно придерживаются как те из специалистов, которые считают себя математиками, так и те, которые считают себя инженерами».

Заключение

Французский писатель Поль Валери сказал: *«Человек оставляет после себя то, с чем связывается его имя, и создания, которые делают из этого имени символ восторга, ненависти или безразличия».*

Академик Колмогоров оставил человечеству огромное наследие. Он был признан во всем мире. Крупнейшие академии всех стран удостоили его чести, приняв в свои члены.

Память о великих людях увековечивают, присваивая их имя улицам городов, кораблям, научным институтам. Однако истинное бессмертие человек обретает, сливаясь с идеями, которые он открывает миру. Имя Пифагора навеки связано с теоремой, устанавливающей соотношение между длиной гипотенузы прямоугольного треугольника и длинами его катетов. Имя Колмогорова неразрывно связано с фундаментальными результатами современной математики. В теории вероятностей и математической статистике его имя носят: неравенство Колмогорова, уравнения Колмогорова—Чепмена, критерий Колмогорова—Смирнова и др. Свое имя А.Н. Колмогоров обессмертил всей своей жизнью.

Литература

1. Колмогоров в воспоминаниях / Под ред. А.Н. Ширяева. М.: Наука, 1993.
2. Колмогоров А.Н. Математика в ее историческом развитии. М.: Наука, 1991.

Владимир Александрович КОТЕЛЬНИКОВ

*Как конь рожден для бега, бык для пахоты,
а собака для поисков, так и человек рожден
для двух вещей — для умопостижения и
действия, как некий смертный бог.*

Аристотель



Введение

С именем академика Владимира Александровича Котельникова связана целая эпоха развития связи, радиотехники и радиофизики. Его крупнейшими научными достижениями, оказавшими глубокое влияние на развитие мировой науки, являются: открытие теоремы отсчетов, носящей его имя, создание теории потенциальной помехоустойчивости, давшей ученым и инженерам инструмент для синтеза оптимальных систем обработки сигналов в системах связи, радиолокации, радионавигации и других системах, а также разработка планетарных радиолокаторов и проведение с их помощью фундаментальных астрономических исследований.

Инженерный талант В.А. Котельникова проявился в предвоенные и военные годы, когда под его руководством внедрялась аппаратура однополосной передачи сигналов по радиоканалу на магистральных линиях радиосвязи и аппаратура для засекречивания речевых сигналов, которая нашла широкое применение в годы Великой Отечественной войны в действующей армии. В послевоенные годы он руководил разработками многих сложнейших радиосистем, в том числе оборонного значения.

В.А. Котельников — не только выдающийся ученый XX в., но и крупнейший педагог. Большую часть своей жизни он совмещал научные исследования с преподаванием в высшей школе. Его заслугой является проведение в 60-х гг. реформы радиотехнического образования в стране и создание новых радиотехнических курсов, что позволило вести подготовку радиоинженеров, владеющих всем арсеналом современных знаний.

В.А. Котельников внес огромный вклад в организацию в нашей стране научных исследований по многим современным направлениям радиотехники и радиофизики. Им созданы два крупнейших отечественных научных центра — Особое конструкторское бюро в Московском энергетическом институте (ОКБ МЭИ) и Институт радиотехники и электроники (ИРЭ) Российской академии наук (РАН).

Как вице-президент АН СССР он многое сделал для формирования государственной политики развития науки в нашей стране и организации масштабных научных исследований, которые выполнялись силами крупных научных коллективов, разрабатывавших радиотехнические системы.

Его жизнь, наполненная умопостижением и действием, полностью соответствовала тому понятию о предназначении человека, которое более двух тысяч лет назад сформулировал Аристотель в приведенном эпитафье.

Биографический очерк

Владимир Александрович Котельников родился 6 сентября 1908 г. в Казани. Его отец Александр Петрович Котельников — известный русский ученый в области математики и механики был профессором Казанского университета.

Закончив в Москве в 1925 г. школу, В.А. Котельников поступил в техникум связи им. В.Н. Подбельского. Через год сдал экзамены в Московское высшее техническое училище (МВТУ). На базе выделившегося в 1930 г. из МВТУ электротехнического факультета формируется Московский энергетический институт (МЭИ). В 1931 г. В.А. Котельников заканчивает радиотехнический факультет МЭИ. Получив диплом инженера-электрика, он был направлен на работу в Институт связи Красной армии (ныне ЦНИИС Минобороны (МО)), где занял должность инженера и некоторое время работал под руководством талантливого ученого и организатора профессора И.Г. Кляцкина.

В 1931 г. В.А. Котельников поступает в аспирантуру МЭИ и одновременно ведет лабораторные работы, преподает в качестве ассистента основы радиотехники. К 1941 г. он становится доцентом МЭИ, а после окончания аспирантуры поступает на работу в Центральный научно-исследовательский институт связи (ЦНИИС) Наркомата связи.

Исследовательскую деятельность В.А. Котельников начал еще в студенческие годы. Первая его научная статья «Тройной характерограф» была опубликована в первом номере журнала «Телеграфия и телефония без проводов» за 1928 г.

Фундаментальные проблемы радиосвязи сразу же оказываются в центре его внимания. В 1932 г. он подготовил для научной конференции доклад «О пропускной способности эфира и проволоки», где им была сформулирована знаменитая теорема отсчетов — одна из основных теорем теории связи. Доклад был опубликован в 1933 г. В 1936 г. в Научно-техническом сборнике Электротехнического института связи (вып. 11 и 14) были опубликованы две его работы. В первой из них «Количественная оценка различных методов борьбы с замиранием» он одним из первых, используя теорию вероятностей, выполнил исследование эффективности систем разнесенного приема сигналов в многолучевом канале. Во второй работе «О воздействии на нелинейные сопротивления суммы синусоидальных напряжений» дан общий аналитический метод исследования нелинейных искажений сигналов в различных устройствах. Подобные методы получили развитие на основе математического аппарата теории случайных процессов начиная с конца 40-х гг. XX в. в работах крупнейших отечественных и зарубежных ученых Р.Л. Стратоновича, В.И. Тихонова, Н. Винера, С.О. Райса и др.

По инициативе В.А. Котельникова и под его руководством в 30-х гг. разрабатывается однополосная аппаратура для линии радиосвязи Москва — Хабаровск. Аппаратура была установлена на Октябрьском передающем центре в Москве и введена в опытную эксплуатацию в 1939 г. В разработке участвовали известные отечественные специалисты А.В. Черенков и А.Ф. Ганин.

В 1938 г. за большой комплекс выполненных исследований и разработок В.А. Котельникову без защиты диссертации была присуждена степень кандидата технических наук.

Поскольку сообщения, передаваемые по однополосной линии связи, легко могли быть перехвачены иностранной разведкой, В.А. Котельников в 1939 г. предложил создать шифратор для засекречивания речевых сигналов с повышенной стойкостью против их распознавания противником. Это предложение имело важное государственное значение, и для его реализации в ЦНИИС организуется специальная лаборатория. Для повышения стойкости засекречивания речи Котельников предлагает новую систему, основанную на квазислучайных (известных только получателю сообщения) перестановках временных отрезков речевого сигнала, передаваемого по телефонному каналу. Принимаемый сигнал подвергается обратной операции, в результате чего восстанавливается исходный порядок следования временных отрезков речевого сигнала и он приобретает разборчивость. За рубежом подобные идеи стали обсуждаться значительно позже (French R.C. Speech scrambling and synchronization. Philips Res. Rep. Supplement. 1973. № 9).

В 1941 г. В.А. Котельниковым были сформулированы технические принципы стойкой системы засекречивания сигналов. Она должна быть цифровой, а преобразование аналогового сигнала в цифровую форму должно основываться на теореме отсчетов Котельникова. В его лаборатории проводили исследования возможности создания аппаратуры засекречивания с использованием принципов вокодерной техники, открытых еще в 1939 г. американским инженером Г. Дадли. Подобная аппаратура была создана только в послевоенные годы.

Разработка шифратора имела оборонное значение, и для ее завершения лаборатория во время войны была эвакуирована в Уфу. Вскоре в лабораторию влилась группа специалистов, занимавшихся подобной же разработкой на заводе «Красная заря» в Ленинграде. Под руководством В.А. Котельникова шифратор был создан к осени 1942 г. Во время Великой Отечественной войны разработанная под руководством В.А. Котельникова аппаратура засекречивания речи широко использовалась в действующей армии. Она применялась также для связи с Москвой нашей делегации во время принятия капитуляции Германии в мае 1945 г. За создание аппаратуры засекречивания речи В.А. Котельникову и группе разработчиков в 1943 и 1946 гг. были присуждены Сталинские премии первой степени.

В 1944 г. В.А. Котельников снова начинает преподавать в МЭИ основы радиотехники, а с 1946 г. становится деканом радиотехнического факультета (РТФ) в МЭИ и формирует коллектив специалистов, каждый из которых был не только крупным ученым, но и крупным педагогом. Кафедрой радиолокации заведовал академик Ю.Б. Кобзарев, кафедрой радиоприемных устройств — член-корреспондент АН СССР В.И. Сифоров, кафедрой передатчиков — профессор С.И. Евтянов, кафедрой антенн — профессор Г.З. Айзенберг, а позже Г.Т. Марков, кафедрой радиотехнических систем — профессор Л.С. Гуткин, кафедру распространения радиоволн возглавлял профессор А.Н. Казанцев, лекции по радионавигации читал профессор В.Б. Пестряков. Все эти ученые своими оригинальными исследованиями и выпущенными учебниками внесли значительный вклад в развитие науки и оставили яркий след в истории отечественной радиотехники и радиосвязи.

В.А. Котельников прививал своим коллегам мысль, что в радиотехнике нет непонятных явлений и все можно объяснить очень просто. Сам он мог дать столь наглядное объяснение любому явлению, что оно становилось элементарно понятным.

Профессор Л.И. Филиппов вспоминает: «К В.А. Котельникову можно было прийти с любым неясным вопросом. Он мог обсуждать с вами вопрос о построении мощного радиотелескопа или о величине емкости конденсатора в схеме — если это было важно для собеседника. Впервые пришедший посетитель испытывал чувство сверхъестественного: создавалось впечатление, что поставленный вопрос он уже давно рассмотрел и знает ответ. Иностранцы часто приводили В.А. Котельникова как пример блестящего ученого, глубоко знающего теорию, и одновременно настоящего инженера и конструктора».

После окончания Великой Отечественной войны В.А. Котельников в декабре 1946 г. представляет ученому совету МЭИ для защиты докторскую диссертацию «Теория потенциальной помехоустойчивости». Эта ставшая классической работа была успешно защищена в январе 1947 г. Она является одним из краеугольных камней современной теории связи и принесла ему мировую славу.

В МЭИ В.А. Котельников не ограничивается только преподавательской деятельностью: он создает один из крупнейших отечественных научных центров — Особое конструкторское бюро (ОКБ МЭИ). В ОКБ были выполнены многие разработки радиотехнических систем для баллистических ракет и космических аппаратов. В течение ряда лет он был главным конструктором ОКБ и руководил многими разработками, имеющими важное оборонное значение. В ОКБ был великолепный творческий коллектив инженеров и ученых. После перехода В.А. Котельникова на работу в АН СССР коллектив ОКБ МЭИ возглавил академик А.Ф. Богомолов.

В ОКБ МЭИ разрабатывались многоканальные радиотелеметрические системы для отечественных ракет и космических аппаратов. Была создана первая в мире космическая телевизионная система, разрабатывались системы активной радиолокации и высокоточные угломерные системы. Системы, созданные в ОКБ МЭИ, широко применялись в авиации и морском флоте, в научных программах АН СССР. Разрабатывались также радиолокаторы бокового обзора с синтезированной апертурой, которые были установлены на космических аппаратах «Венера». С помощью этих радиолокаторов построили радиокарты северного полушария планеты Венера. НИИР Минсвязи и ОКБ МЭИ совместно участвовали в создании оборудования для системы связи «Орбита — Молния», которая вступила в строй в 1967 г. и обеспечила вещанием районы Сибири и Дальнего Востока.

В начале 50-х гг. вследствие прогресса в радиотехнике, расширения используемых диапазонов частот, появления в годы войны таких новых областей, как техника СВЧ, радиолокация, радионавигация и др., назрела необходимость реформы радиотехнического образования в стране. В значительной степени благодаря авторитету и личному энтузиазму В.А. Котельникова была разработана и принята новая учебная программа. Подготовка радиоинженеров стала вестись на современном научном уровне. В программе были выделены такие новые для тех лет дисциплины, как импульсная техника, радиолокация, радиоуправление, системы передачи сообщений.

В.А. Котельниковым, совместно с другим преподавателем МЭИ А.М. Николаевым, был создан курс «Основы радиотехники», на базе которого позднее они подготовили блестяще написанный и весьма популярный двухтомный учебник, первый том которого был издан в 1950 г., а второй — в 1954 г. По этому учебнику осваивали радиотехнику поколения отечественных радиоинженеров. Лекции по новой дисциплине «Электродинамика», введенной В.А. Котельниковым вместо ранее читавшейся студентам дисциплины «Теория электромагнитного поля» и нацеленной на технику СВЧ, он, несмотря на колоссальную занятость, готовил и читал сам. Они пользовались огромной популярностью не только среди студентов, но и среди преподавателей.

В должности декана РТФ в МЭИ Котельников работал до своего избрания действительным членом Академии наук СССР в 1953 г. После избрания он продолжал педагогическую деятельность, а в 1968 г. организовал и длительное время возглавлял кафедру электромагнитных волн в Московском физико-техническом институте.

В 1953 г. по инициативе академика А.И. Берга, занимавшего в 50-е гг. пост заместителя министра обороны СССР по новой технике, и при активном участии академиков В.А. Котельникова, Б.А. Введенского, Н.Д. Девяткова, Ю.Б. Кобзарева, А.А. Пистолькорса и члена-корреспондента Д.В. Зерна создаётся Институт радиотехники и электроники (ИРЭ) АН СССР. Директором ИРЭ в 1953 г. был назначен А.И. Берг, а первым его заместителем — В.А. Котельников. В 1954 г. директором ИРЭ становится В.А. Котельников. За последние полвека этот институт превратился в крупнейший в стране научный центр по проблемам радиотехники и радиофизики.

В организации фундаментальных исследований в различных научных направлениях в полной мере проявился его талант крупнейшего ученого, организатора и руководителя большого научного коллектива. Результаты этих исследований оказали значительное влияние на создание новой техники в нашей стране.

В ИРЭ собрался цвет отечественной радиотехнической науки. В нем получили существенное развитие следующие научные направления: электродинамика; теория антенн и распространения радиоволн в разных диапазонах частот (академик Б.А. Введенский, профессора А.Г. Аренберг, Л.А. Жекулин, А.Н. Казанцев); электронные приборы (академики Д.В. Зернов и Н.Д. Девятков); квантовая радиофизика (профессора Е.Н. Базаров и М.Е. Жаботинский); методы обнаружения слабых сигналов в шумах и измерение статистических характеристик случайных напряжений и исследования в области статистической радиотехники (академик Ю.Б. Кобзарев, профессор В.И. Бунимович); исследования в области радиоприема, систем радиорелейной связи и теории информации (член-корреспондент АН СССР В.И. Сифоров). Академик В.В. Мигулин, профессора Г.С. Горелик, М.А. Колосов, С.Г. Калашников и другие крупные ученые определяли новые направления работ, проводившихся в ИРЭ. Под руководством А.А. Пистолькорса выполнялись оригинальные исследования в области антенной техники и создавались ферритовые параметрические усилители сверхвысоких частот, а под руководством академика Ю.В. Гуляева велись интенсивные работы по созданию линейных и нелинейных акустоэлектронных устройств обработки сигналов. В ИРЭ были созданы радиолокационные системы для дистанционного зондирования атмосферы и поверхности Земли (профессор Н.А. Арманд), а также для космических исследований и планетарной радиолокации (В.А. Котельников).

В ИРЭ В.А. Котельников совместно с академиками Ю.В. Гуляевым (сменившим В.А. Котельникова на посту директора ИРЭ) и Н.Д. Девятковым уделяли пристальное внимание развитию исследований в области теоретических основ микроэлектроники, оптоэлектроники, сверхпроводящей, полупроводниковой, акусто- и магнитоэлектроники. В ИРЭ проводили и фундаментальные исследования в следующих научных направлениях: создание оптоволоконных систем связи; радиофизические методы исследования природных ресурсов Земли; применение радиоэлектроники в медицине; автоматизация научных исследований.

Инициатором и научным руководителем новых научных направлений — планетарной радиолокации и исследований излучений планет Солнечной системы и космического пространства был Котельников. В результате масштабных исследовательских и опытно-конструкторских работ, в которых принимали участие многие отечественные предприятия, был создан сложнейший радиотехнический комплекс, включающий мощные передатчики, высоконаправленные антенны, приемные устройства с высокой чувствительностью и сложнейшую систему автоматической обработки принимаемых сигналов. Этот комплекс позволял проводить уникальные научные исследования.

Вместе со своими учениками и коллегами в 1961-м, а затем в 1962 и 1964 гг. Котельниковым были получены научные данные, которые относятся к важнейшим открытиям XX в. Созданный комплекс позволил достигнуть феноменальной точности измерения расстояний в радиолокационной астрономии: 10^{-8} от измеряемой величины. В результате были уточнены астрономическая постоянная (расстояние между Землей и Солнцем), размеры Солнечной системы, что позволило глубже понять закономерности движения планет, а также обеспечить необходимую точность управления космическими аппаратами.

Выполненные в ИРЭ фундаментальные исследования дали возможность впервые в науке составить атлас поверхности планеты Венера, вышедший под редакцией академика В.А. Котельникова. За работы в области планетарной радиолокации ему вместе с коллективом сотрудников в 1964 г. была присуждена Ленинская премия.

Наряду с фундаментальными космическими исследованиями В.А. Котельников лично занимался и некоторыми принципиальными проблемами радиотехники. В 1959 г. он организовал и возглавил в ИРЭ лабораторию параметрических усилителей, где выполнил теоретические исследования, определившие пути достижения предельных шумовых и полосовых характеристик и заложившие основы их инженерного расчета.

В 1984—1992 гг. под научным руководством Котельникова были проведены исследования точности релятивистской теории движения планет. В эти же годы были произведены также радиолокационные исследования планет Меркурий и Марс.

В 1987 г. В.А. Котельников оставляет свой пост директора ИРЭ и становится почетным директором института. До последних дней жизни Котельников сохранял за собой пост председателя ученого совета ИРЭ и вел все его заседания. Он не прекращал своей активной научной деятельности, работая в совете Российской академии наук (РАН) по космосу, и являлся советником Президиума РАН.

Количество научных публикаций В.А. Котельникова сравнительно невелико. До 1960 г. им было опубликовано всего около 25 работ, включая книгу «Теория потенциальной помехоустойчивости» и двухтомный учебник «Основы радиотехники». В 1934 и 1935 гг. им были получены два авторских свидетельства на изобретения «Способ

настройки радиоприемника» (№ 44570. 1934) и «Способ сдвига и перевертывания частотного спектра» (№ 44963. 1935). Наиболее важными в научном отношении его работами за этот период являются две упомянутые в начале этого раздела статьи, а также статья «Сигналы с максимальной и минимальной вероятностями обнаружения», опубликованная в журнале «Радиотехника и электроника» (1959. № 3).

С 1961 по 1983 г. им в соавторстве со своими сотрудниками было опубликовано около 50 научных работ. Эти работы посвящены радиоэлектронике и космонавтике, принципам создания новой уникальной техники для радиолокации планет Солнечной системы и фундаментальным результатам выполненных с помощью этой техники научных исследований планет Венера, Меркурий и Марс. В нескольких его научных публикациях рассмотрены проблемы установления связи с внеземными цивилизациями. В 1964 г. он получил авторское свидетельство на изобретение «Устройства для получения сигналов с частотной модуляцией по ступенчато-пилообразному закону» (№ 163215), которое использовалось в созданном в ИРЭ планетарном радиолокаторе. В эти же годы им были сделаны многие научные доклады и опубликованы популярные статьи в журналах и газетах.

Оставив пост директора ИРЭ, В.А. Котельников вновь обратился к проблематике теории связи и стал развивать научные идеи в области теории сигналов. В журнале «Радиотехника и электроника» (1996. № 7; 1997. № 4) были опубликованы две его статьи — «Сигналы с минимальной энергией вредного спектра» и «Импульсы с наименьшей энергией в спектре за пределами заданной полосы», посвященные синтезу сигналов, имеющих наименьшую энергию за пределами основной полосы частот. Данные работы связаны с актуальной проблемой «тесноты в эфире», для решения которой разработчики радиосистем должны были выбирать сигналы таким образом, чтобы в заданной полосе частот могло работать, не создавая друг другу взаимных помех, наибольшее число радиосредств.

За свою научную деятельность В.А. Котельников был удостоен многих научных наград. Международный институт инженеров по электротехнике и электронике (ИЭЭЭ), почетным членом которого он является с 1964 г., наградил его в 1973 г. медалью им. Хернанда и Созенеса Бен «За выдающийся вклад в развитие теории и практики радиосвязи, основополагающие исследования и руководство работами в области радиолокационной астрономии». Президиум АН СССР в 1974 г. присудил В.А. Котельникову золотую медаль им. А.С. Попова за творческий вклад в фундаментальные исследования в области теории связи и планетарной радиолокации.

За выдающиеся достижения в области радиофизики, радиотехники и электроники Президиум АН СССР удостоил его в 1981 г. высшей награды Академии — золотой медали им. М.В. Ломоносова, а в 1987 г. — золотой медали им. М.В. Келдыша.

За полученное им впервые строгое доказательство знаменитой теоремы отсчетов Котельникову в 1999 г. присуждается престижная международная награда Фонда Эдуарда Рейна (Германия). В 2000 г. за фундаментальный вклад в теорию связи он награждается ИЭЭЭ золотой медалью им. Александра Грэхема Белла, а также почетной наградой ИЭЭЭ — медалью 2000-летия. «Академик Котельников — выдающийся герой современности. Его заслуги признаются во всем мире. Перед нами гигант радиоинженерной мысли, который внес самый существенный вклад в развитие радиосвязи», — так высоко оценил научные заслуги В.А. Котельникова президент ИЭЭЭ профессор Брюс Айзенштайн.

В.А. Котельников — один из основателей и почетный член Всероссийского Научно-технического общества радиотехники, электроники и электросвязи им. А.С. Попова. В течение многих лет он был председателем правления общества.

Он один из тех отечественных ученых, которые получили широкое международное признание. В.А. Котельников был членом Польской, Чехословацкой, Монгольской, Болгарской и Германской академий наук, почетным членом IEEE, членом Международного научного радиосоюза. Одно время он был вице-президентом Международной академии астронавтики.

С 1969 по 1988 г. В.А. Котельников являлся вице-президентом АН СССР, причем с 1975 г. — первым вице-президентом. На этом посту он внес огромный вклад в формирование государственной политики развития науки в нашей стране и совершенствование форм ее организации. По мнению многих авторитетных ученых, в том числе членов АН СССР, вторая половина прошлого века ознаменована в отечественной и мировой науке деятельностью четырех «К» — Курчатова, Королева, Келдыша и Котельникова.

Многие годы он возглавлял научный совет АН СССР по проблеме «Радиоастрономия», совет АН СССР по международному сотрудничеству в области исследования и использования космического пространства, был председателем научного совета по проблемам научно-технического и социально-экономического прогнозирования при Президиуме АН СССР и Госкомитете СССР по науке и технике, а также членом Комитета по Ленинским и Государственным премиям при Совете Министров СССР.

В течение многих лет В.А. Котельников был главным редактором журналов «Радиотехника и электроника», «Вестник Академии наук СССР» и входил в редколлегия журналов «Радиотехника».

За выдающиеся заслуги в науке В.А. Котельников дважды был удостоен высшей государственной награды СССР — звания Героя Социалистического Труда, в 1998 г. к 90-летию ему была вручена почетная награда — орден «За заслуги перед Отечеством» II степени, а в 2003 г. к 95-летию он был награжден орденом «За заслуги перед Отечеством» I степени. Он удостоен также многих других наград СССР и России.

Владимир Александрович Котельников скончался 11 февраля 2005 г.

Научный вклад в теорию связи

Древние мудрецы особо подчеркивали значение такой человеческой способности, как способность удивляться. Любознательность — одна из основных черт, которой обязательно должен обладать крупный ученый. Это качество всегда было присуще В.А. Котельникову и являлось стимулом в постановке им новых научных проблем. Решение этих проблем привело к важнейшим результатам в теории связи — теореме отсчетов и теории потенциальной помехоустойчивости.

Теорема отсчетов была опубликована В.А. Котельниковым в 1933 г. Согласно этой теореме любая функция со спектром, ограниченным частотой F , представима своими отсчетами, взятыми через интервалы времени $1/2F$. Независимо она была установлена в 1949 г. Клодом Шенноном. Эта теорема имеет для техники связи исключительное значение. Следует отметить, что как один из частных математических

результатов теории интерполяции функции эта теорема открыта еще в начале XX в. английскими математиками Э.Т. Уиттекером и Дж. М. Уиттекером. Однако это крупнейшее научное достижение по праву связывают с именами Котельникова и Шеннона: именно благодаря открытию ими теоремы отсчетов перед инженерами открылась возможность создания цифровых систем, которые в конце XX в. произвели революцию в электросвязи. В мировой литературе за этой теоремой закрепилось название — теорема Уиттекера—Котельникова—Шеннона (УКШ).

Действительно, история дает много примеров, когда слава первооткрывателя по праву доставалась именно тем, кому удалось поставить свое открытие на службу всему человечеству, хотя до них с этим открытием соприкасались и другие. Ведь славу открытия Америки история закрепила за Колумбом, хотя, как известно, за сотни лет до него этот континент не раз посещали викинги. Поэтому есть солидная доля истины в мысли английского ученого Э. Чаргаффа: *«В науке часто важно не то, кто был первым, а кто оказался последним»*.

В.А. Котельников подтвердил эту истину, пытаясь найти ответ на принципиальный вопрос, какова же минимальная полоса частот, необходимая для передачи по каналу связи сообщения, спектр которого строго ограничен. Сегодня общепризнано, что теорема УКШ — один из фундаментальных результатов теории связи. Однако понимание специалистами фундаментальности сделанного В.А. Котельниковым открытия пришло не сразу. Доклад В.А. Котельникова «О пропускной способности эфира и проволоки» был опубликован в 1933 г. в книге «Материалы по радиосвязи к 1-му Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции связи», изданной малым тиражом Всесоюзным энергетическим комитетом. Попытка Котельникова опубликовать статью на эту тему в общесоюзном журнале «Электричество» окончилась неудачно. Статья была отклонена, поскольку, как было указано в рецензии, она не представляет интереса для широкого круга инженеров, а портфель редакции переполнен.

Другим крупнейшим научным достижением В.А. Котельникова, сыгравшим ключевую роль в совершенствовании систем связи, является теория потенциальной помехоустойчивости, которая была разработана им в конце 1946 г. Она дала возможность специалистам путем проведения теоретических расчетов синтезировать оптимальные для разных условий устройства обработки и приема сигналов и определять для них те качественные характеристики, которые могут быть достигнуты при их применении.

Следует отметить, что в создание этой теории значительный вклад внесли выдающиеся американские и английские ученые — А. Зигерт, Д. Миддлтон, Ф. Вудворт и И. Дейвис, которые пришли, независимо друг от друга, к аналогичным идеям несколько позже и многое сделали для их разработки и популяризации.

Знаменитый немецкий философ и математик Г.В. Лейбниц, которому принадлежат выдающиеся достижения во многих областях науки, справедливо считал, что *«На свете есть вещи поважнее самых прекрасных открытий — это знание метода, которым они сделаны»*. Он многие годы работал над созданием теории, которая позволила бы любому человеку изобретать, однако ему не суждено было добиться успеха в этом замечательном начинании. В электросвязи это удалось совершить Котельникову и упомянутым выше американским и английским ученым. Возможности, которые предоставляет специалистам созданная ими теория потенциальной помехоустойчивости, поистине чудесны. Эта теория дает путеводную нить при конструировании новых систем.

До появления теории Котельникова в ряде публикаций давался анализ помехоустойчивости приема сигналов с помощью приемников, содержащих фильтры и детекторы сигналов, параметры которых заранее известны.

В.А. Котельникова, как уже отмечалось, всегда интересовали фундаментальные теоретические вопросы. Приступая к созданию своей теории, он задался вопросом, до какого предела помехоустойчивости можно дойти при приеме сигналов на фоне действующих в канале помех. В его докторской диссертации была поставлена и решена совершенно новая для теории связи проблема синтеза оптимального устройства приема (которая заключается в нахождении оптимального алгоритма обработки принимаемого сигнала), исходя из известной формы переданного сигнала и статистических характеристик воздействующих на прием шумов. Им была разработана методология определения помехоустойчивости оптимального приемника.

Новаторская работа В.А. Котельникова не содержала ссылок на ранее опубликованные работы (таковых работ с подобной постановкой проблемы приема сигналов в те годы просто не было), и в ней не приводилось ни одной схемы конкретного устройства. У многих, в том числе крупных, отечественных специалистов это вызывало непонимание значимости новой теории, которая, как им казалось, абстрактна и не имеет практического значения. Такое впечатление усиливалось тем, что, рассматривая в своей диссертации примеры применения развитой теории к нескольким реальным методам передачи сигналов, В.А. Котельников пришел к выводу, что традиционные методы приема сигналов реализуют потенциальную помехоустойчивость. Новых же методов передачи и приема сигналов в его работе не предлагалось.

Сам Котельников ясно осознавал значение созданной им теории и во введении к своей работе писал: «Сравнивая потенциальную помехоустойчивость с помехоустойчивостью, которую могут обеспечить реальные приемники, можно судить, насколько последние будут близки к совершенству, насколько еще можно путем их улучшения поднять помехоустойчивость, то есть насколько целесообразно работать над дальнейшим повышением помехоустойчивости при заданном способе передачи. Знание потенциальной помехоустойчивости позволяет легко обнаруживать и отбрасывать те методы передачи, в которых эта помехоустойчивость получается низкой по сравнению с другими методами».

Поскольку в теории Котельникова применялся новый для инженеров математический аппарат теории вероятностей, в первые годы после ее создания в России с ней был знаком только весьма узкий круг специалистов, которые имели возможность ознакомиться с рукописью диссертации. Опубликованная в Радиотехническом сборнике (Госэнергоиздат. 1947) статья «Проблемы помехоустойчивости радиосвязи» содержала лишь краткую аннотацию диссертации В.А. Котельникова. Слабая осведомленность специалистов об этой теории в первые годы после ее создания, объясняется также тем, что Котельников в течение 10 лет не публиковал свои результаты. Только в 1956 г., когда в этом направлении за рубежом появились многочисленные работы, часть из которых была переведена на русский язык, его диссертация была наконец опубликована в виде отдельной книги. Об этом приходится только сожалеть, так как столь долгая задержка с публикацией уменьшила влияние этой выдающейся работы на развитие новой области знания.

Диссертация В.А. Котельникова имела несколько разделов.

В первом — изложены математические основы теории: сигналы и шумы с гауссовским распределением представлялись рядами Фурье.

Во втором — развита теория оптимального приема дискретных сигналов, изложены основы синтеза оптимального алгоритма обработки принимаемого сигнала на базе формулы Байеса, определяющей апостериорную вероятность приема сигнала; синтез оптимального приемника заключался в реализации с помощью радиотехнических узлов алгоритма обработки сигналов, выполняющего операции формирования на выходе приемника напряжений, пропорциональных значению апостериорной вероятности приема для каждого из возможных полезных сигналов. Приемник, выбирая максимальное из этих напряжений, принимал решение о том, какой из сигналов был передан. Котельников показал, как определить помехоустойчивость приема сигналов путем вычисления вероятности ошибочного приема.

В работе рассмотрено много интересных примеров применения развитой теории для сигналов с фазовой манипуляцией (фазовая телеграфия), с амплитудной (амплитудная телеграфия), с частотной (частотная телеграфия), а также для ортогональных многопозиционных и составных и для приема сигналов при нормальной флуктуационной помехе с интенсивностью, зависящей от частоты.

Котельниковым исследован не только оптимальный прием сигналов, но и прием сигналов с использованием синхронного и обычного детекторов. Показано, что различие помехоустойчивости традиционных и оптимальных методов в рассмотренных случаях незначительно.

В третьем разделе развита теория оптимальной оценки параметров сигналов (например, таких, как амплитуда, частота или фаза). Эта теория составила основу для синтеза оптимальных устройств, предназначенных для приема аналоговых сигналов с разными видами модуляции. Продемонстрировано применение новой теории для определения точности оценки параметров сигналов при разных видах модуляции. Эта точность соответствовала точности оценок в традиционных устройствах приема сигналов.

В самом общем виде рассмотрена помехоустойчивость почти всех применяемых на практике в те годы методов модуляции: амплитудный, частотный и импульсный. Показано, что для всех нелинейных методов модуляции принципиально характерно явление порога при приеме слабого сигнала. Котельников разработал методику оценки пороговых характеристик. Его большой заслугой явилось привлечение понятий многомерного пространства для наглядного пояснения полученных результатов. Небольшая по объему книга Котельникова (всего 150 с.) содержала множество глубоких идей, которые получили развитие в работах других ученых. Книга указала инженерам совершенно новый подход к созданию техники приема сигналов.

Как уже отмечалось, в работе Котельникова не было полезных для инженеров, в чисто утилитарном смысле, практических рекомендаций. Однако следует задуматься, каковы должны быть критерии оценки полезности результатов работы? Теория Котельникова значительна уже тем, что она открывала новую научную область и заложила ее фундамент. В этой области стали интенсивно трудиться сотни, а может быть, и тысячи ученых, которые сделали ее рабочим инструментом инженеров, работающих над реальными техническими проектами. Она изменила стиль их мышления и ввела в обиход такие новые понятия, как оптимальная (в данных условиях) система приема и потенциальная помехоустойчивость приема. Для любого квалифицированного специалиста, изучившего эту теорию, а не только для весьма немногочисленных энтузиастов-изобретателей, действующих по наитию и основывающихся исключительно на

мощи своей интуиции, стало возможным определять структурную схему оптимального устройства приема и создавать реальные приемники.

В 1959 г. в США был издан перевод книги В.А. Котельникова. В рецензии на нее профессор Стенфордского университета Н.М. Абрамсон отметил приоритет Котельникова в создании теории оптимального приема сигналов, в применении методов многомерной геометрии для интерпретации проблем, связанных с приемом сигналов на фоне шума, а также в исследовании проблем нелинейной фильтрации сигналов на фоне шума с неравномерным спектром.

К сожалению, Котельниковым не была выявлена связь теории потенциальной помехоустойчивости с математической теорией статистических решений, основы которой были заложены еще в 20–40-х гг. крупными математиками Р. Фишером, Дж. Нейманом, Е. Пирсоном и А. Вальдом.

Однако то, что он, по существу, самостоятельно переоткрыл основные положения этой весьма абстрактной и сложной математической теории применительно к имеющим огромное прикладное значение конкретным задачам, связанным с приемом сигналов на фоне помех, делает в интеллектуальном плане его научные достижения особенно замечательными.

В последующие годы развитие теории Котельникова проходило по следующим направлениям:

- теория приема дискретных сигналов в каналах с замираниями и многолучевостью;
- теория приема сигналов с аналоговой модуляцией, когда в месте приема оценке подлежит не информационный параметр, а случайный временной процесс;
- марковская теория оптимального приема;
- теория приема сигналов при помехах от других систем;
- теория приема многопозиционных сигналов.

Сегодня мы являемся свидетелями «взрывного» развития электросвязи — области техники, которая обеспечивает удовлетворение одной из самых насущных потребностей человеческого общества — потребности в общении и в обмене информацией и опытом, невзирая на разделяющие их расстояния. Это развитие предопределено в том числе и сравнительно недавно открытыми законами электросвязи. Значение теории Котельникова для создания новых систем связи сравнимо со значением теорий Ньютона, Максвелла и Эйнштейна, которые лежат в основе создания современных механизмов, транспорта, атомной энергетики и т.п. Теория Котельникова дала новое направление научной мысли. В этом направлении стали работать многие ученые и инженеры, развивая эту теорию и применяя ее к актуальным практическим задачам. Прав был знаменитый французский физик Луи де Броль, утверждая: *«Мы никогда не должны забывать, что каждый успех нашего познания ставит больше проблем, чем решает, и что в этой области каждая новая открытая земля позволяет предположить существование еще не известных нам необъятных континентов».*

Начиная с 60-х гг. в учебных институтах, готовящих специалистов в области передачи, приема и обработки сигналов, на основе двух фундаментальных разделов общей теории связи — теории потенциальной помехоустойчивости Котельникова и теории информации Шеннона вводится новый учебный курс «Передача сигналов по каналам связи». Теория связи становится обязательным элементом образования инженеров, специализирующихся в области радиотехники и электросвязи.

Заключение

Уровень интеллекта, профессионализм и человеческие качества личности не всегда связаны друг с другом. У В.А. Котельникова они находились в полной гармонии.

По воспоминаниям одного из его учеников А.Л. Зиновьева, сменившего В.А. Котельникова на посту декана РТФ в МЭИ, с ним «...было нетрудно вступать в беседу и находить общий интерес. Единственно, чего он никогда не допускал, это грубого слова, и не прибегал к нему сам. Чтобы завязать с ним беседу, достаточно было затронуть либо какую-нибудь оригинальную или малопонятную тему (например, НЛО, телекинез, парапсихология и пр.), либо заговорить о хобби. Свои пристрастия Котельников не выпячивал, но и не скрывал. Очень увлекающийся человек, он всегда старался глубоко разобраться в предмете своего увлечения.

В начале 50-х годов он увлекся любительским кино и досконально изучил аппаратуру, домашние средства проявления и монтажа, вносил разные усовершенствования. В 60-х годах он с коллегами по МЭИ приобрели яхты. Котельников предложил для улучшения ходовых качеств яхты увеличить поверхность боковых шверт, и некоторые этим предложением воспользовались.

Он был заядлым автолюбителем. Вначале у него был автомобиль «Победа», затем «Волга». Он часто предлагал всякого рода улучшения заводского изделия.

Как всякий уважающий себя умелец, восстановлением бытовой электро- и радиоаппаратуры всегда занимался сам. Любил спорт и зимой катался не только на обычных, но и на горных лыжах».

В.А. Котельников был счастлив в семейной жизни. Его жена Анна Ивановна долгие годы работала преподавателем на кафедре радиоприемников в Московском электротехническом институте связи. У них трое детей. Сын Александр (1940—2000 гг.) окончил Московский электротехнический институт связи и работал в этом же институте, две дочери — Наталья и Марина, окончившие соответственно физический и химический факультеты МГУ, работают в институтах РАН. У В.А. Котельникова семь внуков.

В наше время трудно найти образованного человека, который был бы совершенно нечувствителен к красоте идей, хотя их красоту, так же как красоту художественного полотна, музыкального произведения или поэмы, определить непросто. Тем не менее, люди с развитым интеллектом обладают способностью оценить эстетическую привлекательность идей. Научные идеи направлены на познание истины. Как говорил великий Галилей, *«Истина и Красота — одно и то же, так же как одно и то же ложное и безобразное»*.

Согласно Эйнштейну наиболее объективный критерий истинности научной теории — это ее «внутреннее совершенство и внешнее оправдание». Поэтому к оценке научных достижений можно подходить с нескольких позиций. Одна из них — утилитарная, учитывающая практическую пользу того или иного достижения, т.е. те изменения в жизни человечества, к которым оно может привести. Данный критерий является явно недостаточным, так как значительной практической полезностью могут обладать и примитивные, поверхностные результаты.

Другой, более глубокий и сложный, критерий ценности научных достижений, определяющий их «внутреннее совершенство», является эстетическим. Он основан на интуитивном чувстве прекрасного. Такое чувство присуще лишь наиболее крупным

ученым, способным оценить глубину новых идей и их влияние на духовное развитие человечества.

Теория потенциальной помехоустойчивости Котельникова в момент ее появления, безусловно, имела, по Эйнштейну, «внутреннее совершенство» и удовлетворяла первому из упомянутых выше критериев. Прошло немного времени, и эта теория была развита многими исследователями и применена к огромному числу практических задач. Таким образом, она получила и внешнее оправдание.

Однако существует еще один аспект, который не следует упускать из вида при рассмотрении научных достижений. Необходимо помнить, что за каждым из них стоит огромный самоотверженный труд их творцов, труд, который порой заполняет всю их жизнь, заставляя отказываться от многих человеческих радостей. Пример жизни подвижников науки поднимает человечество на новую моральную высоту. Недаром немецкий философ Ницше писал: *«Каждый серьезный труд оказывает на нас моральное воздействие. Усилие, делаемое нами для того, чтобы сосредоточить свое внимание на заданной теме, можно сравнить с камнем, брошенным в нашу внутреннюю жизнь: первый круг невелик по площади, число чередующихся кругов увеличивается, и сами они расширяются».*

Жизнь выдающегося отечественного ученого В.А. Котельникова является ярким подтверждением этой важной и глубокой мысли.

Художник создает свои образы из форм и цветов, поэт — из слов. Ученый формирует образы из новых идей, и они становятся той почвой, на которой рождаются другие новые идеи, воплощаемые в конкретные материальные объекты. В.А. Котельников, подобно художникам и поэтам, создавал новые образы из новых научных идей. Его идеи породили поток других новых идей, других ученых, обусловили бурное развитие систем связи и создали предпосылки к переходу к глобальному информационному обществу.

Литература

1. *Зиновьев А.Л.* Мой учитель Котельников // Радиотехнические тетради. ОКБ МЭИ. 1995. № 7.
2. *Филитов Л.И.* Наш золотой педагогический венец // Радиотехнические тетради. ОКБ МЭИ. 1995. № 7.
3. *Богомолов А.Ф., Победоносцев К.А.* Вклад Особого конструкторского бюро МЭИ в развитие отечественной ракетно-космической радиоэлектроники // Радиотехнические тетради. — ОКБ МЭИ. 1995. № 7.
4. Академик Владимир Александрович Котельников (К 90-летию со дня рождения) // Радиотехника. 1998. № 8.
5. *Соколов А.В., Филитов Л.И.* Теория потенциальной помехоустойчивости как основа статистической радиотехники // Радиотехника. 1998. № 8.
6. Основоположник отечественной засекреченной телефонной связи / Н.Н. Андреев, А.П. Петерсон, К. В. Прянишников, А. В. Старовойтов // Радиотехника. 1998. № 8.
7. *Быховский М.А.* Круги памяти // Сер. изданий «История электросвязи и радиотехники». М.: Мобильные коммуникации, 2001. Вып. 1.

Борис Рувимович ЛЕВИН

Этика есть поддержание жизни на наивысшем уровне ее развития как своей собственной, так и другой жизни — путем самоотдачи, проявляющейся в помощи и любви; при этом оба аспекта этики — самоусовершенствование и самоотречение — взаимосвязаны.

Альберт Швейцер



Введение

Ученых можно условно отнести к нескольким категориям, одна из которых первопроходцы. Это творцы, выдвигающие новые идеи и открывающие человечеству новые пути в тех или иных областях науки. К другой категории относятся созидатели, развивающие и детально прорабатывающие эти идеи, доводя их до практического воплощения. К третьей — относятся учителя и просветители, систематизирующие и обобщающие новые идеи, чтобы сделать их доступными и очевидными для всех истинными. Борис Рувимович Левин являлся в первую очередь учителем и просветителем.

Середина XX в. стала периодом революционных открытий в теории связи. Вместо господствовавших почти столетие детерминистских принципов было установлено, что закономерности, связанные с передачей и приемом сообщений, имеют статистическую природу. В теории связи стали утверждаться новые понятия и новые фундаментальные закономерности, которые указывали новые пути создания эффективных систем связи.

Новые идеи основывались на использовании теории вероятностей и случайных процессов, с которыми не были знакомы инженеры в области радиотехники и связи. Для реализации этих идей в конкретных технических разработках требовались высокообразованные специалисты, способные самостоятельно развивать эту теорию и творчески применять знания при создании новых систем связи. Следовало коренным образом перестроить систему образования в высших учебных заведениях, занимающихся подготовкой специалистов в данной области. Для этого нужны были учителя, которые могли бы нести свет добытых знаний и сделать их доступными многим.

Одним из таких учителей был замечательный отечественный ученый Борис Рувимович Левин, который внес огромный вклад в систематизацию многочисленных результатов в области статистической радиотехники и ее распространение среди специ-

алистов. Основным делом его жизни, потребовавшим колоссального труда и высочайшей квалификации, явилось создание монографий и книг по статистической радиотехнике. Он был одним из первых в мире, кто в своих книгах методически изложил основные результаты, полученные многими исследователями. В его книгах нашли также отражение исследования, проведенные им самим и вместе с многочисленными учениками. По его инициативе в нашей стране был опубликован на русском языке ряд основополагающих книг по статистической теории связи. Изданные за рубежом, они появлялись буквально через несколько месяцев после их выхода на языке оригинала. Теория связи быстро распространялась, и расширялся круг специалистов, обладающих в этой области солидной подготовкой. Это было одной из предпосылок значительного прогресса в технике передачи информации связи, который произошел в последние десятилетия XX в.

Лекции по статистической радиотехнике в Московском электротехническом институте связи (МЭИС — ныне МТУСИ), которые читал профессор Левин, и проводимые им семинары охватывали обширный круг вопросов статистической радиотехники и привлекали широкую аудиторию студентов, аспирантов, молодых ученых и крупных специалистов в области связи.

Биографический очерк

Борис Рувимович Левин родился 24 июня 1919 г. в Донецке. Еще в школе он увлекся математикой и твердо решил после окончания школы поступать на механико-математический факультет МГУ. Закончив в 1937 г. среднюю школу с золотой медалью, он успешно сдал вступительные экзамены в МГУ, который в 1941 г. окончил с отличием.

Началась Великая Отечественная война. Способного математика направляют для подготовки к воинской службе в Военно-воздушную инженерную академию (ВВИА) им. проф. Н.Е. Жуковского. Р.Б. Левин с отличием оканчивает ее в 1945 г.

В течение двух лет Б.Р. Левин служит инженером эскадрильи в военно-воздушных силах Советской армии. В 1947 г. его демобилизовали. Затем пять лет он работает научным сотрудником на предприятиях Министерства сельского машиностроения. Занимается механикой — проблемами, связанными с созданием эффективных двигателей. Исследования в этом направлении легли в основу его диссертации, и в 1950 г. он становится кандидатом технических наук. На базе выполненных исследований совместно с В.К. Кошкиным он издает книгу «Двигатели со свободно движущимися поршнями» (Машгиз. 1954). Эта оригинальная книга в 1959 г. была переведена на китайский язык. Вторая книга Б.Р. Левина (совместно с В.К. Кошкиным, И.Н. Кутыриным и Б.П. Борисовым) «Двигатели со свободно движущимися поршнями в теплосиловых установках» была издана в 1957 г.

К проблемам радиотехники он обратился только в 1952 г. в возрасте 33 лет. Он работал на предприятии Министерства радиотехнической промышленности (МРП) научным сотрудником, а с 1964 г. — начальником лаборатории. В 1968 г. он переходит на работу в Яузский радиотехнический институт и возглавляет там лабораторию.

Б.Р. Левин принимает активное участие в оборонных разработках, выполняемых в научно-исследовательских институтах. Это было разнообразное радиотехническое оборудование (многоканальные радиорелейные системы связи, радиолокационное оборудование и др.), производимое на предприятиях МРП. Проектирование таких систем было тесно связано с решением проблемы обеспечения их помехоустойчивости, т.е. с оценкой степени влияния флуктуационных помех на прием сигналов.

Всего несколько лет потребовалось Левину, чтобы самостоятельно творчески освоить многочисленные научные результаты, полученные его предшественниками. Он приступает к формированию одного из первых в мире учебных курсов по статистической радиотехнике, и уже в 1954 г. в одном из ведомственных изданий небольшим тиражом выходит его первая книга в этой области «Методы случайных процессов, применяемые в радиотехнике».

Б.Р. Левин интенсивно работал и выполнял оригинальные исследования, вошедшие в его докторскую диссертацию, которую успешно защитил в 1963 г. С 1964 г. он совмещал исследовательскую работу в научных институтах МРП с преподаванием статистической радиотехники в МЭИС. В 1965 г. он становится профессором кафедры радиотехнических систем (РТС) в этом институте. Однако в течение ряда лет Левин оставался научным консультантом в Яузском радиотехническом институте и не порывал связи с производством.

Древняя мудрость гласит: *«Будь осторожен в преподавании, ибо ошибка в преподавании равносильна умышленному греху»*. Борис Рувимович полностью посвятил себя преподавательской и исследовательской деятельности и никогда не занимал в институте административных постов. Он читал лекции для студентов старших курсов и аспирантов, писал книги, организовывал научные конференции. Им было подготовлено 34 кандидата и четыре доктора наук.

Б.Р. Левин был одним из самых авторитетных отечественных ученых в области статистической радиотехники. Им были написаны девять статей, посвященных теории шумов и статистических решений, для Большой советской энциклопедии. Его приглашали читать лекции в университеты Венгрии, Германии, Польши, Китая, Болгарии. Он был инициатором организации многих международных семинаров по статистической теории связи — в СССР, ГДР, Болгарии. Эти семинары способствовали укреплению научных связей ученых-радиотехников разных стран.

Левин самостоятельно и вместе со своими учениками написал более 250 научных статей и монографий. Ряд его статей опубликован в «Трудах Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике» (IEEE).

Он входил в редколлегию журнала «Радиотехника и электроника», был членом Научного совета Академии наук СССР по проблеме «Статистическая радиофизика», возглавляемого академиком Ю.Б. Кобзаревым, руководил секцией «Теория информации» НТОРЭС им. А.С. Попова. Большую роль в активизации научных исследований в различных городах нашей страны сыграли проводимые им выездные всесоюзные научные семинары.

Б.Р. Левин являлся членом редакционного совета издательства «Радио и связь». По его инициативе в нашей стране стала издаваться серия монографий «Статистическая теория связи», ответственным редактором которых был он. При его жизни крупными отечественными учеными было издано 30 книг этой серии.

За цикл работ по статистической теории радиоэлектронных систем и устройств, опубликованных в 1966—1986 гг., он вместе с другими крупными учеными (И.А. Большаков, Ю.П. Борисов, Л.С. Гуткин, В.Б. Пестряков, М.В. Максимов, Р.Л. Стратонович, Г.П. Тартаковский, Ю.Г. Сосулин, С.Е. Фалькович, Я.Д. Ширман) в 1988 г. стал лауреатом Государственной премии.

Б.Р. Левин был счастлив в семейной жизни. Его жена Бронислава Борисовна, по специальности архитектор, полностью посвятила себя мужу. Они воспитали двоих детей — дочь Елену и сына Романа, которые окончили МЭИС. Дочь работала научным сотрудником в Радиотехническом институте им. академика А.Л. Минца, а сын был редактором научно-технического журнала «Электросвязь» и стал талантливым журналистом и менеджером.

Борис Рувимович Левин скончался 12 марта 1991 г.

Просветительская и научная деятельность

Главным делом жизни Б.Р. Левина стало создание научных монографий по статистической радиотехнике, которые явились одними из первых в мире книг по данной тематике.

В своих книгах Б.Р. Левин стремился дать ученым и инженерам, работающим над созданием новых радиотехнических систем, теоретический инструмент для проведения исследований и расчетов. Знание методов статистической радиотехники необходимо как для анализа, так и для синтеза оптимальных устройств и систем различного назначения. Эти книги пользовались большой популярностью и были переведены на чешский, польский, венгерский, китайский, французский и испанский языки. По ним изучали теорию связи тысячи специалистов не только в нашей стране, но и за рубежом.

На основе опубликованной в 1954 г. книги «Методы случайных процессов, применяемые в радиотехнике», имевшей ограниченное распространение, издательство «Советское радио» в 1957 г. большим тиражом издало книгу «Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике», которая имела в нашей стране громадный успех и была переиздана в 1960 г. В 1958 г. ее перевели на китайский язык.

В 1966—1968 гг. после значительной переработки и дополнения книги была выпущена двухтомная монография «Теоретические основы статистической радиотехники». В 1974—1976 гг. она также была доработана и переиздана. При переиздании был написан третий том, в который включены новые результаты теории статистического синтеза информационных систем в условиях априорной неопределенности и результаты, полученные Б.Р. Левиным и его учениками.

Для радиоинженеров, желающих ознакомиться с наиболее широко применяемыми в радиотехнике математическими методами, в 1968 г. крупными отечественными учеными И.А. Большаковым, Л.О. Гуткиным, Б.Р. Левиным и Р.Л. Стратоновичем была выпущена небольшая книга «Математические основы современной радиотехники». В ней рассмотрены математические методы описания сообщений, сигналов и помех, методы анализа процессов в линейных и нелинейных системах, методы синтеза оптимальных радиосистем, даны элементы теории информации и теории надежности.

Под редакцией Б.Р. Левина в 1979 г. издается еще одна коллективная монография «Статистическая теория связи и ее практическое применение», содержащая, в частности, подготовленный Б.Р. Левиным обстоятельный исторический обзор развития теории связи. Эта книга охватывала не только значительную часть статистической теории связи — теорию оптимального приема сигналов, кодирование и декодирование, вероятностные модели сигналов, помех и каналов связи, но и ряд прикладных вопросов техники связи, таких как теория шумоподобных сигналов, анализ помех и искажений в многоканальных системах, описание систем спутниковой связи, методы анализа электромагнитной совместимости. Она давала широкую панораму развития теории связи за 45 лет.

В 1985 г. профессор Б.Р. Левин совместно с профессором Дрезденского технического университета Вольфгангом Шварцем выпустил книгу «Вероятностные модели и методы в системах связи и управления». Значение этой книги заключалось в том, что в ней был предложен единый методологический подход к изучению статических и динамических стохастических систем с дискретным и непрерывным временем. На базе вероятностных моделей рассмотрены методы решения задач синтеза и анализа алгоритмов обработки сигналов в системах связи и управления.

Активная просветительская деятельность Б.Р. Левина проявилась также в том, что, будучи ответственным редактором серии научных монографий по статистической теории связи, издаваемых с 1974 г. издательством «Радио и связь», он организовал подготовку более 30 оригинальных монографий в этой области, написанных видными отечественными и зарубежными учеными.

По инициативе Б.Р. Левина и под его редакцией в нашей стране издавались переводы книг крупнейших зарубежных ученых, которые сыграли важную роль в развитии отечественных исследований в области теории связи и в подготовке специалистов высшей квалификации.

Под редакцией Б.Р. Левина в 1961–1962 гг. была выпущена двухтомная монография выдающегося американского ученого Д. Миддлтона «Введение в статистическую теорию связи», а в 1966 г. — «Очерки теории связи».

Важным событием в научной жизни отечественных специалистов было издание книги «Лекции по теории систем связи», перевод которой на русский язык под редакцией Б.Р. Левина вышел в 1964 г. в издательстве «Мир». Эта книга содержала цикл лекций, прочитанных в Массачусетском технологическом институте известными специалистами в области статистической теории связи.

Книга американского ученого Р. Деча «Нелинейные преобразования случайных процессов», изданная в 1965 г., была посвящена основным методам решения ряда нелинейных задач теории случайных процессов.

Книга другого крупнейшего американского ученого Э.Д. Витерби «Принципы когерентной связи» была издана в 1970 г.

В 1976 г. вышел перевод книги Э.П. Сейджа и Дж. Мелса «Теория оценивания», в которой систематически излагались вопросы оптимальной линейной и нелинейной фильтрации, экстраполяции и интерполяции случайных сигналов, принимаемых на фоне помех. Последней книгой, переведенной на русский язык под редакцией Б.Р. Левина, была книга Э.П. Сейджа и Ч.С. Уайта «Оптимальное управление системами», изданная в 1982 г.

Все названные издания давали возможность нашим специалистам ознакомиться с результатами, полученными крупнейшими зарубежными учеными.

Собственные научные исследования велись Б.Р. Левиным в следующих направлениях: перекрестные искажения в многоканальных системах связи, теория выбросов случайных процессов, статистическое уплотнение многоканальных систем связи, энергетические спектры импульсных случайных процессов, теория оптимального приема сигналов, в том числе теория приема сигналов в условиях статистической неопределенности, а также теория надежности. Они явились существенным вкладом в теорию связи и ее практические приложения.

В 60-х гг., работая в НИИ МРП, Левин разработал методику определения энергетических спектров сигналов, передаваемых в многоканальных системах с импульсной модуляцией. Кроме того, в соавторстве с В.И. Айзенбергом и В.С. Розановым он предложил и исследовал многоканальную систему с интервально-временной импульсной модуляцией (ИВИМ). Статья опубликована в журнале «Электросвязь» (1960. № 6). В этой системе, в отличие от традиционных импульсных систем (например, с фазово-импульсной модуляцией — ФИМ), информация о значении передаваемого сигнала содержалась не в отклонении временного положения импульса от тактовой точки, а в значении временного интервала между соседними импульсами. В системе ИВИМ легко реализовывались принципы статистического уплотнения канала связи, так как в одном кадре длительностью 125 мкс появлялась возможность организовать большее число каналов, чем в системе ФИМ.

Одной из актуальных научных проблем во второй половине XX столетия было создание методов расчета нелинейных искажений в радиорелейных линиях (РРЛ) связи с частотной модуляцией [1]. Эта проблема разрабатывалась многими крупными учеными: в нашей стране — С.В. Бородичем, в США — С.О. Райсом, в Великобритании — Р.Г. Медхэрстом и др. Однако в их работах рассматривался лишь случай, когда по РРЛ передаются сигналы многоканальной телефонии. Б.Р. Левиным, совместно с коллегами Л.П. Меркадером и Ю.П. Максимовым, было выполнено исследование (Электросвязь. 1960. № 4) часто встречающегося на практике случая, когда в одном стволе РРЛ одновременно передаются сигналы как многоканальной телефонии, так и телевидения.

Другое важное направление научных исследований Б.Р. Левина, которое он в конце 60-х гг. разрабатывал вместе со своими аспирантами, — теория выбросов случайных процессов. Ее основы были заложены в середине 40-х гг. классическими работами С.О. Райса. Задача нахождения распределений различных параметров выбросов случайных процессов весьма сложна. Приближенные методы разрабатывались в 50-х гг. крупными отечественными учеными П.И. Кузнецовым, Р.Л. Стратоновичем и В.И. Тихоновым. В цикле работ Б.Р. Левина и его аспиранта (ныне профессора) Я.А. Фомина был предложен новый приближенный метод определения распределения вероятностей длительности выбросов огибающей и фазы случайного сигнала, среднего числа выбросов и т.д. Суть метода, названного авторами методом опорных импульсов, состоит в замене реализации случайного процесса последовательностями примыкающих друг к другу прямоугольных импульсов одинаковой длительности (опорных). В этой модели может быть учтена корреляционная связь между случайными амплитудами соседних импульсов, а выброс процесса рассматривается как серия следующих подряд нескольких опорных импульсов, амплитуда которых превышает заданный уровень.

Наиболее значительные научные результаты Б.Р. Левина опубликованы в цикле его работ, посвященных теории оптимального приема сигналов в условиях априорной неопределенности.

Большое число оригинальных статей Б.Р. Левина посвящено проблеме теории надежности, в том числе методам оценки надежности элементов радиоаппаратуры и резервирования. Эти проблемы активно разрабатывались им начиная с середины 50-х гг. Результаты он включил в книгу «Теория надежности систем (математические основы)», вышедшую в 1978 г. Она написана по материалам курса лекций по теории надежности, которые Левин читал на факультете повышения квалификации преподавателей в МЭИС. Помимо общей теории работа содержала рассмотрение конкретных задач теории надежности радиоэлектронного оборудования. Эта книга остается одной из лучших в данной области.

По теории надежности радиоэлектронного оборудования Б.Р. Левиным переведены также три книги: Д. Коудена «Статистические методы контроля качества» (1961 г.), И. Базовского «Надежность: теория и практика» (1964 г.) и «Справочник по надежности» (1969 г.).

Педагогическая деятельность

Борис Рувимович Левин был замечательным педагогом. Ученики относились к нему с большой любовью и уважением. Воспоминания одного из них – профессора МТУСИ Ю.С. Шинакова дают представление о его педагогических принципах и человеческом облике:

«Б.Р., как часто его звали ученики, любил заниматься молодежью и уделял много времени своим аспирантам, которых у него всегда было много. Я был свидетелем его разговора с немецким коллегой, которому он на немецком языке говорил: "...я в настоящее время имею 16 аспирантов". При их подборе он был достаточно строг, его консультации чаще всего сводились к формулировке идеи, оценке результатов работы аспирантов, рекомендациям публикаций по обсуждаемой теме. Хотя он работал, в основном, с инженерами, он фактически оставался всю жизнь математиком. Как математик он сформировал вокруг себя молодежь, увлекающуюся, в первую очередь, математическими проблемами тех технических задач, которые были актуальными в радиотехнике в соответствующее время. Он был сторонником четкого "разделения труда" между математиками и инженерами: на защитах диссертаций часто подчеркивал, что прогресс радиотехники будет более быстрым и более полезным для человека, если любую радиотехническую проблему будут решать вместе математик и радиоинженер. Математик создаст алгоритм, а радиоинженер реализует этот алгоритм с помощью средств радиоэлектроники. Не все были согласны с этой точкой зрения. Многие требовали от него результатов внедрения в технику. Но он всегда на первое место в любой научной работе ставил умение аккуратно формализовать любую техническую проблему, в результате чего должна быть сформулирована математическая задача, адекватная исходной технической проблеме.

Хотелось бы отметить еще одну черту характера Левина – тщательность методических разработок всех его конспектов для студентов и аспирантов. Я всегда поражался его терпению и трудоспособности, которые были необходимы для того, чтобы в

рукопись книги или конспект, отпечатанные на пишущей машинке, лично вписать все формулы (их много, они сложные) с последующей их разметкой, аккуратно изготовить все рисунки. Он всегда соблюдал все свои договоренности, тщательно планировал свое время и больше всего любил работать дома, где его жена и близкий друг Бронислава Борисовна старалась создать ему хорошие условия. Я часто наблюдал, как он делал пометки в своем еженедельнике против моей фамилии, куда он записывал план нашей совместной работы при очередной встрече.

Бронислава Борисовна передала в дар институту часть его домашней научной библиотеки, которая у него была очень обширной. Лучшие книги из его коллекции и в настоящие дни хранятся в специальном шкафу в научном зале библиотеки МТУСИ и доступны для преподавателей и аспирантов».

Заключение

Иосиф Бродский высказал как-то следующую мысль: *«Человек, написавший книгу, создал условия для распространения человеческого опыта со скоростью переворачивания страницы»*. Это действительно так. К тому же высказывание Бродского имеет непосредственное отношение к Борису Рувимовичу Левину.

Замечательные книги Б.Р. Левина давали не только новые знания. Написанные с любовью и безукоризненной ясностью, они доставляли эстетическое наслаждение тем, что при их чтении ощущалась красота и грандиозность теории, позволяющей одним мысленным усилием, «на кончике пера» решать сложнейшие задачи анализа и синтеза широкого класса радиотехнических систем. Его книги стимулировали у читателей творческую активность, тем самым способствуя утверждению в жизни этических принципов, указанных в эпиграфе к данной статье.

Б.Р. Левин был высокообразованным человеком: имел два высших образования, владел немецким, французским и английским языками.

После Б.Р. Левина осталось богатое наследие: это его собственные книги, которые явились мощным катализатором, и его многочисленные ученики — кандидаты и доктора наук, которые ныне продолжают начатое им благородное дело по воспитанию нового поколения «неофитов», выбравших для себя обширное поле статистической радиотехники для современных и будущих научных исследований.

Жизненный путь Б.Р. Левина подтверждает справедливость глубокой мысли знаменитого философа Спинозы, что *«...самое полезное в жизни — совершенствовать свое познание и ум, и в этом состоит высшее счастье и блаженство человека»*.

Литература

1. Быховский М.А. Круги памяти // Сер. изданий «История электросвязи и радиотехники». М.: Мобильные коммуникации. 2001. Вып. 1.

Виктор Семенович Мельников

*Только размер потери и делает
смертного равным Богу.*

Иосиф Бродский



Введение

Один из печальных и трудноосознаваемых феноменов истории отечественной науки состоит в том, что достижения выдающихся наших ученых, имеющие порой мировой приоритет, часто не вливаются в мировую науку, оставаясь неизвестными за рубежом и не оказывая должного влияния на ее развитие. Печально также то, что имена ученых — творцов этих достижений нередко предавались забвению на родине.

Так было, например, с результатами научной деятельности великого русского ученого М.В. Ломоносова, открытия которого стали широко известными русской и зарубежной научной общественности только в 1902 г. благодаря энтузиазму и историческим исследованиям русского химика Б.Н. Меншуткина, опубликованным к полуторавековому юбилею первой русской химической лаборатории, основанной М.В. Ломоносовым.

О результатах исследований выдающегося русского электротехника, первооткрывателя электрической дуги профессора В.В. Петрова мировой науке также стало известно только в конце XIX в., почти через столетие после его смерти, когда студент Санкт-Петербургского университета И.А. Гершун, впоследствии профессор, будучи на каникулах в городе Вильно, случайно обнаружил его труды и опубликовал статью о своем открытии в журнале «Электричество».

Уже в наше время, в 40-х гг. была отклонена как бесполезная заявка на изобретение лазера, поданная советским физиком В.А. Фабрикантом, и о ней надолго забыли. Вновь это открытие было сделано через 12 лет, и отечественным (Н.Г. Басову и А.М. Прохорову) и американскому (Ч. Таунсу) ученым в 1964 г. была присуждена Нобелевская премия в области физики.

Судьба не была благосклонной к Виктору Семеновичу Мельникову — крупному ученому, специалисту в области радиоприемной техники, внесшему весьма значительный вклад в развитие теории передачи дискретных сигналов. Прошло уже почти 40 лет с того дня, «...как дверь он запер на цепочку лет», и сегодня, к сожалению, память об этом незаурядном и талантливом человеке хранит лишь небольшое число его коллег и сотрудников. А ведь с именем этого человека связаны яркие страницы в истории российской науки.

В.С. Мельников был одним из тех, кто в числе первых осознал значение теории потенциальной помехоустойчивости для конструирования систем передачи по радиоканалам с замираниями и внес весьма существенный вклад в ее развитие.

Биографический очерк

Виктор Семенович Мельников родился 13 февраля 1911 г. в Иркутске в семье профессионального русского революционера. Его отец был активным участником Октябрьской революции, во время колчаковского мятежа в 1919 г. был расстрелян. Мать его была фельдшером. Ей пришлось воспитывать сына одной. В 1930 г. Мельников окончил среднюю школу в городе Улан-Удэ и в течение года работал радиомонтером в конторе связи. Мечта получить высшее образование и стать специалистом в новой, перспективной области — радиосвязи повела его в Москву. С 1931 по 1937 г. он студент Московского института инженеров связи МИИС, ныне МТУСИ. Способный молодой инженер В.С. Мельников после окончания института был оставлен в аспирантуре на кафедре радиоприемных устройств.

В 1938 г. Мельникова приглашают в Центральный научно-исследовательский институт связи (ЦНИИС), единственный в те годы ведомственный институт Министерства связи СССР, где он возглавляет лабораторию радиоприемных устройств. С 1939 по 1959 г. в лаборатории В.С. Мельникова разрабатывается разнообразное радиоприемное оборудование магистральной телеграфной связи для работы по коротковолновым радиоканалам буквопечатающих аппаратов Бодо и Крида, создается специальная аппаратура. В 40—50-е гг. коротковолновая связь была единственным видом магистральной радиосвязи, имевшей для страны чрезвычайно важное значение. Разработки В.С. Мельникова были внедрены во время Великой Отечественной войны на магистральной линии Москва — Иркутск, связывавшей центр государства с удаленными районами Дальнего Востока, а также в Бутовском приемном центре под Москвой.

Работы В.С. Мельникова получили признание. В 1945 г. ему присваивается звание «Мастер связи», в 1950 г. он становится лауреатом Сталинской премии, а в 1951 и 1954 гг. его награждают медалями «За трудовое отличие» и «За трудовую доблесть».

В течение почти 20 лет, начиная с 1939 г., В.С. Мельников поддерживает тесные связи с кафедрой радиоприемных устройств Московского института инженеров связи, возглавляемой известным специалистом в области радиоприемной техники профессором Н.И. Чистяковым. С 1956 г. В.С. Мельников — доцент этой кафедры.

В 1949 г. Министерство связи для разработки проблем радиосвязи организует новый специализированный институт НИИ-100, который становится одним из ведущих институтов страны в области систем радиосвязи и радиовещания. Этот институт с 1964 г. называется Научно-исследовательским институтом радио (НИИР). В НИИ-100 в 1949 г. переводятся все научные лаборатории ЦНИИС, занимающиеся проблемами радиосвязи, в том числе и лаборатория В.С. Мельникова.

В 50-е гг. В.С. Мельников уже становится одним из авторитетнейших отечественных специалистов в области радиосвязи. Он руководит секцией связи в Техническом совете Министерства связи СССР, а в 1953 г. возглавляет разработку Генеральной

схемы развития радиосвязи и радиовещания в СССР, которой Министерство связи руководствовалось вплоть до 60-х гг. В течение ряда лет Мельников был членом редколлегии популярного журнала «Радио».

В середине 50-х гг. научные исследования указывают на возможность использования новых механизмов распространения радиоволн путем их рассеяния от неоднородностей электронной плотности ионосферы, вызванных в том числе следами метеоров, попадающих в атмосферу Земли из космического пространства. Достоинством систем радиосвязи, использующих эти механизмы распространения радиоволн, по сравнению с коротковолновой связью, являлась весьма высокая надежность линий связи, что особенно важно для районов Севера, в которых магнитные бури в годы повышенной солнечной активности часто приводили к длительным перерывам связи.

В 1961 г. по инициативе В.С. Мельникова в НИИР организуется лаборатория по созданию новых систем радиосвязи на ультракоротких волнах (УКВ) с использованием механизмов ионосферного и метеорного рассеяния радиоволн. Он возглавлял новые разработки как главный конструктор. Завершены они были уже после его скоростной кончины.

Виктор Семенович Мельников скончался 11 июня 1965 г.

Неожиданный уход из жизни В.С. Мельникова стал большой потерей для отечественной науки. Его смерть отозвалась болью в сердцах всех, знавших этого талантливого человека. Вспоминаются грустные строки Иосифа Бродского:

*Без злых гримас, без помышленья злого,
из всех щедрот Большого Каталога
Смерть выбирает не красоты слога,
но неизменно самого певца.*

Впоследствии из лаборатории Виктора Семеновича выделились две группы, возглавляемые крупными отечественными специалистами Н.Н. Шумской и А.А. Магазаником, которыми в начале 70-х гг. были завершены работы по созданию аппаратуры линий связи ионосферного и метеорного рассеяния. Линия ионосферного рассеяния была построена в районе Мурманска, а линия метеорного рассеяния соединила Красноярск и Норильск. Однако ввиду бурного развития радиорелейной связи, в том числе на основе механизма тропосферного рассеяния, и спутниковых систем этот вид связи в СССР распространения не получил.

В.С. Мельников был не только крупным инженером-разработчиком аппаратуры радиосвязи, но и ученым-теоретиком в области помехоустойчивости систем передачи цифровых (или, как тогда говорили, телеграфных) сигналов.

Он начал публиковать свои работы после окончания Великой Отечественной войны в 1947 г., его научная активность особенно возросла после 1958 г. В цикле интересных и глубоких работ он существенно развил теорию потенциальной помехоустойчивости, рассмотрев ряд важных задач радиоприема сигналов в каналах связи с замираниями, обусловленными многолучевым характером распространения радиоволн.

Этот цикл работ в 1962 г. был представлен на соискание ученой степени доктора технических наук. Оппонентами на защите его диссертации были названы известные советские ученые Б.Р. Левин, В.И. Бунимович — специалисты в области статистической радиотехники и Н.Т. Петрович — специалист в области систем радиосвязи.

Научные труды В.С. Мельникова

До 1958 г. были опубликованы всего лишь четыре работы Мельникова. Первая — доклад на Всесоюзной конференции НТО им. А.С. Попова [1]. В ней была исследована оригинальная система двукратного разнесенного приема сигналов частотной телеграфии путем их сложения на общем амплитудном ограничителе. Статья [2] посвящена исследованию помехоустойчивости нескольких конкретных систем частотного телеграфирования; брошюра [3] содержала описание используемых в те годы на отечественных коротковолновых радиоприемных систем частотного телеграфирования. В ней, в частности, рассмотрена весьма эффективная, позволявшая в два раза увеличить пропускную способность радиоприемной, отечественная система двухканального частотного телеграфирования (ДЧТ), изобретенная в 1933 г. академиком А.Н. Щукиным и позднее усовершенствованная и внедренная на отечественных линиях коротковолновой связи инженером И.Ф. Агаповым. В.С. Мельников написал также обширный раздел учебника [4] по радиоприемной технике. В этом разделе впервые в учебной литературе были описаны основные известные в те годы методы передачи и приема радиотелеграфных сигналов и дано сравнение их помехоустойчивости. В течение ряда лет подготовка студентов во всех институтах связи страны по курсу «Радиоприемные устройства» осуществлялась по этому учебнику.

Несмотря на новаторский характер теории Котельникова, давшей инженерам мощнейший инструмент для синтеза оптимальных (т.е. обладающих наивысшей помехоустойчивостью) устройств приема сигналов и для количественной оценки их помехоустойчивости, эта теория не сразу получила признание инженеров. Одна из причин этого в том, что рукопись докторской диссертации В.А. Котельникова с изложением основ приема сигналов в цифровых системах связи была малодоступна. В виде книги она была опубликована только в 1956 г. Другой причиной было то, что в ней был применен сложный для инженеров того времени математический аппарат. Кроме того, используемые в этой теории математические модели принимаемых сигналов и помех казались многим неадекватными реальным условиям радиоприема сигналов на коротких волнах (а в то время для организации магистральных радиоканалов использовались только эти волны). В коротковолновых каналах связи имеют место замирания сигналов, а помехи не имеют, как в теории гауссовского распределения.

Исследования в области помехоустойчивости приема сигналов, начатые В.А. Котельниковым, получили в нашей стране весьма существенное развитие прежде всего благодаря работам выдающихся отечественных ученых Л.М. Финка и В.С. Мельникова.

Результаты Л.М. Финка были обобщены в 1958 г. в его докторской диссертации «Элементы теории радиотелеграфной связи», а В.С. Мельникова — в его докторской диссертации «Вопросы теории помехоустойчивости телеграфных систем». Отметим, что, выходя на защиту диссертации, В.С. Мельников не имел степени кандидата технических наук, и ему, с учетом выдающегося научного вклада в теорию связи, сразу была присвоена ученая степень доктора наук. Случай в отечественной науке неординарный.

После работ Л.М. Финка и В.С. Мельникова исследования в СССР в данной области широко развернулись, и ряд отечественных ученых внес существенный вклад в развитие теории потенциальной помехоустойчивости дискретных систем связи.

В работах Мельникова была определена потенциальная помехоустойчивость всех основных используемых в те годы методов передачи сигналов с помощью амплитудной, фазовой и частотной манипуляции и двухканальной частотной телеграфии [5, 6].

В докторской диссертации Мельникова [7] определены законы распределения амплитуды и фазы сигнала, ортогональные компоненты которых распределены по закону Коши, или по нормальному закону с нулевым средним и разными дисперсиями. В случае одинаковых дисперсий амплитуда сигнала распределена по закону Рэлея, а фаза — равномерно в интервале $0 - 2\pi$, в случае же разных дисперсий распределение амплитуды сигнала подчиняется закону Хойта, а фаза имеет неравномерное распределение.

В.С. Мельников рассматривал в основном одиночный прием узкополосных телеграфных сигналов в условиях действия аддитивного белого гауссовского шума и быстрых гладких замираний. Он был одним из первых, кто начал изучать влияние характера замираний на помехоустойчивость приема сигналов. В его работах рассматривались замирания сигналов по законам Рэлея, Хойта и Коши [8].

В.С. Мельников впервые описал влияние неполного разделения сигналов с частотной манипуляцией (ЧМн) в месте приема, обусловленного недостаточной величиной частотного разнеса, на потенциальную помехоустойчивость их приема [9]. Результаты работы давали возможность определить минимально необходимый частотный разнос между сигналами нажатия и паузы в канале связи с замираниями.

Интересна работа [10] — одна из первых и немногих работ, в которых рассматривались вопросы приема сигналов в системе с обратной связью при прерывистой радиосвязи. В такой системе передача информации осуществляется лишь в те периоды времени, когда коэффициент передачи канала достаточно велик и существуют условия, наиболее благоприятные для приема. Результаты работы имеют отношение, в частности, к системе метеорной связи. Подобные же задачи решались уже в 70-х гг. применительно к тропосферным многоканальным системам связи. В работе показано, что введение прерывистой связи при рэлеевских замираниях позволяет весьма существенно повысить пропускную способность канала. В [11, 12] рассмотрен прием с предсказанием сигналов с фазовой манипуляцией (ФМн) и ЧМн. Это также весьма интересные и оригинальные работы, посвященные автокорреляционным связям между предшествующей и последующей телеграфными посылками при сигналах со случайной амплитудой и фазой.

Результаты [11] показали, что в системе ЧМн с предсказанием при коэффициенте автокорреляции R процесса замираний, близком к единице ($R \approx 1$), можно существенно повысить помехоустойчивость приема по сравнению с помехоустойчивостью при традиционном приеме этих сигналов. По сути оптимальная система осуществляет раздельный прием сигналов нажатия и паузы, и за счет этого достигается эффект двукратного разнесенного приема. Подобный принцип использовался впоследствии в отечественных системах ионосферного рассеяния [13].

Результаты [12] показали, в частности, что система ФМн в канале радиосвязи с изменяющимися во времени параметрами ($R < 1$) имеет конечную вероятность ошибки даже при отсутствии шума, и поэтому применение таких систем в подобных каналах неперспективно.

В [14] впервые строго рассмотрен прием сигналов ЧМн конечной длительности T в двухлучевом канале связи с конечным запаздыванием, величина τ которого может изменяться в пределах $0 \leq \tau \leq T$. Впервые работа систем связи описывалась достаточно общей моделью, адекватной реальным физическим условиям распространения радиоволн. Результаты работ, выполненных до опубликования [14], были получены фактически для случая $T \gg \tau$. Тогда для определения помехоустойчивости систем достаточно знания статистических характеристик квадратурных составляющих принимаемых сигналов, а не реальной структуры многолучевости в месте приема.

В диссертации В.С. Мельникова [7] были изложены также вопросы, связанные с технической реализацией систем оптимального приема [7, 15].

Посмертно были опубликованы три работы В.С. Мельникова [16–18]. В первой — рассмотрен вопрос мониторинга телеграфных линий, во второй — дана оценка надежности многопролетной линии связи, а в третьей — оценка влияния разных факторов, характерных для радиоканала, на возможность и точность экспериментального определения вероятности ошибочного приема сигналов и надежности связи.

Читая работы В.С. Мельникова, нельзя избавиться от чувства, что постановка рассматриваемых в них проблем диктовалась не столько утилитарными соображениями, вытекающими из прикладных задач, стоящих на повестке дня, сколько внутренней логикой науки — стремлением познать непознанное, тем, что называют любовью к истине, способностью мечтать.

Это состояние человеческой души ярко передано словами английского поэта Джона Китса:

*Пусть Мечта твоя летает,
Где желает, как желает,
Лишь на пользу не глядит —
Польза радости вредит.*

.....

*О крылатая Мечта!
Разорви скорее эти
Здорового рассудка сети;
Отпусти Мечту в полет,
Радость дома не живет.*

Альберт Эйнштейн, говоря о работах Н. Бора, употребил выражение «музыкальность мысли». Думается, что к мыслям, содержащимся в работах В.С. Мельникова, это выражение можно отнести с полным правом.

Заключение

История науки и техники, жизнь, прожитая их творцами, иллюстрируют реальность многих понятий, связанных с духовным миром человека. Этот мир безусловно существует, и изучение жизни людей, наделенных творческой энергией и даром созидания, мудрецов, героев, поэтов — а ученых и инженеров, без сомнения, можно поставить в один ряд с ними — позволяет проникнуть в тайны этого мира, который развивается по высшим законам — законам красоты.

Словно подчиняясь грандиозному замыслу одного дирижера, постоянно, уже много тысячелетий, ни на минуту не прекращаясь, звучит прекрасная песня, исполняемая

огромным стройным хором творцов, живущих в разное время и в разных странах. Каждый имеет яркую индивидуальность и, вступая в хор, подхватывает и продолжает мелодию, исполненную до него, внося в нее новые прекрасные оттенки.

Участие в этом замечательном действе доставляет огромную радость и позволяет людям наиболее полно выразить свою человеческую сущность в процессе созидания, результаты которого определяют прогресс человеческой цивилизации. Чувства, которые испытывают при этом исполнители, очень точно выражены Эйнштейном: *«Каждый день я бесчисленный раз вспоминаю, что в основе моей внешней и внутренней жизни — труд ныне живущих и уже умерших людей, а значит, я должен напрячь все свои силы, чтобы дать не менее того, что уже получил и продолжаю получать».*

Виктор Семенович Мельников был одним из таких ярких созидателей. К активной разработке теории радиоприема он обратился в 1958 г., когда ему было 47 лет, уже будучи сложившимся и известным специалистом. Люди в этом возрасте нечасто открывают новую страницу в своей жизни. Количество опубликованных им работ невелико, однако они весьма изящны и до сих пор имеют большое познавательное значение. Судьба предоставила ему всего четыре года, за которые он провел исследования и опубликовал основные работы. Это были годы его творческого расцвета, и безусловно, если бы не скоропостижная смерть, он дал бы миру еще многое.

На работы В.С. Мельникова в 60-е гг. делались ссылки во многих научных публикациях, в том числе в книгах, посвященных помехоустойчивости систем радиосвязи. Но постепенно его имя стало забываться.

Дух человека, и в первую очередь человека творческого, бессмертен. Если обратиться к прошлому, к истории, то можно услышать приходящий из пространства хор голосов, произносящий слова просьбы, услышанные и записанные поэтом Р. Киплингом. В этом хоре звучит и голос В.С. Мельникова:

<i>По вкусу если труд был мой</i>	<i>И, память обо мне храня</i>
<i>Кому-нибудь из Вас,</i>	<i>Один короткий миг,</i>
<i>Пусть буду скрыт я темной,</i>	<i>Распрашивайте про меня</i>
<i>Что к Вам придет в свой час,</i>	<i>Лишь у моих же книг.</i>

Имя В.С. Мельникова должно сохраниться в памяти людей и занять почетное место в истории техники.

Список научных трудов В.С. Мельникова

1. Сложение приемников при приеме на разнесенные антенны / Докл. на Всесоюзной конференции Научно-технического общества им. А.С. Попова. 1947.
2. Помехоустойчивость систем частотного телеграфирования. Частотная манипуляция на радиотелеграфных связях. М.: Связьиздат, 1949.
3. Частотное телеграфирование. М.: Связьиздат, 1952.
4. *Чистяков В.И., Сидоров В.М., Мельников В.С.* Помехоустойчивость телеграфных систем и исходные данные о сигнале и помехе для ее определения // Радиоприемные устройства. Под ред. В.И. Чистякова. М.: Связьиздат, 1958, 1959.
5. Приложение теории потенциальной помехоустойчивости к задачам коротковолновой телеграфной связи // Электросвязь. 1958. № 6.
6. Потенциальная помехоустойчивость амплитудного и двухканального частотного телеграфирования при замираниях // Электросвязь. 1959. № 3.

7. Вопросы теории помехоустойчивости телеграфных сигналов // Докт. дисс. Гос. НИИ МС. — М., 1962.
8. О потенциальной помехоустойчивости сигналов частотного телеграфирования при распределении их компонентов по закону Коши // Сб. трудов Гос. НИИ МС. 1959. Вып. 2 (16).
9. Разнос сигналов частотного телеграфирования при замираниях и идеальном приеме // Электросвязь. 1960. № 3.
10. Оценка средней скорости телеграфирования при прерывной работе радиосвязи с частотной модуляцией // Радиотехника. 1959. № 4.
11. Идеальный прием с предсказанием сигналов частотного телеграфирования при замираниях // Сб. трудов Гос. НИИ МС. 1961. Вып. 3 (24).
12. Идеальный прием с предсказанием сигналов фазового телеграфирования при замираниях // Радиотехника. 1962. № 1.
13. Радиолинии ионосферного рассеяния метровых волн / Н.Н. Шумская, В.В. Вязников, Э.М. Гаспарьянц и др. — М.: Связь, 1973.
14. Потенциальная помехоустойчивость телеграфных сигналов при многолучевом распространении // Сб. трудов Гос. НИИ МС. 1962. Вып. 1 (25).
15. Сложение постоянных напряжений по формуле геометрического суммирования // Электросвязь. 1961. № 9.
16. О необходимом объеме статистического материала при экспериментальном определении вероятности ошибочного приема телеграфных сигналов // Сб. трудов Гос. НИИ МС. 1965. Вып. № 2 (38).
17. Оценка надежности многопролетной линии // Сб. трудов Гос. НИИ МС. 1965. Вып. № 3 (39).
18. К определению качественных показателей линий радиотелеграфной связи // Радиотехника. 1968. № 12.

Давид МИДДЛТОН

Мне нужно действовать. Я каждый день бессмертным сделать бы желал, как тень Великого героя. И понять я не могу, что значит отдыхать. Всегда китит и зреет что-нибудь в моем мозгу.

Михаил Лермонтов



Введение

Для специалистов в области теории связи во всем мире имя Давида Миддлтона известно так же хорошо, как физикам имена крупнейших ученых XX в. Альберта Эйнштейна, Нильса Бора или Льва Ландау.

Немецкий философ Эрих Фромм писал: «...самое прекрасное в жизни состоит в том, чтобы реализовать себя не ради какой-нибудь цели, а ради деятельности как таковой, ради творческого акта». Американский ученый Давид Миддлтон относится к тем счастливым людям, которым удалось построить свою жизнь так, что каждый прожитый им день был наполнен творчеством и созиданием. Он принадлежит к выдающимся фигурам в науке XX в. Этот человек уникален по количеству первоклассных научных результатов в разных разделах теории связи, а также по продолжительности своей активной творческой деятельности в области статистической теории связи и статистической радиопереноса, которая охватила целую эпоху. Его первые основополагающие научные работы были выполнены в середине 40-х гг., а последняя трехтомная научная монография была издана в конце 90-х гг. XX столетия.

Любое творчество требует вдохновения, которое, как правило, приходит нечасто и длится непродолжительно. Имеются примеры ученых, творческая продуктивность которых была неиссякаемой. Великий математик Леонард Эйлер при жизни опубликовал сотни выдающихся научных работ. Его производительность как ученого была столь велика, что полученные им результаты Российская академия наук не успевала публиковать. После его смерти осталось огромное научное наследие, издание которого не завершено и по сей день. Весьма продуктивным ученым был знаменитый французский математик Коши. Давид Миддлтон также принадлежит к весьма плодовитым ученым.

В эпиграфе к данному очерку русский поэт Михаил Лермонтов выразил жизненное кредо людей — созидателей, которые не знают отдыха и каждый свой день наполняют действием. Давид Миддлтон по своей природе, безусловно, относится к таким людям.

Проблемы, над которыми он всю жизнь работал, возникли во время Второй мировой войны в годы, когда были заложены основы статистической радиотехники. Эти проблемы были связаны с необходимостью совершенствования приемников (повышения их чувствительности) радиолокационных станций, ставших во время войны важ-

нейшим элементом боевой техники, предназначенной для обнаружения и уничтожения самолетов и кораблей противника. Приемники сигналов, содержащие фильтры и нелинейные элементы (смесители, детекторы, ограничители и т.п.), должны обеспечивать надежный прием слабых сигналов в присутствии действующих на их входе шумов. Процессы обработки принимаемых на фоне случайных шумов сигналов весьма сложны, и к решению этих проблем были привлечены многие крупнейшие ученые. В США исследованиями в этой области занялись такие крупные ученые как, Норберт Винер — создатель кибернетики и Стефан Райс, который одним из первых получил основополагающие результаты в данном направлении, опубликованные в 1944 и 1945 гг. в двух его известных статьях в журнале «Bell System Journal». В нашей стране многие важные результаты в этой области были получены профессором В.И. Бунимовичем, работавшим в Институте радиотехники и электроники Академии наук, профессором Московского государственного университета Р.Л. Стратоновичем и профессором Военно-воздушной академии им. проф. Н.Е. Жуковского В.И. Тихоновым.

Другое важное направление научной деятельности Д. Миддлтона — создание методов синтеза оптимальных приемников сигналов при наличии радиопомех и оценки их помехоустойчивости. Теоретические основы этой области были заложены академиком В.А. Котельниковым в 1947 г. Д. Миддлтон, независимо от Котельникова, разработал в 1954 г. теорию оптимального приема сигналов на основе математической теории статистических решений. Им были получены многие фундаментальные результаты этой теории.

Биографический очерк

Давид Миддлтон родился 19 апреля 1920 г. в Нью-Йорке. Его мать получила хорошее музыкальное образование в Берлине. Она играла на скрипке, фортепьяно и пела. Отец Миддлтона был поэтом, писателем и редактором газеты «Нью Йоркер». В семье Д. Миддлтона никто никогда не занимался наукой.

Годы юности Д. Миддлтона пришлось на период большой депрессии в экономике США. Хотя у семьи были некоторые сбережения, однако для того, чтобы Миддлтон смог окончить школу, а затем Гарвардский университет, пришлось продать скрипку работы знаменитого итальянского мастера Гварнери, на которой играла его мать. Закончив университет в 1942 г., он получил степень бакалавра.

В начале Второй мировой войны в Гарвардском университете была организована Исследовательская радиолоборатория (ИРЛ). В ее составе была создана группа, разрабатывающая активные и пассивные системы радиопротиводействия для радиолокации, руководителем которой стал выдающийся американский физик Дж. Г. Ван Флек, которому в 1977 г. была присуждена Нобелевская премия за исследования в области магнетизма. В этой группе под руководством Флека начал свою научную карьеру Д. Миддлтон.

Аналогично тому, как электронное телевидение послужило технической основой создания радиолокации, так и разработка проблем выделения полезных сигналов на фоне шумов, над которыми стал работать Д. Миддлтон, явилась предпосылкой наступления в наше время информационной эры. В этой области он выполнил исследо-

вания, создав статистические методы анализа систем приема сигналов в присутствии шумов. После окончания войны Д. Миддлтон продолжил свое образование в Гарвардском университете. В 1945 г. он получил магистерскую степень, а в 1947 г., продолжая работать в ИРЛ под руководством Ван Флека, стал доктором наук в области физики.

В течение года Д. Миддлтон стажировался в Гарварде у знаменитого французского физика Леона Бриллюэна, который серьезно интересовался проблемами теории связи и в 50-х гг. написал одну из первых в мире книг по теории информации.

В лаборатории Гарвардского университета Миддлтон работал до 1954 г., совмещая исследовательскую работу с преподаванием в университете прикладной физики. С 1942 по 1954 г. он вел интенсивные исследования: анализировал работу разных систем с амплитудной (АМ) и частотной модуляцией (ЧМ) при действии случайного шума, разрабатывал методы проектирования и оптимизации систем приема сигналов. Позже он получил важнейшие научные результаты теории связи, разрабатывая теорию оптимального приема сигналов в разных каналах связи, в которых действует не только гауссовский шум, но и другие виды помех с произвольными статистическими характеристиками.

Подобно Эдисону, организовавшему первую в мире исследовательскую лабораторию, продукцией которой были изобретения в разных областях техники, Миддлтон был первым, кто в 1954 г. создал консалтинговую фирму — независимый научно-исследовательский институт, где он был директором, менеджером и главным научным сотрудником. Он выполнял проекты по заказам университетов, промышленных лабораторий, а также Министерств энергетики, обороны и военного флота.

Занимаясь исследованиями во многих направлениях теории связи, о которых будет сказано в следующем разделе, Миддлтон продолжал преподавать прикладную физику, математику и электротехнику в Колумбийском, Денверском, Техасском и других университетах США. Кроме того, во многих крупных американских академических институтах он руководил подготовкой аспирантов к защите докторской степени.

Результаты Д. Миддлтона широко публиковались в ведущих научных журналах и освещались на международных конференциях. Им опубликовано более 170 научных статей и несколько фундаментальных монографий.

Д. Миддлтон поддерживал тесные научные контакты с советскими учеными. В период 1973—1984 гг. он четырежды посещал СССР по приглашению Института акустики Академии наук. В 1978 г. под его редакцией в издательстве «Наука» вышла книга отечественного ученого В.В. Ольшевского «Статистические методы в гидролокации».

Д. Миддлтон — член физического, математического и акустического научных обществ США, Американской ассоциации содействия прогрессу наук, почетный член Международного института инженеров электротехники и электроники (IEEE). Он также член Общества прикладной математики, Космического клуба, Нью-Йоркской академии наук и др. Его научные заслуги отмечены наградой Американского института электросвязи (NTIA), Секции электромагнитной совместимости IEEE и др.

У Д. Миддлтона семь детей. От первого брака у него были две дочери и два сына, от второго — три сына.

Научные работы

Д. Миддлтон — один из крупнейших современных ученых, чьи исследования внесли большой вклад в развитие современной статистической теории связи. Ему принадлежат основополагающие результаты, связанные с оценкой влияния шумов на прием сигналов с разными видами модуляции. В развитии этой научной области, которое она получила в XX столетии, роль Д. Миддлтона значительна.

В 1943 г. во время Второй мировой войны он приступил к разработке методов анализа закономерностей прохождения сигналов и шумов через нелинейные устройства. Такие методы были необходимы для оценки последствий воздействия искусственных помех, создаваемых противником, на радиолокационные станции. Эти методы сейчас вошли в учебники по теории связи и необходимы современному инженеру. Им были получены результаты, позволяющие определять подавление модулированных по амплитуде и частоте слабых сигналов при их детектировании в присутствии шумов. В частности, он исследовал пороговый эффект при приеме ЧМ-сигналов строгими математическими методами.

Вместе со своим учителем Дж. Г. Ван Флеком он в 1944 г., независимо от известного американского ученого Д.О. Норта, разработал важнейшую в теории связи концепцию согласованных фильтров, очищающих принимаемые сигналы от действующих в канале связи шумов и помех. Согласованные фильтры играют исключительно важную роль при проектировании систем связи, радиолокации и различных других систем, в которых осуществляется обработка сигналов в присутствии шумов. В радиолокации такие фильтры являлись эффективным средством защиты приема сигналов от искусственных помех, создаваемых противником.

В 1954 г. он вместе со своим коллегой Д. ВанМетером сформулировал статистическую теорию оптимального приема сигналов, основанную на строгом байесовском подходе, разработанном в математической статистике. Следует отметить, что идеи синтеза устройств оптимального приема сигналов в присутствии шумов были впервые выдвинуты в докторской диссертации академика В.А. Котельникова в 1947 г.

Д. Миддлтон многое сделал для развития этой теории. В 1965 г. он разработал каноническую теорию порогового обнаружения и оценки параметров сигналов при воздействии шумов с произвольными статистическими характеристиками. Несколько позже (в 1968 и 1970 гг.) совместно со своим учеником Р. Эспозито он разработал байесовскую теорию совместного обнаружения и оценки параметров сигналов в условиях априорной неопределенности.

С 1970 г. Д. Миддлтон начинает активно разрабатывать новое научное направление — статистическую модель негауссовских шумов и помех. Разработанная им модель негауссовских шумов позволяла при соответствующем выборе ее параметров достаточно точно описать статистические характеристики воздействующих на приемные устройства шумов и промышленных помех в диапазоне частот ниже 1 ГГц, в котором шумы имеют как гауссовскую, так и импульсную составляющие.

Важным событием в мировой науке стала изданная в 1960 и 1961 гг. двухтомная монография Д. Миддлтона «Введение в статистическую теорию связи», к написанию которой он приступил еще в 1949 г. и работал над которой с перерывами вплоть до 1958 г. В нее вошли материалы ряда курсов, которые он читал на факультете приклад-

ных наук в Гарвардском университете, а также результаты его исследований, проводившихся в Гарварде и в Массачусетском технологическом институте по договорам с Министерством обороны. Эта монография получила широкую известность и была переведена во многих странах, став настольной книгой для специалистов, работающих в области статистической радиотехники и смежных областях. Следует отметить, что она не была первой книгой в данной области. В 1951 г. в СССР вышла весьма содержательная работа В.И. Бунимовича «Флуктуационные процессы в радиоприемных устройствах», а в 1957 г. книги В.С. Пугачева «Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления» и Б.Р. Левина «Теория случайных функций и ее применение в радиотехнике». В 1958 г. в США была издана книга В.Б. Давенпорта и В.Л. Рута «Введение в теорию случайных сигналов и шумов», позже вышедшая в СССР на русском языке. Однако монография Д. Миддлтона отличалась от ранее изданных книг своей энциклопедичностью.

Как указывал автор, он адресовал ее инженерам, физикам и специалистам по прикладной математике. Создавая свою книгу, он преследовал три цели: 1) сформулировать систематический метод проектирования оптимальных систем связи, включая оценку их качества и сравнение с неоптимальными системами того же назначения; 2) охватить в рамках единого теоретического подхода главные результаты ранее опубликованных работ; 3) создать учебное пособие для различных ступеней обучения, которое могло бы служить инструментом для исследователей современных проблем и быть отправной точкой для новых разработок.

Монография сыграла большую роль во внедрении статистических методов в образование инженеров в области связи, радиолокации и других смежных областях. Эта книга в 1962 и 1963 гг. была переведена и издана в СССР под редакцией крупного отечественного ученого профессора Б.Р. Левина.

В 1965 г. издается небольшая по объему, но весьма содержательная книга Д. Миддлтона «Очерки теории связи», которую в 1966 г. выпускают в СССР на русском языке также под редакцией Б.Р. Левина. В работе кратко изложены основные идеи в области теории связи, появившиеся к этому времени.

Этим книгам была суждена долгая жизнь. Двухтомная монография «Введение в статистическую теорию связи» переиздавались в США в 1972, 1987 и 1996 гг., а книга «Очерки теории связи» переиздавалась в 1977 и 1987 гг.

В 1997 г. вышла в свет трехтомная монография Д. Миддлтона «Обработка пороговых сигналов». Эта книга содержала новые результаты в области оптимального приема сигналов, полученные им после 1965 г.

Научные интересы Д. Миддлтона необычайно широки и не ограничены областью статистической теории связи. Он выполнил ряд фундаментальных работ в области распространения волн в средах со случайными неоднородностями и их рассеяния на шероховатых поверхностях. Им была разработана статистическая теория реверберации волн, дающая теоретическую основу для синтеза и анализа оптимальных систем приема радио- и гидролокационных сигналов в каналах с сильными эхосигналами, образованными за счет их рассеяния на неоднородностях среды распространения. В 1988 г. он публикует оригинальные результаты исследований по обнаружению векторных полей. Ему принадлежат также результаты, связанные с многомерным обобщением теоремы отсчетов Уиттекера—Котельникова—Шеннона (1962–1965 гг.).

Он выполнил важное исследование искажений сигналов из-за эффектов амплитудно-фазовой конверсии. Этот эффект часто возникает в бортовых ретрансляторах сигналов в спутниковой связи (1986 г.).

Творческий инстинкт Д. Миддлтона не ослабевает с годами, он продолжает активно работать и регулярно публиковать свои научные исследования, касающиеся проблем теории связи и статистической физики. В 1999 г. выходит его обширная статья «Модели негауссовского шума и обработка сигналов в телекоммуникации — новые методы и результаты для моделей классов А и В» (IEEE Trans. on Information Theory, № 4). Эта работа является развитием его результатов по моделям негауссовских шумов, полученных в 1970 г. Для двух классов моделей им были предложены методы определения распределения вероятностей уровня воздействующих на приемник негауссовских шумов.

В 2002 г. в «Трудах Института физики» (Institute of Physics Publishing, Waves in Random Media, 12.) публикуется его работа «Новые результаты прикладной теории рассеяния волн: новый физико-статистический метод исследования процессов рассеяния, включая многократное рассеяние, и метод определения точного распределения вероятностей уровня рассеянного поля и его сравнение с приближенными методами Борна и Рытова». В этой статье был сделан новый существенный шаг в решении весьма сложных проблем теории рассеяния волн, над которыми уже много десятилетий работают крупнейшие ученые.

Заключение

Давид Миддлтон выбрал для себя высшую жизнь — жизнь в сфере духа. Более чем за 60 лет своей активной творческой деятельности он создал методологию анализа различных систем обработки сигналов в присутствии шумов. Эти методы нашли широкое применение при решении весьма разнообразных практических задач.

Он входит в элиту ученых XX в., заложивших фундамент теории связи и установивших основные закономерности оптимальной обработки сигналов, передача которых по каналам связи сопровождается значительными искажениями, а прием осуществляется в присутствии интенсивных шумов и помех.

Поразительной чертой этого человека является неиссякаемая интеллектуальная мощь, не ослабевающая в течение более полувека. Эта мощь проявилась в количестве, глубине и разнообразии выполненных им научных исследований. В жизни он не искал успеха и популярности, финансовые вопросы также не стояли у него на первом месте. Его жизненной целью было научное творчество.

Обычно после 50 лет творческие возможности ученых заметно снижаются. Давид Миддлтон является очень редким исключением из этого правила. В чем же секрет его творческого долголетия? Думается, его стимулировал в первую очередь инстинкт созидания, огромный интерес и любовь к той работе, которой он занимался. Им двигало также ясное понимание того, что для человечества продвижение по пути знания в той области, в которой он трудился, имеет огромное значение.

Гарри НАЙКВИСТ

*Человек достигает совершенства, упорно
выполняя свою дхарму.*

Бхагават-гита



Введение

Библия учит, что каждый человек, приходя в этот мир, имеет свое предназначение — содействовать утверждению в мире полноты свободы, истины и доброты. Далекое не всем удается осознать свое предназначение и в полной мере реализовать свой интеллектуальный и нравственный потенциал.

Однако есть счастливые люди, которые с юных лет осознают свою дхарму — свой долг перед другими людьми и перед будущим и посвящают свою жизнь созиданию и творчеству. Такие люди щедро наполняют свою жизнь и жизнь окружающих их людей достоинством и красотой. Именно благодаря им в мире постоянно происходит восполнение добра, которое способствует возрастанию духовности и созидания. По-разному складываются человеческие судьбы.

Гарри Найквист принадлежал к тем мужественным и целеустремленным людям, которые смогли утвердить себя в жизни и совершить то, что им было предопределено их дхармой.

Биографический очерк

Гарри Найквист родился 7 февраля 1889 г. в семье фермеров Лорса Джонсона и Катарины Эрикسدотер и был четвертым ребенком. Судьба знаменитого шведского ученого не была простой. Вырос он на ферме, которая располагалась в глухих местах в одном из районов Швеции. Хотя большинство шведов принадлежат к лютеранской церкви, родители Найквиста были баптистами. В Швеции фамилия Джонсон очень распространена и из-за этого часто возникают недоразумения, и в частности с доставкой почты. Поэтому отец Гарри сменил свою фамилию на Найквист. В те годы смена фамилии в Швеции не являлась большой редкостью. Семья Найквистов не была богатой, и дать всем детям (а их было восемь) среднее образование было затруднительно. Тем более было трудно обеспечить им возможность получить высшее образование.

Найквист закончил начальную школу в 1900 г. в г. Нилсби. Во время обучения он работал на ферме своего отца и помогал ему торговать в обувном магазине. Его школь-

ный учитель Моден заметил способного ученика и стал давать ему книги из своей библиотеки. Он считал, что Гарри должен получить образование и стать учителем. Поскольку семья не могла материально поддержать Гарри, которому было всего 14 лет, то учитель посоветовал ему готовиться к эмиграции в США, считая, что шансы продолжить образование в этой стране для него будут выше.

К этому времени два сына Модена уже жили в США. Четыре года потребовалось Гарри, чтобы реализовать план своего учителя. В течение этих лет он работал на сульфатной фабрике в г. Деджи и заработал небольшую сумму денег на дорогу в США. Опыт работы и приобретенная специальность давали ему право на эмиграцию. В 1907 г. он получил сертификат, гарантирующий получение работы, и с 10 долларами в кармане покинул родину и отплыл в США.

В течение пяти лет Найквист работал на разных фабриках США. Только в 1912 г. в возрасте 23 лет он поступил в университет в штате Северная Дакота и через два года получил степень бакалавра по специальности инженер-электрик, а в следующем году — степень магистра по этой же специальности. Г. Найквист продолжает свое образование в Йельском университете и в 1917 г. становится доктором наук в области физики.

После завершения образования Найквист поступает на работу в исследовательский отдел Американской телефонной и телеграфной компании (AT&T). В этой компании он проработал 37 лет до своего выхода на пенсию в 1954 г. С 1934 г. Найквист — сотрудник знаменитой Белл-лаборатории. После выхода в отставку Найквист оставался консультантом по проблемам правительственной и военной связи.

Скончался Гарри Найквист 4 апреля 1976 г. в г. Харлингтон штата Техас в США.

Вклад Найквиста в теорию связи

Теорема отсчетов. Наибольшую известность получили работы Найквиста, выполненные им в 20-х гг. прошлого столетия. Эти работы связаны с проблемами телеграфной связи, которые были весьма актуальными в те годы. Его статьи, содержащие постановку важнейших проблем электросвязи, написаны изящным языком. Они не потеряли актуальности и в настоящее время.

В 1924 г. он опубликовал важную статью «Факторы, влияющие на скорость передачи телеграфных сигналов», в которой установлена зависимость скорости передачи сигналов от количества используемых уровней сигнала (в современной терминологии от позиционности кодирования).

В другой его статье «Вопросы теории передачи телеграфных сигналов» описана фундаментальная теорема отсчетов, согласно которой частота отсчетов должна по крайней мере в два раза превышать верхнюю частоту спектра передаваемого сигнала. Такая теорема в это же время была независимо выведена немецким ученым Р. Кумфнером. Математически она выражала важнейшую закономерность в теории связи следующим образом:

$$N \geq 2FT.$$

Здесь N — число отсчетов, которое необходимо для представления временного отрезка сигнала длительностью T , а F — полоса частот, занимаемая телеграфным сигналом. При выполнении данного критерия информация не утрачивается, и этот

сигнал может быть полностью восстановлен. Установленные Г. Найквистом основополагающие принципы оказали огромное влияние на прогресс в области связи, касающийся перехода от аналоговых систем (аналоговые сигналы вырабатываются большинством источников информации — микрофонами или телевизионными камерами и т.п.) передачи сообщений к цифровым. Каждый из отсчетов сигнала преобразуется в цифровую форму и в виде последовательности бинарных знаков передается по каналу связи.

Две статьи Г. Найквиста вместе со статьей другого американского ученого Р. Хартли явились для Клода Шеннона исходным пунктом, когда он работал над своим классическим трудом «Математическая теория связи», опубликованным в 1948 г. В ней К. Шеннон отметил роль Г. Найквиста и Р. Хартли в создании теории информации.

Найквист много размышлял о методах кодирования аналогового сигнала в последовательность бинарных знаков 0 и 1. Для этого он изобрел устройство, которое назвал «кодек» (кодер-декодер). В этом устройстве аналоговый сигнал преобразовывался в последовательность бинарных знаков, которые должны были передаваться по телефонной линии. На приемной стороне в этом устройстве с высокой точностью осуществлялось обратное преобразование и восстанавливался исходный аналоговый сигнал.

Термин «кодек» укоренился и широко используется в современной теории связи. Правда, сегодня он приобрел несколько другой смысл. Им пользуются, когда речь идет об устройствах, в которых на передаче для повышения помехоустойчивости приема к информационной последовательности символов добавляют избыточные символы и передают результирующую последовательность по каналу связи, а на приеме исходную информационную последовательность символов восстанавливают, устраняя возникшие в процессе передачи сигналов ошибки.

Уровень технологии в 20-х гг. был недостаточен для реализации цифровой передачи сигналов по каналам связи, и Найквист испытывал разочарование. Его теорема отсчетов, как казалось в 20-е гг., показывала, что создание цифровых систем связи является несбыточной мечтой. Ведь в таких системах необходимо было обеспечивать накопление и обработку больших массивов данных и их высокоскоростную передачу по каналам связи (для передачи музыки требовалась скорость порядка 30 000 отсчетов в секунду). Понадобилось более 60 лет технического прогресса, в течение которых были изобретены рациональные методы преобразования аналоговых сигналов в цифровую форму — кодово-импульсная и дельта-модуляции, а также транзисторы и интегральные схемы, чтобы возможность цифровой передачи сигналов по каналам связи стала реальной.

Эта теорема была существенно обобщена в 1932 г. академиком В.А. Котельниковым, который установил, что аналоговый сигнал $S(t)$ с ограниченной полосой частот F может быть представлен своими отсчетами, взятыми через интервалы времени $\tau = 1/2F$, следующим образом:

$$S(t) = \sum S(n\tau) [\sin 2\pi F(t - n\tau) / 2\pi F(t - n\tau)].$$

Позже, в 1948 г., эта же формула независимо была установлена Клодом Шенноном. В честь этих крупнейших ученых XX в. данную формулу иногда называют формулой Котельникова—Найквиста—Шеннона.

Теорема Найквиста для электрических цепей. Электрические флуктуации представляют собой важную проблему для радиоинженеров, поскольку они ограничивают чувствительность устройств обработки сигналов. Важные исследования физических процессов, обуславливающих электрические флуктуации в ламповых усилителях, в 1918 г. выполнил немецкий ученый В. Шоттки. В 1927 г. Найквист создал теорию тепловых шумов, вызванных хаотическим движением носителей тока в электрических цепях. Полученные им результаты известны как теорема Найквиста.

Теорема устанавливает, что шум в любой электрической цепи, поддерживаемой при определенной температуре T и содержащей сопротивление R , может быть описан включенной последовательно с сопротивлением шумовой ЭДС, средняя мощность e^2 которой на частоте f и в малой полосе частот df составляет

$$e^2 = 4kTRhf\{\exp[hf/kT] - 1\}^{-1}/kT\}df,$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-24}$ дж·с — постоянная Планка, а $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ дж/град — постоянная Больцмана.

В последующем эта теорема была существенно обобщена. Обобщенная теорема устанавливала, что тепловой шум в электрической цепи, состоящей не только из электрических элементов, таких как сопротивление, катушки индуктивности и конденсаторы, но и включающей в себя также пассивные электрические, электроакустические или электромеханические системы, например антенны, микрофоны, громкоговорители, гальванометры и т.д., находящиеся при одинаковой температуре, может быть полностью описан путем замены этих пассивных систем эквивалентными электрическими схемами, имеющими ту же самую температуру.

Ввиду широкого использования чувствительных усилителей в технике электро-связи, радиолокации и других областях техники предел обнаружения слабых сигналов определяется уровнем электрических флуктуаций в цепях. В любой системе связи этот предел всегда задается отношением сигнала к шуму. Поэтому данная теорема Найквиста является одним из фундаментальных результатов теории связи. На ней основывается проектирование многих устройств современной техники. Сегодня она применяется при проектировании не только систем связи, но и радиолокационных систем, радиотелескопов в астрономии, микрофонных систем и т.д.

Американским ученым Дж. Джонсоном в 1928 г. были проведены экспериментальные исследования теплового шума в электрических цепях, которые полностью подтвердили результаты Найквиста. Позднее с использованием теоремы Найквиста было определено значение одной из важнейших физических констант — постоянной Больцмана. Значение определенной таким образом постоянной Больцмана менее чем на 1% отличалось от данных, полученных другими методами.

Учитывая новаторский характер исследований Найквиста и Джонсона, в литературе тепловой шум называют иногда шумом Найквиста—Джонсона.

Найквист — инженер

Факсимильный аппарат. Первые идеи передачи рисунков по каналам связи относятся к середине XIX в. Аппараты, которые должны были реализовать эти идеи, были предложены в разные годы англичанами А. Беном (1843 г.) и Ф.К. Бекуелом (1848 г.),

итальянским инженером Д. Казелли (1862 г.). Особенностью этих аппаратов была сложная и длительная подготовка оригинала рисунка, который необходимо было передать по линии связи. По-видимому, лишь аппарат Д. Казелли, названный им пантографом, был создан и испытан в России на реальной линии связи между Москвой и Санкт-Петербургом. Однако из-за высокого тарифа пантограф успехом не пользовался и через несколько лет его эксплуатация прекратилась.

В 1918 г. Найквист начал исследования возможностей передачи изображений по телефонным линиям связи. Результатом этих исследований было создание в 1924 г. «телефотографии» — практического факсимильного аппарата, сфера применения которого стала расширяться.

Принципы, заложенные в создание этого аппарата, используются и поныне. Хотя, конечно, технология изготовления таких аппаратов изменилась радикально. В таких аппаратах лист бумаги с нанесенным на него изображением или текстом помещался на вращающийся барабан и сканировался. При этом интенсивность и тон отдельных участков изображения преобразовывались в электрические сигналы, которые передавались по телефонной линии. В приемной части факсимильного аппарата принятые сигналы преобразовывались в изображение на листе бумаги.

Критерий Найквиста устойчивости систем. Проблема устойчивости физических систем имеет давнюю историю. Первые исследования устойчивости систем автоматического регулирования были проведены еще в 1877, 1878 гг. русским ученым И.А. Вышеградским. Позже (в 1893—1899 гг.) его идеи получили развитие в работах словацкого ученого А. Стодолы.

В 1932 г. Найквист установил частотный критерий устойчивости электронных усилителей с обратной связью. Такой усилитель при разомкнутой цепи обратной связи представляет собой электрический четырехполюсник с коэффициентом передачи $K(f)$. Функция $K(f) = K_R(f) + jK_I(f)$ является комплексной и зависит от частоты f гармонического колебания, действующего на его входе. Найквист показал, что критерий устойчивости усилителя должен основываться на исследовании введенной им диаграммы Найквиста. Эта диаграмма представляет собой кривую на плоскости, координаты точек ($K_I(f)$, $K_R(f)$) которой при $-\infty \leq f \leq \infty$ заданы параметрически. Согласно критерию Найквиста усилитель устойчив, если диаграмма Найквиста не охватывает точку с координатами $(0, -1)$. Установленный им критерий устойчивости является практичным и широко используется в инженерной практике при анализе не только электронных систем, но и электромеханических и вообще систем любой технической природы, в которых имеются обратные связи.

Предложенный Г. Найквистом метод анализа устойчивости систем с обратной связью получил развитие в конце 30-х гг. в работах советского математика А.В. Михайлова и американского ученого Г. Боде.

Заключение

Ценность идей Найквиста и то влияние, которые они оказали на развитие электро-связи во всем мире, весьма значительны. Как выдающийся ученый и инженер он внес значительные усовершенствования в телефонные линии, системы передачи изображений и телевидения. Его имя приобрело мировую известность. Ему принадлежат 138 патентов.

Предание гласит, что когда Господь задумал создать Адама — первого человека, между Ним и окружающими его ангелами вышел спор. Господь сел на свой святой престол, ангелы собрались вокруг Него, и Он сказал:

«Сотворим человека по нашему образу». И обратились к нему ангелы-хранители, предупреждая его об опасностях, которые с этим сопряжены. Они говорили о том, что человек будет творить преступления — грабить, убивать, будет вести губительные войны, будет разрушать прекрасный мир своими ссорами, ложью, предательством, будет портить и уничтожать все, что зеленеет и цветет...

И Господь им ответил: «Видя в человеке только плохое, вы и судите его сурово. Я же вижу в нем и хорошее, и поэтому суд Мой милосерден. В грядущие времена человек будет вместе со Мной созидать. Он будет снова и снова переделывать мир, как это делал Я, и наступит такой день, когда он останется доволен трудами рук своих. Мне же от человека нужно одно: чтоб, восхваляя Меня, он сам совершенствовался и совершенствовал созданный Мной мир.

Человек разгадает секреты Вселенной и тайны Творения. Он будет исполнять Мои заповеди и приобщать к ним других. Он будет стоять на страже справедливости, накормит голодных, не даст в обиду ни вдов, ни сирот.

Он будет следовать Моему Закону и приобщать к нему других. Человеку предстоит проделать долгий путь к совершенству, прежде чем он его достигнет. И как мы будем счастливы потом, когда, придя на Землю, услышим из его уст мудрые слова Закона! И тогда вы возрадуетесь и скажете: “Он превзошел нас в мудрости”».

И Господь создал человека.

Жизнь великих работников науки, подобных Гарри Найквисту, является подтверждением мудрости Всевышнего.

Стефан РАЙС

Наука ставит нас в постоянную связь с чем-то высшим, более великим, чем мы, она нам демонстрирует непрерывный переход ко все более высшему, и это зрелище приносит нам радость, и в этой радости мы забываем о себе, и благодаря этому она становится агентом морального здоровья.

Анри Пуанкаре



Введение

Техника электросвязи, возникшая в середине XIX в., открыла огромные возможности для коренных изменений в жизни людей. Она создала предпосылки для единения всех людей, предоставив им средства, позволяющие решать актуальные личные и производственные проблемы, не затрачивая время на перемещения в пространстве на тысячи километров. Электросвязь стала мощным катализатором технического, культурного и экономического прогресса человечества.

В течение почти ста лет ученые и инженеры, работающие в области электросвязи, уделяли основное внимание совершенствованию техники и технологии производства оборудования связи. Научные исследования фундаментальных закономерностей передачи и приема информации по каналам связи приобрели актуальность в 30-х гг. XX в., когда во всем мире резко возросли потоки информации, передаваемые по каналам связи. Это было связано с тем, что в мире стало быстро расти количество действующих телефонных аппаратов, приемников звукового и телевизионного вещания. Развитие сетей вещания влекло за собой необходимость распределения программ звукового и телевизионного вещания внутри стран и обмена этими программами между странами.

Суть новых проблем перед учеными и инженерами состояла в том, что надо было определить принципы, на которых должны быть основаны оптимальные методы обработки сигналов на передаче и приеме. Такие методы позволяли бы обеспечить высокую эффективность использования канала связи и наивысшую помехоустойчивость приема сигналов. Предмет теории связи и составляет установление этих принципов.

Первые фундаментальные работы в области теории связи были выполнены Г. Найквистом, определившим ограничения на скорость передачи телеграфных сигналов по каналам связи с заданной полосой частот. Этой областью науки занимались известные американские и отечественные ученые: Р. Хартли, который вплотную подошел к определению количества информации, содержащейся в передаваемом сообщении, Д.В. Агеев, разработавший теорию линейной селекции сигналов, В.И. Сифо-

ров, создавший основы теории приема сигналов с разными видами модуляции, и В.А. Котельников, установивший знаменитую и носящую сегодня его имя теорему, которая лежит в основе современных цифровых методов передачи информации по каналам связи. Такие методы в 70-е гг. XX в. пришли на смену традиционным аналоговым методам, и сегодня они определяют будущие перспективы развития связи.

Новые революционные подходы к исследованию фундаментальных принципов передачи и приема информации по каналам связи были разработаны в конце 40-х гг. XX в. Они основывались на статистическом описании характеристик каналов связи и действующих в них шумов, а также передаваемых по каналам связи информационных сигналов.

Новые подходы были тесно связаны с именами нескольких крупнейших ученых XX в.: Н. Винера, В.А. Котельникова, К. Шеннона и С.О. Райса. В значительной степени благодаря этим людям кардинально изменился теоретический ландшафт в области теории связи. Они открыли новые статистические закономерности в области передачи, приема и обработки информации и вооружили инженеров и ученых, работающих в этой области, совершенно новыми взглядами на проблемы электросвязи. Это способствовало прогрессу в технике связи, произошедшему в последние полвека.

В открытии и познании этих новых статистических закономерностей выдающаяся роль принадлежит американскому ученому Стефану Райсу.

Биографический очерк

Стефан Райс родился 29 ноября 1907 г. в небольшом американском городке Шедс штата Орегон. В 1929 г. он окончил университет в г. Корваллисе и стал инженером-электриком, получив степень бакалавра. Райс был очень талантливым человеком. Он самостоятельно получил блестящее математическое образование, решив все задачи из книги «Современный анализ» Э. Уиттекера и Г. Ватсона, по которой изучали математику многие выдающиеся ученые XX в.

В 1930 г. Райс становится сотрудником знаменитой Белл-лаборатории и работает в ее отделении в г. Мурай Хилл штата Нью-Джерси. В этой лаборатории он проработал с небольшими перерывами до своего выхода на пенсию в 1972 г. Первый перерыв пришелся на 1931 г. — год экономической депрессии в США. В этом году он перешел в Калифорнийский технологический университет и некоторое время работал под руководством известного специалиста по высшим трансцендентным функциям Гарри Бутмана, принимая участие в составе большой группы математиков в подготовке уникального трехтомного математического справочника. Этот справочник впоследствии приобрел всемирную известность и был издан на русском языке (Наука. 1965—1967). Другой перерыв в работе в Белл-лаборатории пришелся на 1958 г., когда он в качестве приглашенного профессора прочел курс лекции в Гарвардском университете.

В конце своей карьеры Райс возглавлял отдел в математическом исследовательском центре Белл-лаборатории. Он руководил группой ученых, работавших над проблемами связи и информации, и вел собственные научные исследования. В его отделе царила творческая и дружеская атмосфера. Он пользовался большим авторитетом у своих сотрудников как мастер, владеющий всеми тайнами классического математического анали-

за, специальных функций и асимптотических методов. Райс никогда не довольствовался только теоретическими построениями, а всегда доводил свои исследования до численных расчетов. Он был способен критически оценить любую проблему. Дверь в его кабинет всегда была открыта, и он проявлял живой интерес к работе всех своих сотрудников.

После выхода на пенсию в 1972 г. С.О. Райс продолжал активно вести научную работу в Калифорнийском университете в г. Сан-Диего в качестве физика-исследователя. Администрация университета полностью освободила его от каких-либо официальных обязанностей, и он занимался только исследовательской работой. В своем кабинете он появлялся ежедневно. Связанный с ним по работе в университете известный американский ученый Карл Хелстром вспоминал: *«Стефан Райс сохранял высокую работоспособность вплоть до самых последних дней своей болезни. Обычно он появлялся в университете около 7 утра для того, чтобы использовать компьютер, пока он не будет сильно занят другими сотрудниками и студентами. В 10 или 11 часов он отправлялся домой, но после полудня он снова приходил в университет. Если вы обращались к нему за помощью в решении проблемы, которую вы не смогли решить сами, то, как правило, через день или два он приносил вам или присылал несколько исписанных мелким почерком листочков, содержащих математический анализ вашей проблемы. Письменный стол Райса всегда был завален книгами и бумагами. Книги лежали и на полу его кабинета. Он часто что-то писал, сидя и держа блокнот на своих коленях. Доска в его кабинете всегда была заполнена формулами, и если вы заходили в его кабинет с вопросом, то он быстро стирал с доски свои записи и заполнял ее новыми формулами, в которых содержался ответ на ваш вопрос. Он помогал всем, кто к нему обращался, и с радостью брался за решение любой новой научной проблемы. Его было всегда трудно убедить прервать начатую работу».*

По воспоминаниям коллег, Райс был тихим и застенчивым человеком, однако он был полностью уверен в своем таланте и ясно осознавал, что он собой представляет. Благодаря своей квалификации он брался за решение сложнейших проблем, с которыми ему приходилось сталкиваться. Райс обладал мощнейшей интуицией и способностью проникать в самую суть проблемы.

Выполнив фундаментальные исследования по статистической радиотехнике, он уже в начале 40-х гг. стал признанным научным лидером в этой области. Его знаменитая статья «Математический анализ случайных шумов» [1] была написана в 1943 г. и опубликована в журнале «Bell System Technical Journal – BSTJ» в 1944 и 1945 гг. Ее результаты стали известны многим специалистам США, участвующим во время Второй мировой войны в работах, которые выполнялись по заказу Министерства обороны США и были направлены на увеличение дальности действия и повышение эффективности радиолокационных установок, используемых в военных действиях против нацистской Германии, и создание систем радиопротиводействия радарным установкам противника.

К выполнению таких исследований были привлечены лучшие ученые США: К. Шеннон — сотрудник Белл-лаборатории, Дж. Г. Ван Флек, возглавлявший в 40-е гг. теоретическую группу исследовательской радиолоборатории Гарвардского университета, а позже ставший нобелевским лауреатом по физике, его молодой сотрудник Д. Миддлтон, профессора Н. Винер и Г.Е. Уленбек, работавшие в радиационной лаборатории Массачусетского технологического института, и др.

Работы Райса были первоклассными. В 1943 г. крупные американские ученые профессора Дж. Г. Ван Флек и Г.Е. Уленбек независимо написали письма, в которых рекомендовали ему представить статью «Математический анализ случайных шумов» в качестве докторской диссертации в Колумбийский университет. Как и его коллега Клод Шеннон — знаменитый ученый Белл-лаборатории, Стефан Райс был необычным человеком. Он был совершенно лишен тщеславия и равнодушен к знакам внешнего признания своих научных заслуг. Стимулом творчества для него являлась исключительно внутренняя потребность, а не публичное признание. По-видимому, поэтому только через пять лет Райс последовал данному ему совету и представил свою работу в Лондонский университет. Однако через несколько месяцев после этого он пишет на физический факультет Лондонского университета письмо, в котором сообщает, что, к сожалению, он не располагает временем, чтобы сдать необходимые для защиты диссертации экзамены по математике, и просит снять с защиты свою диссертацию. Он так и не выполнил тех формальных требований, которые были необходимы для защиты докторской диссертации. Только в 1961 г., когда ему исполнилось 54 года, он получил ученую степень почетного доктора наук, которая без защиты диссертации была присвоена ему Государственным университетом штата Орегон. Это произошло через 31 год после того, как он окончил этот университет. К этому времени он опубликовал множество научных работ, получивших всемирное признание.

Научные заслуги Стефана Райса были высоко оценены научной общественностью. Он был избран почетным членом Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE), членом Национальной инженерной академии США. В 1965 г. ему была присуждена премия Мервина Дж. Келли, а в 1974 г. за выдающиеся заслуги в области телекоммуникаций он стал лауреатом премии Комитета по национальным конференциям. В 1983 г. за свои заслуги в создании научных основ теории связи он был удостоен самой престижной награды IEEE — медали Александра Грэхема Белла.

Райс был женат, имел сына и двух дочерей.

Стефан Райс скончался 18 ноября 1986 г. в г. Сан-Диего штата Калифорния.

Научные результаты

Основополагающие работы С. Райса оказали огромное влияние на развитие теории связи. Число его научных публикаций сравнительно невелико (около 60), однако все они содержат новые идеи, которые подхватывали и развивали другие ученые, получая на их основе новые научные результаты. В научном творчестве С. Райса можно выделить несколько направлений.

Теория флуктуационных шумов. В своих работах, результаты которых вошли в статью [1], он развил методы исследования статистических характеристик процессов, прошедших нелинейные цепи приемных устройств (детекторов, преобразователей частоты, пороговых устройств). Им был, в частности, предложен и развит оригинальный метод характеристических функций. Суть этого метода в том, что нелинейная характеристика устройства, через которое проходит случайный сигнал, представляет

собой преобразование Фурье. Такое представление существенно упрощало исследование статистических характеристик процессов на выходе нелинейных устройств, в частности определение их корреляционных функций и спектров мощности.

Райс был первым, кто определил распределение вероятностей амплитуды сигнала, представляющего сумму гармонического колебания и случайного гауссовского шума [1, 2]. Он также определил распределение фазы и частоты суммарного сигнала [2]. В честь С. Райса распределение огибающей суммарного процесса называется райсовским, и оно как математическая модель замираний сигнала играет важную роль в разных разделах теории связи: теории разнесенного приема замирающих сигналов, теории приема сигналов с частотной модуляцией и т.д. (Следует отметить, что в случае отсутствия в сигнале гармонической компоненты такой закон был выведен еще в начале XX в. знаменитым английским физиком Рэлеем и носит его имя. Кроме того, японский ученый Накагами получил распределение Райса несколько ранее — в 1940 г. Однако его важные результаты были опубликованы в Японии только после окончания Второй мировой войны и не были известны в США. Во всяком случае можно утверждать, что результаты Райса оказали гораздо большее влияние на развитие работ в этой области.)

Математическая модель шума. В своей работе [1] С. Райс, разрабатывая теорию дробового эффекта в электронных лампах, создал общий метод определения закона распределения тока, представляющего собой наложение случайных возмущений. Эти возмущения вызывались приходом на анод лампы отдельных электронов. Данный метод получил существенное развитие в конце 70-х гг. в работах другого выдающегося ученого современности Д. Миддлтона, предложившего статистическую модель электромагнитных радиопомех, действующих в диапазоне частот до 1 ГГц и обусловленных как грозowymi разрядами в атмосфере, так и помехами индустриального происхождения. В данном диапазоне частот помехи имеют импульсную составляющую и их распределение вероятностей является негауссовским. Такая модель позволяла синтезировать оптимальные устройства приема сигналов в условиях, когда действуют такие помехи.

Теория выбросов случайных процессов. Результаты теории выбросов случайных процессов имеют большое значение в теории связи. Их применяют при анализе помехоустойчивости приема сигналов, устройств слежения, используемых в разных радиотехнических системах, при анализе систем разнесенного приема замирающих сигналов. Среди многих базовых результатов теории случайных процессов, которые были получены С. Райсом, следует отдельно отметить его результаты, в области теории выбросов случайных процессов. Еще в 1936 г. им впервые была получена формула для средней частоты пересечения случайным процессом определенного уровня. В 1939 г. он определил распределение максимумов случайных процессов. В работе [1] теория выбросов получила дальнейшее развитие. Райс впервые получил формулы, позволяющие найти распределение длительности, максимумов и нулей гауссовского случайного процесса, а также распределение выбросов его огибающей. В 1958 г. он опубликовал работу [3], в которой дал метод определения длительности замираний при распределении амплитуды полезного сигнала по закону Рэля.

Теория выбросов случайных процессов получила в последующие годы развитие в работах многих крупных ученых, создавших новые подходы к ее решению и обосновавших ее математически строго. В США значительные работы были выполнены

М. Кацем, Д. Слепяном, М.К. Вангом и Г.Е. Уленбеком, К.В. Хелстромом и А. Дж. Рейналом. В нашей стране это направление активно развивали профессор Р.Л. Стратонович, В.И. Тихонов, Б.Р. Левин и Я.А. Фомин. Профессор В.И. Тихонов в 1970 г. написал обстоятельную книгу «Выбросы случайных процессов», содержащую как его собственные результаты, так и результаты других ученых, полученные к этому времени.

Подход С. Райса к проблеме выбросов был эвристическим. Однако он всегда интересовался математически строгими решениями. Интерес к этой проблеме С. Райс сохранял всю свою жизнь. Он следил за новыми результатами, появляющимися в этой области, вел активно переписку с теми учеными, которые также работали над этими проблемами.

Теория информации. С.О. Райс внес существенный вклад в теорию информации. Опубликованная в 1948 г. работа К. Шеннона «Математическая теория связи» сразу привлекла к себе большое внимание. Она вводила многие новые понятия в теорию связи и делала неожиданные для инженеров-практиков заключения о возможностях существенного повышения эффективности передачи информации по каналам связи и помехоустойчивости приема. Шеннон, в частности, доказал теорему, согласно которой можно так построить систему передачи информации, чтобы обеспечить безошибочную передачу по каналу связи данных со скоростью $R < C = F \log[1 + (P_s/P_n)]$, где F — полоса частот канала связи, P_s — мощность полезного сигнала, P_n — мощность шума, C — пропускная способность канала связи. Шеннон указал также, что этого можно достичь, вводя на передаче большую задержку T , т.е. кодируя длинные блоки передаваемых символов.

К. Шеннон получил этот результат, не рассматривая какую-нибудь конкретную схему передачи информации. Доказательство Шеннона было неконструктивно и основывалось на сложном математическом аппарате, которым не владели многие инженеры-практики. Это приводило к неверному пониманию и к попыткам неправильного применения полученных Шенноном результатов к практическим задачам. Многие инженеры в те годы высказывали сомнения в справедливости результатов Шеннона, а некоторые открыто выражали свое возмущение их экстравагантностью.

С.О. Райс всегда был готов воспринимать новые идеи, умел ценить и восхищаться научными результатами, которые получали другие ученые. В 1950 г. он публикует работу «Связь при наличии шума — вероятность ошибочного приема для двух схем кодирования» [4]. Эта была его единственная работа по теории информации, однако она носила фундаментальный характер и являлась одним из важнейших вкладов в развитие этой теории. В ней он, основываясь на геометрической формулировке проблем теории связи, данной К. Шенноном в 1949 г., предложил для доказательства теоремы Шеннона метод случайного кодирования.

Суть названного метода в том, что С. Райс определял вероятность ошибки $P_{\text{ош}}$ при оптимальном приеме одной из комбинаций выбранного случайным образом кода, содержащего M кодовых комбинаций. Усредняя $P_{\text{ош}}$ по всем возможным ансамблям случайно выбираемых кодов, он получил оценку сверху для вероятности ошибки при приеме оптимального кода. Анализ, выполненный С.О. Райсом, дал количественные зависимости $P_{\text{ош}} = f(R, C, M)$, из которых следовала теорема Шеннона. Эти зависимости позволяли оценить, при каких значениях M возможно в достаточной степени при-

близиться к тому пределу помехоустойчивости, который был определен Шенноном. Результаты С.О. Райса только через несколько лет были улучшены другими учеными. Среди них следует назвать самого К. Шеннона, Б.С. Флешмана, Д. Слепяна и др. Следует, однако, подчеркнуть, что С. Райс был первым, кто перекинул мост между теорией потенциальной помехоустойчивости и теорией информации, показав, как на основе этой теории можно установить результаты теории информации.

Импульсная модель шума, возникающего при детектировании сигналов с частотной модуляцией (ЧМ). На протяжении большей части XX в. во многих системах подвижной, радиорелейной и спутниковой связи широко использовалась ЧМ. При этом одной из весьма сложных проблем, которая на протяжении нескольких десятилетий имела важное практическое значение, была проблема расчета пороговых характеристик демодуляторов ЧМ-сигналов. С.О. Райс, всегда глубоко проникавший в физическую сущность процессов в исследуемых устройствах, в 1963 г. опубликовал обширную статью [5] о разработанной им импульсной модели шума, возникающего на выходе частотного демодулятора (ЧД). Он заметил, что процесс, действующий на входе ЧД, имеет два состояния: когда амплитуда шума не превышает амплитуды полезного сигнала и когда она больше его. В первом состоянии шум на выходе ЧД имеет гладкий характер и представляет собой случайный гауссовский процесс с треугольным энергетическим спектром мощности. Во втором случае шум на выходе ЧД приобретает импульсный характер. С.О. Райс разработал методику нахождения средней частоты появления импульсов шума, действующего на выходе ЧД. Число этих импульсов, являющихся за определенный промежуток времени, распределено по закону Пуассона.

Предложенная С.О. Райсом модель шума, возникающего на выходе ЧД, с одной стороны, позволяла достаточно просто рассчитать пороговые характеристики ЧМ-демодуляторов (зависимости, связывающие отношения сигнал/шум на входе и выходе демодулятора), а с другой — подсказывала метод повышения помехоустойчивости приема ЧМ-сигналов путем обнаружения на выходе ЧД-пороговых импульсов. Данный метод заключался в восстановлении пораженных импульсами участков полезного сигнала путем его интерполяции. На основе этой модели в течение почти 20 лет десятки ученых в разных странах выполняли исследования, связанные с помехоустойчивостью приема ЧМ-сигналов.

Методы определения нелинейных искажений сигналов. Одна из важнейших проблем теории связи — разработка методов оценки нелинейных искажений, которые возникают при прохождении сигналов через элементы передающего и приемного трактов или через канал связи. Многие ученые разрабатывали методы оценки таких искажений. В этой области С.О. Райсом также были выполнены фундаментальные исследования. Данная проблема имеет особую сложность в том случае, если для передачи информации используются нелинейные методы модуляции. Как уже отмечалось, в радиотехнике широчайшее распространение в XX в. получили системы связи с ЧМ.

В 1955 г. Райсом вместе с другими учеными впервые в мире была опубликована теоретическая статья [6], в которой был дан метод расчета нелинейных искажений, возникающих в многоканальных радиорелейных системах с ЧМ. В 1968 г. Е. Бедросян и С.О. Райс предложили новый, весьма эффективный метод оценки нелинейных искажений в системах связи с ЧМ, основанный на использовании рядов Вольтерра [7]. Эти ряды являются мощным математическим средством решения многих проблем, связан-

ных с расчетом нелинейных искажений, возникающих в разных элементах систем связи. После публикации этой статьи появились работы других ученых [8], использующих ряды Вольтерра для решения проблем теории связи. Сам Райс также неоднократно возвращался к этим проблемам.

Любопытно отметить [8], что предложенный в [7] метод за два года до этого был опубликован румынским ученым А. Мирча [9, 10], который в своем письме [11] указал на это авторам статьи [7]. Е. Бедросян и С.О. Райс в своем ответе [11] выразили сожаление, что превосходные работы А. Мирча ускользнули от их внимания и признали его приоритет в создании нового метода оценки нелинейных искажений в системах связи с ЧМ.

Райс внимательно следил за научными публикациями, посвященными интересующим его проблемам, не только в США, но и в других странах. В одной из его работ [12], опубликованной в 1969 г. и также посвященной расчету нелинейных искажений ЧМ-сигналов в линейных системах, был развит метод, впервые предложенный известным советским ученым профессором С.В. Бородичем.

В 1971 г. С. Райс вместе с Е. Бедросяном публикует работу [13], в которой дан общий метод расчета искажений с использованием рядов Вольтерра в любых нелинейных системах связи, а в 1973 г. выполняет исследование [14], посвященное определению искажений в системах с несколькими входами, на которые поступают сигналы. В качестве примера применения полученных результатов в этой работе им определены искажения принимаемого сигнала, возникающие в преобразователях частоты.

Полученные С.О. Райсом результаты вошли во все монографии и учебники по статистической радиотехнике, изданные в США и в нашей стране.

Хотя основные работы Райса касались теории флуктуационных шумов, он не ограничивался этими проблемами. Круг его научных интересов был необычайно широк, он выполнил несколько значительных работ, посвященных проблеме межсимвольной интерференции, теории массового обслуживания и исследованию отражения радиоволн от неровной поверхности.

Межсимвольная интерференция. Этой проблеме посвящена всего лишь одна собственная работа С.О. Райса [15], опубликованная в 1973 г., в которой было найдено распределение вероятностей уровня межсимвольной помехи, возникающей в цифровых системах связи из-за ограниченности полосы пропускания канала связи. Его собственные результаты и те обсуждения проблем, связанных с межсимвольной интерференцией, которые он проводил со своими сотрудниками, стали стимулом для появления новых важных работ в этом направлении.

Теория массового обслуживания. Работая в Белл-лаборатории, С.О. Райс не мог остаться в стороне от одной из сложнейших проблем телефонии — проблемы очередей, возникающих при обслуживании телефонной нагрузки. Этой проблеме посвящена его обширная работа [16], выполненная в 1962 г. При перегрузке коммутатора из-за одновременного обращения большого числа абонентов происходит потеря вызова, если в алгоритме обслуживания не предусмотрена постановка поступившего вызова в очередь на обслуживание. На практике абонент, вызов которого не прошел, делает подряд несколько попыток установить соединение. С. Райс предложил метод определения распределения вероятностей времени ожидания абонентом соединения и вероятности потери вызова в такой системе.

Отражение радиоволн от неровной поверхности. В 1951 г. было опубликовано его исследование [17], посвященное проблеме отражения радиоволн от статистически неровной поверхности (например, от поверхности океана). Он рассмотрел отражение радиоволн от поверхностей с небольшими неровностями (иногда такую модель отражения называют моделью Рэля—Райса) и установил формулу для коэффициента отражения. Исследование С.О. Райса было одним из первых в этом направлении и явилось отправной точкой для многих последующих работ. Отечественные ученые Ф.Г. Басс и И.М. Фукс провели важные исследования в данном направлении, которые были опубликованы издательством «Наука» в 1972 г. в книге «Рассеяние радиоволн на статистически неровной поверхности». В 1979 г. книга была переведена на английский язык и издана в США. Ряд значительных работ по рассеянию гидроакустических волн был выполнен крупнейшим американским ученым Д. Миддлтоном. В память о С. Райсе в 1988 г. вышел специальный выпуск журнала IEEE Trans. on Information Theory [18].

Заключение

Еще 2500 лет назад древнегреческий философ Анаксагор утверждал, что *«разум правит миром»*. Он считал, что целью человеческой жизни является теоретическое познание и происходящая отсюда свобода. Нельзя, по-видимому, придавать абсолютное значение этой мысли Анаксагора, однако ее, безусловно, подтверждает жизнь Стефана Райса. Его жизнь была посвящена теоретическим исследованиям разнообразных проблем современной теории связи, и практически все полученные им результаты легли в ее основание и оказали глубокое влияние на ее развитие. Работы Райса открыли обширную область исследований, в которой работали многие ученые.

Он принадлежал к той категории людей, которые полностью устремлены в будущее. Для таких ученых естественен стиль работы, который приводит к новым оригинальным результатам. Обобщения и систематизация научных результатов, полученных другими учеными, их не интересуют. Такими учеными были, например, Н. Винер и К. Шеннон.

Действительно, Райс не написал монографии по теории шумов, однако без ссылок на полученные им результаты не издано, по-видимому, ни одной книги, затрагивающей те или иные вопросы теории связи. Разработанные им методы развивались многими крупными учеными XX в. Они стали обыденным расчетным инструментом инженеров для решения многообразных практических задач, связанных с обработкой сигналов в устройствах связи. Его результаты вошли в «золотой фонд» мировой науки.

Глубокая интуиция и необычайный математический талант позволяли Райсу формулировать основные проблемы и получать первые результаты задолго до того, как появлялись строгие математические методы их решения. Однако он всегда интересовался строгими методами решения этих проблем, создаваемыми другими учеными.

Райс был не только гениальным ученым, но и чрезвычайно отзывчивым человеком. В научном мире он имел огромный авторитет. Многие ученые обращались к нему за советами и получали от него помощь, в которой он никому и никогда не отказывал. Он живо интересовался исследованиями других ученых и охотно вступал с ними в переписку. Знавшие Райса люди искренне любили его.

Именно таких людей, как Стефан Райс, имел в виду знаменитый русский поэт И.А. Бунин, когда писал следующие строки:

*Счастлив тот, кто жизнью мир пленяет.
Но стократ счастливей тот, чей прах
Веру в жизнь бессмертную вселяет
И цветет легендами в веках!*

Литература

1. *Rice S.O.* Mathematical Analysis of Random Noise // BSTJ. 1944. №3; 1945. № 1.
2. *Rice S.O.* Statistical properties of a sine wave plus random noise // BSTJ. 1948. № 1.
3. *Rice S.O.* Distribution of the duration of fades in radio transmission // BSTJ. 1958. № 5.
4. *Rice S.O.* Communication in the presence of noise-probability of error for two encoding schemes // BSTJ. 1950. № 1.
5. *Rice S.O.* Noise in FM Receivers. Time Series Analysis. M. Rosenblatt. N. Y.: Wiley. 1963. Ch. 25.
6. *Bennett W.R., Curtis H.E., Rice S.O.* Interchannel interference in FM and PM systems under noise loading conditions // BSTJ. 1955. № 3.
7. *Bedrosian E., Rice S.O.* Distortion and Crosstalk of Linearly Filtered Angle-Modulated Signals // Proc. IEEE. 1968. № 1.
8. *Быховский М.А.* Круги памяти // Сер. изданий «История электросвязи и радиотехники». — М.: Мобильные коммуникации. 2001. Вып. 1.
9. *Мирча А.* Теория искажений ЧМ-сигналов // ТИИЭР. 1966. № 4.
10. *Мирча А.* Теория интермодуляционных шумов при ЧМ // ТИИЭР. 1966. № 10.
11. Further Comments on «Distortion and Crosstalk of Linearly Filtered Angle – Modulated Signals» // Proc. IEEE. 1969. № 5.
12. *Rice S.O.* Second and third order modulation terms in the distortion produced when noise modulated FM waves are filtered // BSTJ. 1969. № 1.
13. *Bedrosian E., Rice S.O.* The output properties of Volterra systems (nonlinear systems with memory) driven by harmonic and Gaussian input // Proc. IEEE. 1971. № 12.
14. *Rice S.O.* Volterra Systems With More Than One Port-Distortion in a Frequency Converter // BSTJ. 1973. №8.
15. *Rice S.O.* Single server systems. // BSTJ. 1962. № 1.
16. *Rice S.O.* Distribution of $\sum_n \delta_n/n$, δ_n randomly equal to ± 1 // BSTJ. 1973. №9.
17. Reflection of electromagnetic waves from slightly rough surfaces // Commun. Pure Appl. Math. 1951. V. 4. № 2, 3.
18. Специальный выпуск журнала IEEE Trans. on Information Theory, посвященный памяти С.О. Райса. 1988. № 6.

Владимир Иванович СИФОРОВ

Жизнь истинная есть только та, которая продолжает жизнь прошедшую, содействует благу жизни современной и благу жизни будущей. ...Человек сохраняет свою жизнь только тогда, когда он на жизнь свою смотрит как на залог, как на талант, данный ему Отцом, для того чтобы служить жизни всех, когда он живет не для себя, а для сына человеческого.

Лев Толстой



Введение

Вопрос о смысле жизни — один из вечных вопросов, на которые искали и продолжают искать ответ лучшие умы человечества. Екклесиаст — он же мудрейший царь иерусалимский Соломон отвечал на этот вопрос так: «Все суета сует и томление духа».

Екклесиаст считал, что приобретение мудрости и знания является такой же суетой, такой же погоней за ветром, как и все остальное в человеческой жизни. Он считал, что мудрость не только не увеличивает человеческого счастья, но показывает ему всю призрачность его надежд и безрезультатность его стремлений.

Такие взгляды ведут либо к цинизму, либо к крайнему пессимизму. Ибо если согласиться с Екклесиастом, то человеку или следует, не задумываясь над смыслом своей жизни, стремиться исключительно к получению максимума удовольствий, или надо признать, что его жизнь никакого смысла не имеет. Лев Толстой, многие годы разделявший эти взгляды, тем не менее всю свою жизнь напряженно искал ответ на вопрос о смысле человеческого существования. Это принесло ему невероятные страдания. В своем знаменитом произведении «Исповедь» он писал, что эти взгляды чуть было не привели его к самоубийству. Спасло только то, что на вопрос о смысле жизни он нашел свой собственный ответ, который приведен в эпиграфе к данному очерку.

Жизнь В.И. Сифорова, как и жизнь многих других людей, и в особенности людей, творчески одаренных, посвятивших себя созиданию, является убедительным свидетельством в пользу тех взглядов на смысл жизни, к которым в результате своих мучительных поисков пришел Лев Толстой.

В.И. Сифоров — один из крупнейших ученых современности в области радиотехники, радиосвязи и вещания. Его жизнь — яркий пример того, какими возможностями может располагать человек в достижении высших результатов в выбранной сфере деятельности, если он с юных лет осознает свое предназначение. Никакие жизненные препятствия не могут ему помешать.

Подобно великому русскому ученому М.В. Ломоносову — сыну рыбака-помора, начавшему учиться грамоте только в 19 лет, великому английскому физику Фарадею — сыну бедного ремесленника, до 19 лет работавшему переплетчиком книг, этот человек, ведомый по жизни инстинктом созидания, сотворил себя сам.

Оказавшись в детстве на улице беспризорником, Сифоров сумел, благодаря своему феноменальному трудолюбию и способностям, получить высшее образование и войти в элиту ученых, решавших в XX в. сложнейшие проблемы радиотехники, связи и вещания.

Поразительным является многообразие научных интересов и необычайная широта сферы деятельности Сифорова. Он проявил себя как выдающийся ученый, получивший фундаментальные научные результаты во многих областях радиотехники и теории связи, как крупнейший отечественный педагог, организовавший в нескольких ведущих институтах кафедры радиотехники и радиоприемных устройств. Сифоров также крупный организатор масштабных научных исследований и разработок новой техники на отечественных промышленных предприятиях. Помимо этого он активно вел международную и общественную деятельность.

В 1938 г. он становится профессором, в 1953 г. избирается членом-корреспондентом Академии наук (АН) СССР, а в 1992 г. за выдающиеся заслуги в развитии радиоэлектроники в нашей стране был, по представлению Научно-технического общества радиоэлектроники и связи им. А.С. Попова, награжден Президиумом АН СССР большой золотой медалью им. А.С. Попова.

Как видный ученый В.И. Сифоров был известен во всем мире. Он был почетным членом Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE), почетным членом Венгерской академии наук, в 1967 г. на V Международном симпозиуме по телевидению (Монтре, Швейцария) за свои работы по составлению Стокгольмского плана распределения частотных каналов для телевизионных и УКВ-ЧМ-станций в Европе был награжден Международным почетным дипломом.

Его гигантская созидательная деятельность отмечена многими высшими правительственными наградами.

Биографический очерк

Владимир Иванович Сифоров родился 31 мая 1904 г. в Москве в семье мелкого торговца. В детстве судьба уготовила ему суровые испытания. Он рано лишился матери, а родной отец бросил его на произвол судьбы, в результате чего он оказался на улице. После нескольких лет беспризорной жизни он попал в детскую колонию. Хотя в колонии и действовала средняя школа, но никакого серьезного обучения детей на самом деле не было. Тем не менее в школе преподаватель математики заметил большие способности юноши и стал давать ему книги великих математиков прошлого: Бернулли, Эйлера, Маркова, Ньютона и др. Благодаря своей настойчивости и любознательности Сифоров к 16 годам овладел дифференциальным и интегральным исчислением. Тяга к учебе у него была столь велика, что он самостоятельно изучил все предметы школьной программы и в 1921 г., сдав выпускные экзамены, получил аттестат зрелости.

У молодого человека, оказавшегося в таком положении и не имеющего средств к существованию, который не может рассчитывать на материальную поддержку родственников, естественной заботой было бы быстрее приобретение рабочей специальности. Однако В.И. Сифоров принадлежал к тем самородкам, которые с юных лет осознают свое призвание и предназначение, и это определяет их жизненный путь.

После окончания школы В.И. Сифоров сразу же поступил в Московский механико-электротехнический институт им. М.В. Ломоносова. В 1924 г. этот институт реорганизовали и В.И. Сифоров был переведен в Ленинградский электротехнический институт (ЛЭТИ), который успешно закончил в 1929 г.

Во время обучения в институте он вынужден был постоянно искать себе заработок: преподавал физику и математику в детском доме, руководил производственными мастерскими, занимался репетиторством, работал грузчиком в Ленинградском порту. В 1927 г. он наконец устраивается на работу по специальности радиотехником в лабораторию Ленинградского аппаратного завода им. Козицкого.

Через год он переходит на работу в Центральную радиолaborаторию (ЦРЛ) Треста заводов слабого тока. Впоследствии ЦРЛ была реорганизована в Научно-исследовательский институт радиовещательного приема и акустики (ИРПА). В этой организации он проработал вплоть до начала Великой Отечественной войны. В ЦРЛ в те годы работали крупнейшие отечественные радиотехники: Д.А. Рожанский, А.М. Бонч-Бруевич, В.В. Татарин, А.А. Пистолькорс и многие другие. В их числе были И.Г. Фрейман и А.И. Берг, которые на первых порах руководили научной работой В.И. Сифорова.

В ЦРЛ карьера В.И. Сифорова развивалась весьма успешно. Он вел интенсивную научную работу в области радиоприемной техники и с должности инженера был переведен на должность сначала заведующего лабораторией приемных устройств, затем начальника лаборатории новых методов радиоприема, и позднее — научного руководителя и консультанта по вопросам радиоприема ИРПА.

Интенсивность научной деятельности В.И. Сифорова в этот, как и в последующие периоды жизни, поразительна. В ЦРЛ совместно с А.П. Северсом он создает первый отечественный коротковолновый приемник для магистральной связи. До 1936 г., всего за несколько лет работы после окончания института, он опубликовал 40 статей, три монографии и один учебник по методам расчета радиоприемных устройств и получил шесть авторских свидетельств на изобретения.

В 1936 г. В.И. Сифоров представил к защите диссертацию на тему «Исследование методов радиоприема, основанных на секции по амплитуде, фазе и продолжительности действия», за которую ему сразу же была присуждена степень доктора технических наук. Эта работа явилась важной вехой в развитии теории связи.

Сразу же после окончания института В.И. Сифоров стал совмещать работу и преподавание в радиотехнических институтах. Вначале он в качестве ассистента преподавал в ЛЭТИ, а впоследствии стал профессором и организовал в этом институте кафедру радиоприемных устройств. В конце 30-х гг. заведовал кафедрой радиотехники в Ленинградском институте повышения квалификации инженеров и кафедрой радиоприемных устройств в Ленинградском электротехническом институте связи (ЛЭИС) им. проф. А.М. Бонч-Бруевича.

Сразу же после начала Великой Отечественной войны В.И. Сифоров был призван в армию и назначен старшим преподавателем факультета электрооборудования самолетов Ленинградской военно-воздушной инженерной академии (ЛВВИА) им. А.Ф. Можайского. В 1943 г. он назначается начальником кафедры радиотехники, а в 1945 г. ему присваивается звание инженер-полковник и он становится заместителем начальника ЛВВИА по научной и учебной работе. После войны В.И. Сифоров возобновляет работу в ЛЭТИ в должности заведующего кафедрой радиоприемных устройств.

Педагогическая деятельность В.И. Сифорова была прервана на несколько лет в 1953 г., когда он по представлению министра связи СССР Н.Д. Псурцева был переведен в Москву и назначен директором одного из крупнейших отечественных институтов — Научно-исследовательского института радио (НИИР).

В 1957 г. В.И. Сифоров возобновляет педагогическую работу. Его избирают заведующим кафедрой радиоприемных устройств в Московском энергетическом институте (МЭИ), которую он возглавлял почти 30 лет. Одновременно он руководил отраслевой лабораторией кафедры и был членом ученого совета. На этой кафедре были разработаны новые методы обучения студентов с применением современных технических средств, издан ряд учебных пособий и новый учебник по радиоприемным устройствам.

С 1953 г. начинается новый важный этап жизни В.И. Сифорова, когда проявляется его талант организатора крупных научных исследований и разработок новой техники. На посту директора НИИР он был вплоть до 1957 г., с перерывом в 1954, 1955 гг., в течение которых он работал заместителем министра радиотехнической промышленности.

В НИИР он организует разработку остро необходимого для страны оборудования для магистральных радиорелейных линий связи (РРЛ) и теоретические исследования в области радиорелейной связи. К теоретическим исследованиям и работе по созданию радиорелейной техники привлекаются видные отечественные ученые: профессор В.А. Смирнов, Г.З. Айзенберг, С.В. Бородич и др. Это важное научное направление в НИИР в последующие годы возглавил профессор С.В. Бородич, а после него Н.Н. Каменский.

В НИИР по инициативе В.И. Сифорова разворачиваются также исследования в области радиовещания. Он предложил научные принципы частотного планирования (распределения частотных каналов между вещательными станциями, расположенными на одной территории), которые обеспечивали высокую эффективность использования радиочастотного спектра. На основе этих принципов были разработаны предложения нашей страны по составлению частотных планов высокочастотного и УКВ-ЧМ-звукового вещания и телевидения.

Работы в области частотного планирования сетей радиовещания в НИИР в дальнейшем развивались профессором С.В. Новаковским, д.т.н. С.С. Шлюгером, к.т.н. А.К. Кустаревым, Н.М. Санкиным и В.И. Труновым, д.т.н. М.Г. Локшиным, А.В. Кокоревым и Р.А. Красносельским, которые разрабатывали методологические рекомендации по построению практических частотных планов для сетей радиовещания.

В 1954 г. в Институте радиотехники и электроники (ИРЭ) АН СССР организуют лабораторию радиорелейной связи и радиоприема и ее руководителем становится В.И. Сифоров. В этой лаборатории проводят теоретические исследования про-

блем радиорелейной связи и прикладных вопросов теории кодирования. В ней в 1962–1965 гг. под руководством В.И. Сифорова была выполнена большая работа по оценке перспектив использования различных каналов радиосвязи в Единой автоматизированной сети связи (ЕАСС) страны. В эти годы он руководил секцией «Теория передачи, распределения и накопления информации» в Государственном комитете по проблеме «Передача, распределение и накопление информации и ЕАСС страны». Руководителем Комитета был министр связи СССР Н.Д. Псурцев, а его заместителем — инициатор создания ЕАСС академик А.А. Харкевич.

Лабораторию в ИРЭ В.И. Сифоров возглавлял вплоть до 1966 г., когда решением Президиума АН он был назначен директором Института проблем передачи информации (ИППИ) вместо безвременно скончавшегося академика А.А. Харкевича — инициатора создания этого крупнейшего отечественного института. На этом посту он проработал до 1989 г. После ухода с поста директора ИППИ Сифоров продолжал работать в этом институте до 1993 г.

Под руководством В.И. Сифорова исследования общих и математических проблем теории передачи информации в ИППИ получили дальнейшее развитие. В институте под его руководством разрабатывался ряд прикладных направлений, связанных с применением теории информации в лингвистике, биологии, общественных науках. Велись работы по проблемам теории кодирования, по цифровым методам передачи информации в сетях связи, по созданию теории и методов цифровой обработки видео- и многомерных сигналов.

В.И. Сифоров активно участвовал в международной работе и был одним из наиболее известных за рубежом отечественных ученых. Он неоднократно представлял достижения отечественной науки. Первый раз В.И. Сифоров в составе советской радиотехнической делегации был командирован в США Наркоматом тяжелой промышленности в 1934 г. Задачей делегации было заключение с фирмой Radio Corporation of America договора о развитии отечественной радиопромышленности. Он участвовал в работе Международной конференции по высокочастотному вещанию в 1948 г. и Чрезвычайной административной конференции радиосвязи и Исследовательских комиссий Международного союза электросвязи (МСЭ) в 1951 и 1952 гг. На этих конференциях им были предложены научные принципы частотного планирования сетей коротковолнового вещания и звукового и телевизионного вещания в диапазоне УКВ.

Необъятной является сфера общественной деятельности В.И. Сифорова, которой он придавал большое значение, считая, что эта работа крайне необходима для ускорения развития нашей страны. В своей последней книге «Тангенс выживания» он писал: «...выполнение общественной работы отвечало моей внутренней потребности делиться с людьми своими мыслями, суждениями, опытом и знаниями».

В.И. Сифоров был заместителем председателя научной комиссии Международного научного радиосоюза (УРСИ) по проблемам теории информации и членом комиссии по международным связям во Всесоюзном обществе «Знание». В.И. Сифоров активно участвовал в работе Союза советских обществ дружбы и укрепления связей с зарубежными странами и одно время был вице-президентом, а затем и президентом. В АН СССР он был членом Советского национального комитета УРСИ, членом Комиссии по международным научным связям при Бюро отделения механики и процессов управления АН и ряда других комитетов.

Значительный вклад В.И. Сифоров внес в развитие Научно-технического общества радиоэлектроники и связи им. А.С. Попова, председателем которого он стал в 1954 г. и возглавлял его в течение 30 лет. За эти годы Общество существенно расширилось: увеличилось число его членов (до 300 000), были открыты сотни местных правлений в разных городах СССР, регулярно проводились Всесоюзные конференции по разным научным направлениям. В этот период Общество установило контакты с американским Институтом радиоинженеров (IRE) и с Институтом инженеров по электротехнике и электронике (IEEE), советские инженеры принимали активное участие в международных научных конференциях.

В 1958 г. В.И. Сифоров был избран членом Президиума Всесоюзного совета научно-технических обществ СССР. Он активно участвовал в работе Комитета по Ленинским и Государственным премиям и Государственного комитета по науке и технике при Совете министров СССР. Кроме того, он был членом многих редколлегий издательств, ведущих научных и популярных журналов, а с 1966 по 1989 г. — главным редактором журнала «Проблемы передачи информации».

Владимир Иванович Сифоров скончался 3 октября 1993 г.

Научная и педагогическая деятельность

В течение всей жизни В.И. Сифорова его научные интересы постоянно расширялись, и он внес значительный вклад во многие научные направления радиоэлектроники и теории связи.

Разработка проблем, связанных с конструированием радиоприемных устройств. С этим направлением связано начало его научной деятельности. К 1917 г. французом Л. Леви, немцами Г. Арко и В. Шоттки и американцем Э. Армстронгом была разработана структура радиоприемного устройства — супергетеродина, которая на долгие годы стала основной. Это устройство продолжает совершенствоваться и сегодня на основе применения цифровых методов обработки принимаемых радиосигналов.

В 30-х гг. В.И. Сифоровым были выполнены исследования всех основных звеньев этого устройства: усилителей высокой и промежуточной частоты (УВЧ и УПЧ), устройств автоматической регулировки усиления и частотной настройки приемников, детекторов и смесителей частоты, шумовых свойств приемника.

Большое научное и практическое значение имели работы В.И. Сифорова в области теории колебаний. В конце 30-х — начале 40-х гг. он разработал теорию RC-генераторов, в которых необходимый фазовый сдвиг в цепи положительной обратной связи обеспечивался цепями, содержащими сопротивление и емкости, а также теорию стабилизации частоты ламповых и клистронного генераторов.

В конце 40-х гг. Сифоров выполнил ряд актуальных исследований в области теории активных шумящих четырехполюсников, которые давали возможность оптимизировать шумовые параметры приемников СВЧ при их проектировании. В 1947 г. по этой проблеме он опубликовал две монографии «Радиоприемные устройства ультракоротких волн» и «Ультракоротковолновые приемники импульсных сигналов». Развита им теория давала основу для оценки помехоустойчивости приемников по отношению к флуктуационным помехам.

Разработка проблем теории связи. К общим проблемам теории связи В.И. Сифоров обратился еще в начале 30-х гг. Он был одним из первых, кто начал применять вероятностные методы в теории связи. Работая в ЦРЛ, он выполнил одно из первых исследований эффективности применения разнесенного приема в коротковолновой связи, в которой из-за многолучевого характера распространения радиоволн возникают глубокие замирания сигнала.

Он первым исследовал помехоустойчивость всех известных в те годы методов передачи сообщений, что отражено в его докторской диссертации в 1936 г. Часть диссертации была посвящена исследованию методов подавления импульсных помех в радиоприемных устройствах. Актуальность проблемы подавления импульсных помех, как и полученных Сифоровым результатов, сохранялась в течение нескольких десятилетий.

Результаты диссертации стали основой изданной в 1937 г. монографии «Новые методы радиоприема» — первой в научной литературе книге, в которой были изложены основы теории помехоустойчивости систем однократной и многократной радиотелеграфии при действии разного рода помех. В ней он исследовал методы фазовой автоподстройки частоты для осуществления синхронного детектирования принимаемых сигналов с фазовой модуляцией (ФМ), разработанные А.А. Пистолькорсом, и предложил новый метод. Он показал, что применение фазовой телеграфии на линиях связи вместо амплитудной позволяет получить энергетический выигрыш в 6 дБ. Кроме того, он одним из первых экспериментально обнаружил явление «обратной работы» при приеме сигналов с ФМ, когда фаза опорного сигнала, формируемого в системах фазовой автоподстройки частоты, из-за действия шумов случайным образом изменяется на 180° и полярность сигнала на выходе синхронного детектора произвольно меняется на противоположную. Это долгое время не позволяло применять ФМ в реальных системах связи. Фазовые методы передачи дискретных сигналов начали широко использоваться в системах связи разного назначения только через 17 лет, после того как профессор Н.Т. Петрович изобрел метод относительно-фазовой манипуляции.

Одним из первых В.И. Сифоров выполнил исследования системы передачи сигналов с помощью однополосной модуляции, которая впоследствии широко применялась на линиях радиосвязи, и показал ее преимущества.

В 1936 г. он опубликовал одну из важнейших работ в области теории связи «О действии помех при приеме по методу Армстронга», в которой им впервые была определена помехоустойчивость приема сигналов с ЧМ в надпороговой области (при больших значениях отношения сигнал/шум на входе ЧМ-демодулятора). Подобные результаты независимо, но несколько позже были получены и другими учеными: академиком Л.И. Мандельштамом, профессором В.Б. Пестряковым в СССР и М. Кросби и Г. Родером в США.

В 1945 г. Сифоров публикует одну из первых работ, посвященных оптимальной фильтрации импульсных сигналов, которая позволяла достичь максимального значения вероятности их обнаружения. Эта работа была весьма важной для проектирования систем радиолокации, которые получили значительное развитие в военные годы. Следует отметить, что несколько ранее, во время Второй мировой войны, концепция согласованных фильтров, очищающих принимаемые сигналы от действующих в канале связи шумов и помех, была разработана крупными американскими учеными Д.О. Нортом, Дж. Ван Флеком и Д. Миддлтоном.

В середине 40-х гг. получают развитие радиорелейные системы с временным уплотнением каналов и импульсными видами модуляции: фазово-импульсной, широтно-импульсной, частотно-импульсной и т.д. В ЛВВИА по инициативе В.И. Сифорова разворачивают теоретические исследования широкого комплекса вопросов, связанных с такими системами. В 1951 г. под его редакцией выходит фундаментальная монография, в которой впервые были рассмотрены вопросы, связанные с определением спектров импульсных видов модуляции, формирования передаваемых сигналов помехоустойчивости приема сигналов и их демодуляции. В этой книге им написана глава, посвященная оптимальному приему импульсных сигналов.

В.И. Сифоров внес существенный вклад и в разработку теории радиорелейных систем с частотным уплотнением и частотной модуляцией (система ЧУ-ЧМ), в которой отдельные телефонные сообщения с использованием однополосной модуляции формировались в групповой сигнал, модулирующий частоту несущей. Еще в 1941 г. им совместно с профессором И.С. Гоноровским была предложена подобная система многоканальной связи, на которую получено авторское свидетельство на изобретение. Такие системы создавались во всем мире и доминировали в радиорелейной и спутниковой связи вплоть до 90-х годов, когда началось повсеместное внедрение цифровых систем связи.

В ИРЭ, в лаборатории радиорелейной связи и радиоприема, под руководством Сифорова и при непосредственном его участии были выполнены важные теоретические исследования вопросов накопления шумов в многопролетной радиорелейной линии с ЧУ-ЧМ с учетом замираний полезного сигнала на каждом из пролетов РРЛ.

К проблемам теории информации, основы которой были заложены в конце 40-х гг. крупнейшими американскими учеными Клодом Шенноном и Норбертом Винером, В.И. Сифоров обратился в середине 50-х годов. Им были исследованы проблемы помехоустойчивости систем связи с корректирующими кодами. Он первым начал исследовать пропускную способность важного класса каналов связи со случайными изменениями параметров. К таким каналам относятся, в частности, каналы коротковолновой связи и связи, использующей эффекты рассеивания радиоволн в ионосфере и тропосфере. В этих прикладных направлениях теории информации им были получены новые научные результаты.

Разработка научного направления «Теории надежности радиоэлектронных систем». В 1954 г. В.И. Сифоров опубликовал работу «О методах расчета надежности работы систем, содержащих большое число элементов» (Изв. АН СССР. ОТН. № 6). Эта работа сыграла значительную роль в создании теории надежности различных радиоэлектронных систем и, в частности, систем радиорелейной и спутниковой связи, содержащих значительное число элементов. Ее результаты позволяли определить вероятность выхода из строя всей системы, исходя из вероятностных характеристик надежности ее элементов. Теория надежности имеет важное практическое значение, так как позволяет определить рациональную с точки зрения надежности всей системы компоновку ее элементов и выбрать систему резервирования ненадежных элементов, необходимую для достижения заданной надежности. Идеи В.И. Сифорова в последующие годы развивались другими учеными применительно к разнообразным техническим задачам.

Методология частотного планирования сетей звукового и телевизионного вещания. Актуальность проблемы эффективного использования радиочастотного спектра постоянно возрастала с самого начала развития радиотехники. Одним из путей ее решения явилось оптимальное частотное планирование систем радиосвязи и вещания.

К этой весьма сложной проблеме В.И. Сифоров обратился в 1948 г., когда ему было поручено разработать и представить на Международной конференции по планированию высокочастотного радиовещания (которая состоялась в Мексике) советские предложения. На этой важной для мирового сообщества конференции, продолжавшейся более полугода, он выступил с двумя докладами: «Научно-технические принципы проекта советского плана распределения радиоволн между странами мира для высокочастотного вещания» и «Общие принципы проекта советского плана распределения радиоволн между странами мира для высокочастотного радиовещания». Данная проблема не утратила актуальности и сегодня. К сожалению, указанные доклады на русском языке не были опубликованы.

В 1952 г. В.И. Сифоров участвовал в работе Исследовательской комиссии по распространению радиоволн и телевидению Международного союза электросвязи (МСЭ) и Европейской радиовещательной конференции по телевидению (ТВ) и УКВ-ЧМ-вещанию. На этих собраниях им были предложены принципы составления оптимальных частотных планов для сетей ТВ- и УКВ-ЧМ-вещания для идеализированных сетей вещания (Технические принципы, используемые как основа для УКВ-плана распределения частот для телевидения и радиовещания, подготовленные делегацией СССР. Европейская конференция по радиовещанию. Стокгольм. 1952. Док. № 33-Е).

Идеализированная сеть образуется вещательными передатчиками с одинаковыми излучаемыми мощностями, одинаковыми высотами передающих антенн и одинаковыми условиями распространения радиоволн. Все передатчики располагаются в узлах регулярной треугольной решетки. Расстояния между передатчиками, использующими одни и те же частотные каналы, определяются из условия отсутствия взаимных помех в зонах вещания этих передатчиков. Распределение имеющихся частотных каналов в идеализированной сети производится таким образом, чтобы в сети достигалась максимально возможная территориальная плотность передатчиков.

Эти принципы в конце 50-х гг. были существенно развиты в Гамбургском институте радиовещания (Германия), в котором были разработаны процедуры планирования реальных сетей вещания, базирующиеся на результатах планирования идеализированных сетей. На этих результатах основаны действующие и сегодня Рекомендации МСЭ по частотному планированию сетей вещания. Их использовали при составлении в 1961 г. Стокгольмского плана распределения частотных каналов в сетях ТВ и УКВ-ЧМ-вещания, который до настоящего времени служит руководством при присвоении частотных каналов радиовещательным станциям в европейских странах.

История радиотехники. Обладая высокой культурой, В.И. Сифоров понимал роль истории техники в образовании специалистов и постоянно уделял внимание исследованиям проблем истории радиотехники и радиоэлектроники. Он сам внес существенный вклад в освещение истории отечественной науки, написав обстоятельные работы по истории развития радиоприемной техники, опубликованные в его книге «Радиоприемные устройства» и в сборниках «60 лет радио» и «70 лет радио». В журнале «Радиотехника и электроника» (№ 11, 1957) он опубликовал весьма содержательную

статью, освещавшую развитие теории помехоустойчивости в СССР, а в журнале «Техническая кибернетика» (№ 5, 1963; № 1, 1967) интересные статьи о развитии теории информации в нашей стране и за рубежом. Сифоров был председателем редакционной коллегии по выпуску фундаментального трехтомного исторического труда «Радиоэлектроника в ее историческом развитии», который был выпущен в 1985–1990 гг. Институтом истории естествознания и техники АН СССР, а также ответственным редактором 1-го тома «Зарождение радиоэлектроники», написанного известным отечественным историком В.М. Родионовым.

Разработка научной терминологии в области радиоэлектроники. В течение многих лет он возглавлял Комитет по научно-технической терминологии АН СССР. Терминология является базисом науки и определяет систему понятий, которыми оперируют ученые, работающие в той или иной области знания. Большое значение Сифоров уделял разработке научно-обоснованной терминологии в области радиоэлектроники. В 1960–1962 гг. под его руководством был подготовлен и выпущен сборник, содержащий 70 основных терминов в области теории надежности вместе с определениями, а в 1982 г. был выпущен терминологический словарь, в котором было 200 терминов в области теории информации, систематизированных по разделам: информация и ее мера; сообщения, сигналы и каналы; помехи и помехоустойчивость; коды и декодирование; модуляция и прием. Эти сборники и сегодня дают терминологическую базу для научных трудов в области теории надежности и теории связи, издаваемых на русском языке. В течение 19 лет, с 1970 по 1989 г., он был председателем Комитета научно-технической терминологии АН СССР, возглавляя терминологическую работу в нашей стране.

Разработка проблем науковедения и прогнозирования развития науки. В.И. Сифоров обладал широчайшим кругозором и интересовался не только техническими науками. В сферу его интересов входили и философские проблемы естествознания, вопросы науковедения и прогнозирования научно-технического прогресса, а также о роли информации в современном обществе. В его работах, относящихся к этой области, которые были опубликованы в 60–70 гг., дан глубокий анализ дифференциации и специализации наук, взаимодействия смежных наук, процесса формирования новых научных дисциплин. Он дал классификацию научно-технических прогнозов и обосновал необходимость прогнозирования на несколько десятилетий вперед, разработал методологию долгосрочного прогнозирования. Он писал: «Планы должны соответствовать объективно действующим законам. Игнорирование их или недостаточно полный учет приводит к замедлению экономического и социального развития страны. ...В долгосрочных планах должен быть обязательно учтен установленный в начале 60-х гг. академиком А.А. Харкевичем закон, согласно которому потребность общества в передаче информации возрастает пропорционально квадрату национального дохода страны».

Еще в середине 80-х годов он предвидел и, исходя из философских предпосылок, обосновал неизбежность создания на Земле в будущем информационного общества. Он ввел сам термин «информационное общество», получивший в конце XX в. широкое распространение. В.И. Сифоров писал: «Не подлежит сомнению... что современное общество именно в силу научно-технического прогресса и совершенствования знаний в широком смысле перейдет в новое качественное состояние — информационное общество». Поднятые В.И. Сифоровым проблемы формирования на Земле ин-

формационного общества сегодня относятся к числу важнейших проблем современного мира. Они регулярно обсуждаются на международных конференциях, в которых принимают участие главы крупнейших государств мира.

Педагогическая деятельность. В.И. Сифоров — один из выдающихся отечественных педагогов. Он создал и многие годы возглавлял кафедры радиотехники и радиоприемных устройств в нескольких крупнейших институтах страны. Учебник по курсу «Радиоприемные устройства» — один из лучших. Впервые этот учебник был издан в 1939 г. В течение почти 40 лет дополнялся и модифицировался. Однако заложенные В.И. Сифоровым методические принципы изложения данного курса оказались столь удачными, что им следовали все последующие издания. Он был переведен на многие европейские и китайский языки.

В 1955 г. В.И. Сифоров написал оригинальный учебник «Радиоприемники сверхвысоких частот», который издавался в 1955 и 1957 гг. и сыграл значительную роль в подготовке отечественных специалистов в области техники СВЧ. В МЭИ совместно с профессорами Л.С. Гуткиным и В.Л. Лебедевым он создал в 1961 г. фундаментальное учебное пособие «Радиоприемные устройства», в котором вопросы радиоприема излагались с привлечением результатов статистической теории связи и статистической радиотехники.

В.И. Сифоров был не только выдающимся педагогом, но и замечательным просветителем. Он часто выступал с докладами по разным вопросам науки, техники, философии. Во многих массовых изданиях появлялись его статьи, популяризирующие новейшие научные достижения.

Заключение

Жизнь В.И. Сифорова до предела была наполнена напряженным трудом и созиданием. По интенсивности и результативности его деятельности с ним могли бы сравниться лишь немногие люди. Однако следует подчеркнуть, что, выполняя многообразные административные и общественные обязанности, он всю свою жизнь оставался ученым.

По воспоминаниям профессора Л.И. Филиппова: «...как человек он был добродушен, мягок и не умел отказывать. У него не было врагов или недоброжелателей. В любом спорном деле он мог находить правильные утверждения с обеих сторон и, таким образом, их “диалектически” примирять. Он любил живопись и музыку. Сам играл на фортепиано».

Знаменитый русский писатель И.А. Бунин, размышляя о смысле человеческой жизни, писал: *«Венец каждой человеческой жизни есть память о ней, — высшее, что обещают человеку над его гробом, это память вечную. И нет той души, которая не томилась бы тайне мечтою об этом конце — мечтою оставить в мире до окончания веков себя, свои чувства, видения, желания, одолеть то, что называется смертью, то, что настанет в свой срок».*

В.И. Сифоров был одним из звеньев в бесконечной цепи созидателей, благодаря которым человечество непрерывно движется по пути прогресса. Впитав в себя весь опыт и знания своих предшественников, он оставил после себя богатейшее научное

наследие, которое явилось исходным пунктом для многочисленных исследований других ученых, и оказал существенное влияние на совершенствование техники и развитие радиосвязи и вещания, а также радиотехнического образования в нашей стране.

Рассказ о жизни выдающегося ученого В.И. Сифорова, которая, безусловно, была счастливой и весьма продуктивной, завершим стихами, написанными в России в конце XIX в. поэтом Константином Льдовым:

*Закрота Библия.
Свеча едва мерцает.
В раздумье горестном склонилась голова...
Душа моя скорбит, чело мое пылает —
И кто-то надо мной все громче повторяет
Библейские слова:
«Все суета сует!...
Промчится год за годом
И канет без следа...
И слава и любовь промчатся как мечта,
И все пройдет как сон... Все тлен и суета.
Все суета сует!..»
И мысля горестно:
— Зачем же мы так страстно
Глядим в немую даль, страдаем и скорбим?
Пусть все пройдет как сон, пусть все пройдет как дым.
Но что нам до того?*

*...Пускай века нам дали
Лишь проблеск радости, лишь веяния печали, —
Мы всеобъемлющим сознанием своим
В одно мгновение всю вечность обнимали...
Цари мгновения, мы все-таки царим!*

Литература

1. Владимир Иванович Сифоров / Библиография ученых СССР // Вступительная статья А.В. Просина. — М.: Наука, 1974.
2. Комаров И.В., Смольский С.И. Владимир Иванович Сифоров — выдающийся ученый России // Радиотехника. 1999. № 5.
3. Кузнецов Н.А., Нейман В.И., Овсевич И.А. Период работы В.И. Сифорова в Институте проблем передачи информации // Радиотехника. 1999. № 5.
4. Сифоров В.И. Тангенс выживания. Размышления о моей судьбе. — М.: МЭИ. 1991.
5. Быховский М.А. Круги памяти // Сер. изданий «История электросвязи и радиотехники». — М.: Мобильные коммуникации, 2000. Вып. 1.

Руслан Леонтьевич СТРАТОНОВИЧ

*Человек — изобретатель и творец.
Нравственная совесть человека должна
каждое мгновение жизни проявлять
творчество и изобретательность.*

Николай Бердяев



Введение

Есть два типа творческих личностей — классики и романтики. В основе творчества первых лежат, по-видимому, анализ и логика. К этому типу личности можно отнести, например, композитора Сальери, образ которого показан в знаменитой драме А.С. Пушкина «Моцарт и Сальери», в которой Сальери так излагает свое творческое кредо:

Ремесло

*Поставил я подножием к искусству;
Я сделался ремесленник: перстам
Придал послушную, сухую беглость
И верность уху. Звуки умертвив,
Музыку я разъял, как труп. Поверил
Я алгеброй гармонию. Тогда
Уже дерзнул, в науке искушенный,
Предаться неге творческой мечты.
Я стал творить, но в тишине, но втайне,
Не смея помышлять еще о славе.*

Романтики в своем творчестве опираются в первую очередь на развитую интуицию, позволяющую им в своем воображении ясно увидеть и открыть то, что скрыто плотной завесой от современников. Этот тип творца Белинский определил как «...тип непосредственной гениальности». У А.С. Пушкина этот тип олицетворяется образом Моцарта, о котором Сальери говорит: «Ты, Моцарт, Бог, и сам того не знаешь...»

В науке также есть ученые-классики и ученые-романтики. Выдающийся отечественный ученый Р.Л. Стратонович относился к типу ученых-романтиков. Он был генератором идей и обладал колоссальным творческим потенциалом. Поразительно широка область его научных интересов. Она включала чрезвычайно широкий спектр проблем теории связи — статистическую радиотехнику, теорию оптимального приема

сообщений, методы адаптивного приема и теорию информации. Кроме того, им были разработаны методы решения сложных проблем классической и квантовой статистической физики.

Р.Л. Стратонович внес очень много новых фундаментальных идей в теорию связи. По своим научным достижениям в области теории связи он с полным основанием может быть поставлен в один ряд с такими корифеями современной науки, как Н. Винер, А.Н. Колмогоров, В.А. Котельников, С.О. Райс и К. Шеннон.

Специалист, знакомящийся с работами Р.Л. Стратоновича, находит в них не только полезные для своей работы теоретические результаты, рецепты решения тех или иных практических задач, но и испытывает эстетическое наслаждение от их изучения, так как в них явственно ощущается полет творческой мысли.

Биографический очерк

Руслан Леонтьевич Стратонович родился 31 мая 1930 г. в Москве. Его отец Стратонович Леонтий Иосифович, по профессии инженер-механик, в 20-е гг. состоял в коммунистической партии, примыкая к ее троцкистскому крылу. После разгрома троцкистов он полностью отошел от политической деятельности и работал по специальности. В первый год Великой Отечественной войны он вступил в народное ополчение и участвовал в обороне Москвы. Часть, в которой он воевал, была разгромлена, и он попал в плен. О его судьбе семья ничего не знала вплоть до 1955 г., когда он вышел из лагеря, куда был помещен в 1944 г. после своего освобождения Красной армией из фашистского плена, так как, в соответствии с действующими в то время законами, нахождение во вражеском плену приравнивалось к измене родине. Сталинские репрессии, которым подвергались семьи «врагов народа», не коснулись его жены — Метелкиной Варвары Павловны и детей (у него были старшая дочь Аэлита и сын Руслан), так как официально их брак не был зарегистрирован.

После освобождения из лагеря отец Р.Л. Стратоновича работал в московских школах преподавателем математики и физики. Мать Руслана Леонтьевича, получившая образование на физико-математическом факультете Московского государственного университета (МГУ), также преподавала физику в Тимирязевской сельскохозяйственной академии. Дядя Р.Л. Стратоновича Метелкин Николай Павлович был профессором физики МГУ.

По-видимому, семейная традиция и предопределила выбор Р.Л. Стратоновичем своей будущей профессии. Вследствие жизненных обстоятельств он рано повзрослел и, стремясь как можно быстрее приобрести специальность, решил окончить школу экстерном. В эти годы он сформировался как самостоятельная личность. Сдав в 1947 г. школьные экзамены экстерном, он окончил школу с золотой медалью и поступил на физический факультет МГУ.

В студенческие годы началась его исследовательская и преподавательская деятельность. Значительное влияние на его судьбу как ученого оказали профессор МГУ П.И. Кузнецов и В.И. Тихонов — профессор Военно-воздушной инженерной академии (ВВИА) им. проф. Н.Е. Жуковского. Р.Л. Стратонович вспоминал: «В те годы П.И. Кузнецов был профессором МГУ и возглавлял исследовательскую группу на

физическом факультете. Я был его молодым сотрудником. П.И. Кузнецов познакомил меня со своим другом В.И. Тихоновым, который был на 9 лет старше меня. Научные интересы В.И. Тихонова лежали в области теории флуктуаций. Несмотря на значительную разницу в возрасте, мы подружились. Вследствие этого знакомства и контактов с ним я также стал интересоваться теорией флуктуаций и начал работать в этой области. В.И. Тихонов ставил передо мной научные проблемы, а я их решал. По его совету я написал свою первую книгу «Избранные вопросы теории флуктуаций в радиотехнике», которая была издана в 1961 г.».

Следует отметить, что еще до выхода книги Р. Л. Стратоновича в 1958 г. усилиями П.И. Кузнецова небольшим тиражом в издательстве Статистического центра Академии наук СССР был опубликован сборник их совместных с Р.Л. Стратоновичем работ «Распространение электромагнитных волн в многопроводных системах». В сборник вошли работы Стратоновича, выполненные им еще в студенческие годы. В 1964 г. этот сборник перевели на английский язык и в издательстве «Pergamon Press» опубликовали в США с предисловием лауреата Нобелевской премии Луи де Бройля, где он отметил, что приведенные в книге результаты являются существенным развитием идей великих ученых — Томсона, Кирхгофа, Пикара и Пуанкаре, что книга представляет значительный интерес как с теоретической, так и с практической точек зрения. Луи де Бройль дал ей высокую оценку как лучшей книге в данной области.

Сразу после окончания МГУ в 1953 г. Р.Л. Стратонович был принят в аспирантуру. Уже во время обучения в ней он начал читать лекции по теории флуктуаций для студентов физического факультета. В 1956 г. Руслан Леонтьевич защитил кандидатскую диссертацию на тему «Теория коррелированных случайных точек и ее применение к расчету шумов, возбуждаемых электронными потоками», а в 1965 г. — докторскую диссертацию на тему «Условные марковские процессы и их применение к теории оптимального управления». Эта диссертация была опубликована в виде книги издательством МГУ в 1966 г. Полученные в ней результаты давали импульс исследованиям других ученых. Через полтора года эта книга была опубликована издательством «Elsevier» на английском языке. Следует отметить, что известный отечественный математик А.В. Скороход в рецензии, опубликованной в журнале «Теория вероятностей и ее применения» (вып. 1. 1967), подверг эту книгу беспощадной и, как показала история, необъективной критике. По-видимому, сложно оценить должным образом значение новой теории в момент ее рождения. Ведь и другой крупный американский математик Дж. Дуб не смог должным образом оценить созданную К. Шенноном теорию информации, представляющую одно из крупнейших научных достижений XX в.

Вся творческая деятельность Руслана Леонтьевича была связана с физическим факультетом МГУ. Здесь он прошел путь от студента до профессора, ученого с мировым именем, внесшего огромный вклад в развитие физики, математики, статистической радиотехники и кибернетики. Он является одним из основоположников статистической радиофизики и квантовой теории информации, автором фундаментальных трудов по нелинейной неравновесной термодинамике, стохастическим методам в классической и квантовой статистической физике и теории измерений.

Руслан Леонтьевич отличался необычайной широтой интересов не только в области науки. Например, он играл на гитаре, изобрел собственную нотную систему; очень любил и хорошо знал русскую поэзию, классическую и современную. Его любимым

поэтом был высланный в 1972 г. из нашей страны Иосиф Бродский, ставший в 1988 г. нобелевским лауреатом в области литературы. Р.Л. Стратонович сам писал стихи, прекрасно разбирался в живописи, читал художественную литературу на четырех иностранных языках. Он был большим любителем спорта и заражал этой любовью своих учеников, для многих из которых был также и первым тренером.

Р.Л. Стратонович был человеком, к которому понятие интеллигента применимо в самом высоком смысле этого слова. Будучи ученым с мировым именем, он безо всяких усилий стал равноправным другом для своих учеников, подавая пример искренности и простоты в личных отношениях. Он был отзывчивым и честным человеком, всегда живо увлеченным всем новым в науке и жизни.

Как многие творческие люди, он не стремился занять какое-нибудь видное общественное положение. Он никогда не занимал административных постов. Около 50 лет он проработал на физическом факультете МГУ. Его нравственная совесть в каждое мгновение его жизни проявляла творчество и изобретательность. Он отчетливо понимал, что каждому человеку дана только одна жизнь, и не хотел упускать шанс, данный ему Всевышним.

Профессор Р.Л. Стратонович широко известен своими работами в таких областях науки, как теория случайных процессов, статистическая физика и радиотехника, нелинейная фильтрация, оптимальное управление, теория информации. Им опубликовано семь монографий и 180 научных статей.

Печальной действительностью советского периода было то, что государство существенно ограничивало возможность научных контактов между отечественными и зарубежными учеными, что, естественно, отражалось на научном уровне проводимых в стране исследований. Это также приводило к тому, что научные достижения отечественных ученых были малоизвестны и не оказывали должного влияния на развитие мировой науки.

Р.Л. Стратонович неоднократно получал приглашения участвовать в научных конференциях в США, Швеции, Испании и других странах. Однако только в 1989 г. при М.С. Горбачеве ему в первый раз разрешили выехать в научную командировку в Германскую Демократическую Республику. Позже он выезжал еще несколько раз для чтения лекций — в 1991 г. в Федеративную Республику Германия и в 1994, 1995 гг. в Великобританию.

Представляется несомненным, что Р.Л. Стратонович, достигший выдающихся научных результатов в области статистической радиофизики, опубликовавший ряд фундаментальных монографий, получивших широкое признание среди специалистов как у нас в стране, так и за рубежом, должен был бы стать членом Российской академии наук (РАН). В 1991 г. состоялось его выдвижение учеными физического факультета в члены РАН, однако, к сожалению, голосование сложилось не в его пользу и он не был избран.

В конце XX в. АН СССР в значительной степени превратилась в бюрократическую организацию. Ее членами часто становились директора научных институтов или крупных предприятий, организаторы научных исследований или производства, не имевшие собственных значимых научных достижений. Консервативное большинство Академии часто препятствовало избранию в качестве действительных членов выдающихся отечественных ученых. Об этом с болью в сердце писал в своей книге «Тангенс

выживания» один из крупнейших отечественных ученых, член-корреспондент АН СССР В.И. Сифоров: «...от выборов к выборам растет количество избранных посредственных членов Академии. Происходит неуклонное засорение Академии посредственными кадрами. И этот процесс растет, как снежный ком. Посредственные члены Академии тянут к себе подобных. И, конечно, эта тенденция сказывается на темпах развития нашей науки».

Профессор Р.Л. Стратонович в 1984 г. стал лауреатом Ломоносовской премии МГУ за цикл исследований по статистической радиофизике и теории информации. В 1988 г. за цикл работ по статистической теории радиоэлектронных систем и устройств, опубликованных в 1966–1986 гг., ему вместе с группой других видных ученых (И.А. Большаков, Ю.П. Борисов, Л.С. Гуткин, Б.Р. Левин, В.Б. Пестряков, М.В. Максимов, Г.П. Тартаковский, Ю.Г. Сосулин, С.Е. Фалькович, Я.Д. Ширман) была присуждена Государственная премия СССР, а в 1996 г. за работу «Стохастические методы в классической и квантовой статистической физике и теории измерений» — Государственная премия Российской Федерации в области науки и техники.

Руслан Леонтьевич Стратонович скоропостижно скончался 13 января 1997 г. на 67-м году жизни.

Научная деятельность

Одна из важных проблем, в решении которой работы Р.Л. Стратоновича сыграли значительную роль, связана со статистическим анализом радиотехнических устройств разного назначения. На основе такого анализа выбираются оптимальные параметры проектируемых устройств, при которых достигается максимальная помехоустойчивость выделения полезных сигналов, принимаемых на фоне помех. При этом считаются известными статистические характеристики сигнала, действующего на входе устройства, и требуется определить статистические характеристики сигнала на его выходе. Само устройство может содержать последовательно соединенные линейные и нелинейные элементы. Линейные элементы представляют собой фильтры и могут описываться линейными интегральными или дифференциальными уравнениями. Нелинейные элементы могут быть безынерционными, и в таком случае сигнал на их выходе является нелинейной функцией сигнала, поступающего на их вход. В самом же общем случае связь между сигналом на выходе устройства с сигналом, действующим на его входе, может быть представлена нелинейным дифференциальным уравнением или рядом Вольтерра.

В годы Второй мировой войны над проблемами статистического анализа приемных устройств активно работали как отечественные, так и зарубежные ученые. В те годы интерес к этим проблемам диктовался необходимостью повышения чувствительности приемников радиолокационных станций, что позволяло увеличить дальность обнаружения самолетов противника. Методология статистического анализа радиотехнических систем в конце 40-х гг. была развита в фундаментальных работах нашего ученого В.И. Буниловича и американских ученых С.О. Райса и Д. Миддлтона.

Однако актуальность этих проблем для проектирования любых систем обработки сигналов, принимаемых в присутствии шумов и помех, и их сложность еще долгие годы привлекали внимание многих крупных ученых. В частности, в 1958 г. выдающийся американский математик Норберт Винер посвятил этой проблеме широко известную книгу «Нелинейные задачи теории случайных процессов» (переведенную в 1961 г. на русский язык), в которой был предложен новый и весьма общий подход к решению данных проблем. Н. Винер рассматривал воздействие гауссовских случайных сигналов на нелинейные системы.

К проблемам статистической радиотехники Р.Л. Стратонович обратился сразу же после окончания МГУ в 1953 г. Первые научные работы в области статистической радиотехники были выполнены им совместно с профессором МГУ П.И. Кузнецовым и профессором ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского В.И. Тихоновым. Эти работы позволяли исследовать преобразования случайных процессов в линейных и нелинейных системах в более общей постановке, нежели это было сделано несколько позже Винером, так как сигналы, воздействующие на систему, необязательно должны были быть гауссовским случайным процессом.

Упомянутыми фундаментальными работами Р.Л. Стратоновича и его соавторов были заложены основы кумулянтного представления случайных процессов и их преобразований. Эти работы оказали большое стимулирующее воздействие на последующее развитие теории случайных процессов и их многочисленных приложений к задачам статистической радиофизики, радиотехники, теории автоматического управления, оптимального обнаружения сигналов на фоне шумов и т.п. В частности, они получили дальнейшее серьезное развитие в опубликованной в 1978 г. книге профессора А.Н. Малахова «Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований».

В 1958 г. Р.Л. Стратонович опубликовал основополагающую работу, которая была посвящена синхронизации автогенератора при наличии помех (Радиотехника и электроника. № 4). Вопросы синхронизации систем связи приобрели особое значение во второй половине XX в., когда началось широкое внедрение цифровых высокоскоростных систем связи, в которых для повышения помехоустойчивости приема стал применяться синхронный прием сигналов. Для синхронизации местного генератора с частотой несущего колебания принимаемого сигнала широко применяются системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Разработанные Стратоновичем методы исследования нелинейных радиотехнических систем с помощью уравнений Фоккера—Планка—Колмогорова были применены к исследованию работы фазовой автоподстройки частоты в присутствии шумов.

Исследованию работы ФАПЧ при наличии помех посвящены работы многих ученых, среди которых следует отметить труды В.И. Тихонова, а также работы крупных отечественных (Б.И. Шахтарин, В.В. Шахгильдян, Г.В. Обрезков, Д.В. Разевиг и др.) и американских (Э.Д. Витерби, У. Линдсей, Г. Ван Трис и др.) ученых. Эти исследования основываются на результатах, впервые полученных Р.Л. Стратоновичем.

Исследования статистической динамики систем ФАПЧ сыграли важную роль в разработке методов проектирования следящих демодуляторов сигналов с частотной модуляцией, которые имели пониженный порог и в 70-х гг. широко применялись в

спутниковой и тропосферной связи. Важнейшие результаты в этом направлении были получены отечественными учеными В.М. Дорофеевым, А.В. Белоусом и Я.Г. Родионовым.

В 1961 г. издается фундаментальная монография Р.Л. Стратоновича «Избранные вопросы теории флуктуаций в радиотехнике». В ней рассмотрены многие вопросы, связанные с нелинейными преобразованиями случайных сигналов в приемных устройствах, развиты оригинальные методы анализа автоколебательных систем при воздействии на них флуктуаций. Кроме того, в книге были рассмотрены вопросы воздействия выбросов случайных процессов на электронные реле. Такие устройства, реагирующие на достижение входным сигналом определенного фиксированного уровня, используются в качестве специальных узлов в приемниках, в которых формируется решение о приеме полезного сигнала. Теория выбросов случайных процессов является эффективным инструментом при анализе срыва слежения в автоматических системах связи, радиолокации, радионавигации и других областях техники.

Эта книга, давшая толчок многочисленным исследованиям в данной области, и по сей день остается одной из лучших и содержательных книг по статистической радиотехнике. Она получила мировую известность и стала классической. Монография Р.Л. Стратоновича была переведена на английский язык и издана в США в 1963 г.

Работы Р.Л. Стратоновича, П.И. Кузнецова и В.И. Тихонова, посвященные вопросам статистической радиотехники, получили всеобщее признание. В 1965 г. в США был издан сборник из 39 работ этих ученых, выполненных ими самостоятельно или в соавторстве с коллегами и опубликованных до 1961 г. В предисловии к этому сборнику, написанном профессором Института им. Генри Пуанкаре Р. Фортетом, отмечен как удивительный тот факт, что столь значительные и обширные результаты были получены в СССР всего несколькими учеными, тогда как в США работы над этими важными научными проблемами были развернуты гораздо более широко и велись во многих крупных университетах. Он также подчеркнул значительную практическую полезность и интеллектуальную глубину работ, помещенных в изданный сборник.

Для техники связи и многих других областей науки и техники исключительно важное значение имеет определение алгоритмов оптимальной обработки (фильтрации) сигналов, искаженных помехами. Впервые проблема фильтрации была сформулирована в известных работах крупнейших математиков XX в. Н. Винера и А.Н. Колмогорова. Работая независимо, они почти одновременно решили проблему синтеза оптимального линейного фильтра, который обеспечивает выделение сигнала с минимальной среднеквадратичной ошибкой.

Первой фундаментальной работой, в которой впервые рассматривались вопросы оптимальной обработки сигналов, передаваемых с помощью нелинейных методов модуляции (фазовой, частотной и др.), явилась работа академика В.А. Котельникова «Теория потенциальной помехоустойчивости», выполненная в 1947 г. Следует отметить, что в этой работе, как и во многих других, за ней последовавших, полезный сигнал рассматривался не как случайный процесс, а как постоянный параметр, не изменяющийся в течение времени обработки принимаемого сигнала.

Обобщение результатов Винера, Колмогорова и Котельникова, которое давало возможность нелинейной фильтрации полезных сигналов, передаваемых с помощью нелинейных методов модуляции и принимаемых на фоне помех, было сделано в 1953—1954 гг. американскими учеными Ф.В. Леганом, Р. Дж. Парксом и Д.К. Йоулой,

а в 1961 г. — отечественными учеными И.А. Большаковым и В.Г. Репиным. В развитой этими учеными теории нелинейной фильтрации, как и в теории Винера—Колмогорова, предполагалось, что полезные сигналы и помехи являются гауссовскими процессами с известными корреляционными функциями.

В 1959 г. Р.Л. Стратонович предложил принципиально новый, весьма изящный и плодотворный подход к проблеме оптимальной линейной и нелинейной фильтрации сообщений, принимаемых на фоне шумов. Новизна этого подхода заключалась в представлении случайных процессов, описывающих полезные сигналы и помехи, дифференциальными уравнениями или уравнениями состояния. Это приводило к дифференциальным уравнениям, определяющим алгоритм оптимальной обработки и точность оценки полезного сигнала. Наличие дифференциального уравнения вместо интегрального, которое следовало из теории Винера—Колмогорова, имело определенные преимущества, так как с помощью вычислительной техники дифференциальные уравнения решать намного проще, чем интегральные уравнения Винера—Хопфа. Кроме того, и это имеет важное научное и прикладное значение, данный подход давал возможность синтеза оптимальных алгоритмов обработки сигналов в том случае, когда полезные сигналы и помехи представляли собой негауссовские процессы.

Исследования Р.Л. Стратоновича, выполненные в 1959—1965 гг., привели к созданию марковской теории оптимальной линейной и нелинейной фильтрации сообщений, принимаемых на фоне шумов. Эти исследования существенно развивали теории, созданные ранее его знаменитыми предшественниками. Они вошли в его докторскую диссертацию и также получили мировую известность. Его книга «Условные марковские процессы и их применение к теории оптимального управления», выпущенная издательством МГУ в 1966 г., была в расширенном варианте дважды переиздана на английском языке издательством «Elsevier» в 1968 и 1991 гг.

На основе новой теории в нашей стране были выполнены многочисленные исследования в области систем связи, радиолокации и радионавигации. В МГУ она разрабатывалась Ю.Г. Сосулиным и И.К. Кульманом — коллегами и учениками Р.Л. Стратоновича. Существенное развитие она получила в ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского в работах профессора В.И. Тихонова, возглавлявшего кафедру радионавигации и радиосистем, а также в работах М.А. Миронова, Ю.Г. Сосулина, В.П. Харисова, М.С. Ярлыкова и других ученых.

В США независимо, но несколько позже шли исследования в направлении, открытом работами Стратоновича. Специалисты в области автоматического управления Р.Е. Калман (1960 г.) и Р. Бьюси (1961 г.) дали новое, аналогичное полученному Р.Л. Стратоновичем решение задачи оптимальной линейной фильтрации Колмогорова—Винера для случая, когда фильтруемый сигнал и шум являются гауссовскими марковскими случайными процессами, а в 1964 г. Г. Кушнер получил ряд результатов, подобных установленным Стратоновичем для нелинейной фильтрации. Прикладные задачи синтеза оптимальных устройств приема на основе уравнений Кушнера были рассмотрены Д. Снайдером, Г. Ван Трисом и др.

В 1968 г. Р.Л. Стратонович вместе с ведущими отечественными учеными И.А. Большаковым, Л.С. Гуткиным и Б.Р. Левиным участвует в издании книги «Математические основы современной радиоэлектроники», которая имела своей целью вооружить современными методами исследования специалистов в области радиотехники и связи.

Во второй половине 60-х гг. Р.Л. Стратонович обращается к другой важной, весьма актуальной и сегодня проблеме адаптивного приема сигналов в условиях априорной неопределенности, когда статистические характеристики полезных сигналов и помех заранее точно неизвестны. В этих условиях теории оптимальной линейной и нелинейной фильтрации, о которых шла речь, для синтеза оптимальных приемных систем применены быть не могут. Адаптивные системы приема для преодоления априорной неопределенности должны предусматривать «набор статистики» или «обучение». В 1969 и 1970 гг. Р.Л. Стратонович прочел цикл лекций на физическом факультете МГУ и в ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. На основе этих лекций в 1975 г. была издана книга «Принципы адаптивного приема», дана идейная панорама теории адаптации и примеры ее применения к конкретным задачам, освещены основные математические методы этой теории. Идеи Стратоновича нашли развитие в книгах В.И. Тихонова, В.В. Шахгильдяна и М.С. Лохвицкого, В.Г. Репина и Г.П. Тарковского и в работах других отечественных ученых.

Весьма обстоятельным трудом является монография Р.Л. Стратоновича «Теория информации», изданная в 1975 г. Первоначально она планировалась как отражение всех важнейших достижений шенноновской теории информации. Однако, как отмечал сам автор, в процессе работы над книгой он «...сбился на более привычный для него стиль работы, в котором доминирующее место занимает самостоятельная разработка вместо досконального штудирования имеющихся результатов». В итоге оригинальный материал вытеснил часть результатов, установленных ранее другими учеными.

В основу книги были положены лекции по теории информации, которые он прочитал в 1963–1965 гг. на физическом факультете МГУ. В предисловии к своей книге Р.Л. Стратонович писал: «Теория информации вместе с другими математическими дисциплинами, такими, как теория оптимальных статистических решений, теория оптимального управления, теория алгоритмов и автоматов, теория игр и другие, входит в состав теоретической кибернетики — науки об управлении. По своему основному содержанию указанные дисциплины являются самостоятельными и не связанными между собой. Но это не значит, что они совершенно оторваны одна от другой, что мосты между ними невозможны. Без сомнения, возможно и вероятно появление комбинированных теорий, в которых используются понятия и результаты различных дисциплин, которые соединяются между собой. Картина подобна деревьям в лесу: стволы их стоят отдельно, а кроны переплетаются. Первое время они растут независимо, а затем, переплетаясь ветвями, проникают друг в друга».

В этой книге Р.Л. Стратонович на единой основе объединил статистическую термодинамику и шенноновскую теорию информации. Кроме того, он ввел важное понятие ценности информации, определяющее максимальную пользу, которую данное количество информации способно принести для уменьшения средних потерь или риска. Средние потери в теории связи характеризуют качество принимаемых решений. Новое понятие позволило объединить теорию оптимальных статистических решений с теорией информации.

В 1989 г. издательством «Cambridge University Press» издана трехтомная монография «Шум в нелинейных динамических системах». В первом томе — «Теория непрерывных систем Фоккера—Планка» — глава «Марковские методы в теории стохастических процессов в нелинейных динамических системах» написана Р.Л. Стратоновичем, а исторический обзор исследований, выполненных в этой области, — известным американским ученым Р.В. Ланауером, который отметил новаторский характер проведенных

Р.Л. Стратоновичем исследований, вошедших в его книгу «Избранные вопросы теории флуктуаций в радиотехнике». Он отметил также, что независимо, но позже ко многим из полученных Стратоновичем результатов пришли другие ученые, работавшие в этой области и незнакомые с опубликованными на русском языке научными работами.

Заключение

Один из крупнейших российских философов XX в. Николай Бердяев писал: «Бог сотворил конкретные существа, творческие экзистенциальные центры, а не мировой порядок». Действительно, почти все люди наделены в той или иной степени творческим даром, но лишь некоторые являются столь интенсивным источником яркой мысли, что поднимают человечество на новую высоту.

Таким творческим экзистенциальным центром, безусловно, являлся Р.Л. Стратонович. Наука и человечество обязаны ему несколькими фундаментальными идеями, которые оказали большое влияние на развитие важнейших разделов теории связи. Ряд выполненных им исследований нашел применение при решении важных практических задач.

Однако научные исследования не могут оцениваться исключительно с утилитарной точки зрения. Вряд ли истинно крупный ученый, занимаясь исследованиями, ставит перед собой задачу получить тот или иной практический результат. Скорее всего, стимулом для его творчества является заповедь: «Познай себя». В своей жизни и творчестве Р.Л. Стратонович также не ставил чисто утилитарных целей и, несомненно, следовал этой заповеди.

Уход из жизни людей такого масштаба, как Р.Л. Стратонович, оставляет у всех, кто соприкасался с их творчеством, щемящее чувство острой боли и неизбежно ставит перед ними вопрос, который в поэтической форме замечательно сформулировал знаменитый российский поэт благородный Булат Окуджава:

*Почему мы исчезаем,
превращаясь в дым и пепел,
в глинозем или солончаки.
В дух, что так не осязаем,
в прах, что выглядит нелепым,
нытики и остряки?*

*Почему мы исчезаем,
так внезапно, так жестоко,
даже слишком, может быть?*

Он же дал на него ясный ответ:

*Потому, что притягаем,
докопавшись до истоков,
миру истину открыть.*

Немногие из ученых оставляют в науке следы своего существования. Без всяких сомнений, Р.Л. Стратонович принадлежал к этим избранным. Имя его, как и открытые им новые истины, безусловно, сохранятся в истории науки. Важные сами по себе, его научные труды еще более важны тем, что они открыли широчайшее поле для последующих исследований.

Василий Иванович ТИХОНОВ

Почитать мудрость — значит почитать мудреца, а любить мудрость — значит любить мудреца. Люби мудреца и не отдаляйся от него, и увидев его, ты станешь мудрым; слушай слова его, и сможешь стать подобным ему; смотри туда, куда ставит он ногу свою, и не оставляй его, и тогда ты сможешь обрести крупницы его мудрости.

Царица Савская



Введение

Выдающийся отечественный ученый в области статистической радиотехники и оптимального построения радиоэлектронных систем Василий Иванович Тихонов своими исследованиями внес значительный научный вклад в развитие статистической теории связи. Однако не только его собственные научные работы, ставшие всемирно известными, делают его крупной личностью. Его заслуга — создание отечественной научной школы, в которой его учениками самостоятельно и совместно со своим учителем были выполнены важные научные работы, связанные с разработкой методов статистического анализа и синтеза различных радиотехнических устройств. Научные достижения этой школы широко известны в нашей стране и за рубежом, ряд работ был переведен и издан в США. Эти работы стимулировали проведение исследований многими другими учеными, работавшими в той же области.

Создание научной школы — сложнейшая и благороднейшая задача, которая под силу лишь личностям особого склада. Главной задачей учителя является стимулирование творчества ученика.

Приращение знания возможно лишь в процессе поиска ответа на важный для личности вопрос, решения насущной проблемы. Для того чтобы сформировать ученого из молодого человека, учителю надо полюбить его и сделать так, чтобы он любил тебя.

Гете писал: «Те, у кого мы учимся, правильно называются нашими учителями, но не всякий, кто учит нас, заслуживает это имя... Учатся только у тех, кого любят».

В научной школе, основанной Василием Ивановичем Тихоновым в Военно-воздушной инженерной академии им. проф. Н.Е. Жуковского (ВВИА), в стенах которой он проработал более 50 лет, сформировалась, вероятно, особая культурная среда, которую можно характеризовать такими чертами, как открытость, ис-

кренность, доступность. Сам учитель и «старшие» в этой среде не стеснялись показать ученикам самую настоящую черновую исследовательскую работу со всеми трудностями, ошибками и заблуждениями, способствуя тем самым их свободному развитию.

В истории нашей цивилизации широко известны научные школы, основанные великими учителями и из которых вышли знаменитые ученики. С древних времен известны научные школы Пифагора, Платона и Аристотеля. В новое время всемирно известными научными школами в области физики стали школы Бора, Резерфорда и Ландау. На этих примерах легко проследить роль личности и личного примера учителя в формировании профессионального и нравственного облика своих учеников. Ведь не все в учении может быть передано в книгах или словами. Об этом хорошо сказано в одной древней восточной легенде:

«Один из великих Учителей имел приближенных учеников и последователей, которым передавал свое учение. Для этого было отведено определенное время. И вот как-то раз в обычное время он вышел к ученикам с цветком лотоса в руке. Вышел и молчал, только время от времени приближал цветок к носу и наслаждался его ароматом. Так прошел предназначенный для учения час. Затем учитель удалился, оставив учеников в полном недоумении — что, собственно, он этим хотел сказать?»

Наконец, один из учеников сказал, что понял смысл наставления: учитель хотел таким образом показать, что истинная суть учения невыразима, как аромат цветка. Ее нельзя выразить одними только словами, но передать все же можно».

Учеников В.И. Тихонова намного больше, чем тех, кто непосредственно у него учился или работал вместе с ним. Он сам и совместно со своими учениками написал серию монографий и учебников, которые, по существу, представляют собой научную энциклопедию по статистической теории связи. По блестяще написанным книгам основы этой теории осваивали тысячи отечественных специалистов, которых также можно причислить к школе В.И. Тихонова, так как его книги, по которым они изучали эту замечательную теорию, содействовали полному раскрытию их уникального творческого потенциала.

Используя приведенные в эпиграфе слова, можно сказать, что многочисленные ученики В.И. Тихонова слушали его слова и старались стать подобными ему.

Биографический очерк

Василий Иванович Тихонов родился 23 августа 1922 г. в д. Чеварда Лукояновского района Нижегородской области. Отец его был рабочим. У Василия Ивановича было пять братьев и две сестры.

В 16 лет он окончил в г. Арзамасе педрабфак и поступил на физико-математический факультет Горьковского государственного университета (ГГУ). Однако после окончания третьего курса в связи с началом Великой Отечественной войны в 1941 г. был призван в армию и направлен на учебу в ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. После окончания в 1945 г. с отличием факультета электроспецоборудования ему была присвоена квалификация инженера-электрика и он несколько лет работал

ведущим инженером одного из научно-исследовательских институтов Министерства авиационной промышленности, принимая участие в разработке самолетных радиолокационных приемников.

В 1947 г. он был переведен на вновь сформированный в ВВИА радиотехнический факультет. Вся научная и педагогическая деятельность В.И. Тихонова была неразрывно связана с Академией. В ней он под руководством известного советского ученого профессора В.В. Мигулина (позже академика РАН) выполнил в 1947–1952 гг. свои первые научные работы, посвященные теоретическим и экспериментальным исследованиям шумов в электровакуумных и полупроводниковых приборах. В результате оригинальных исследований приборов отечественного производства им были определены их шумовые параметры. В 1949 г. он защитил кандидатскую диссертацию «Исследования шумфактора приемника сантиметровых волн». Результаты ее были опубликованы в ряде статей и монографий.

С 1952 г. В.И. Тихонов начал заниматься исследованиями, связанными с анализом влияния шумов на работу радиоэлектронных устройств и систем. Сначала им совместно с сотрудниками Московского государственного университета (МГУ) был разработан оригинальный и весьма эффективный математический аппарат, позволяющий с необходимой для практики точностью исследовать преобразование статистических характеристик случайных процессов при их прохождении через широкий класс линейных и нелинейных радиотехнических систем. Этот аппарат был применен В.И. Тихоновым к анализу конкретных систем. Результаты этих исследований были опубликованы в отечественных научных журналах и вошли в его докторскую диссертацию «Воздействие электрических флуктуаций на нелинейные радиотехнические устройства», которую он защитил в 1957 г. Консультировал научные исследования, вошедшие в эту диссертацию, один из основоположников отечественной радиолокации академик Ю.Б. Кобзарев.

В течение 30 лет, с 1958 по 1988 г., В.И. Тихонов возглавлял кафедру радионавигации и радиосвязи, на которой работали более 40 высококвалифицированных преподавателей и научных сотрудников. В 1961 г. ему было присвоено ученое звание профессора. В настоящее время он — почетный профессор этой кафедры. На ней под руководством В.И. Тихонова были развернуты масштабные научные исследования по многим направлениям статистической теории связи. По существу, он является основателем крупнейшей отечественной научной школы, ряд представителей которой стали видными учеными и внесли значительный вклад в развитие статистической теории связи. За годы существования этой научной школы под руководством В.И. Тихонова было защищено 12 докторских и более 62 кандидатских диссертаций в области статистической радиотехники и связи. Им самим написаны 12 монографий, шесть учебников, более 170 научных статей.

В 1972 г. В. И. Тихонову было присвоено звание заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, а в 1979 г. — воинское звание генерал-майора авиации. За цикл научных работ «Теория фазовой синхронизации в радиотехнике и связи», опубликованных в 1964–1983 гг., коллективу крупных отечественных ученых (Ю.Н. Бакаев, М.В. Капранов, В. И. Тихонов, В.В. Шахгильдян, Б.И. Шахтарин и др.) в 1986 г. была присуждена Государственная премия. За заслуги в развитии отечественной науки В.И. Тихонов был награжден пятью орденами и многими медалями.

Научная и педагогическая деятельность

В области статистической теории связи, в которой В.И. Тихонов начал работать в конце 40-х гг., он достиг выдающихся научных результатов в ряде важнейших направлений, связанных с разработкой методов статистического анализа и синтеза радиоэлектронных устройств и систем.

Нелинейные преобразования случайных процессов. В начале 50-х гг. В.И. Тихонов привлек внимание к этим проблемам Р.Л. Стратоновича, в те годы студента старших курсов МГУ, посещавшего семинар одного из крупных советских радиофизиков профессора П.И. Кузнецова. П.И. Кузнецовым, Р.Л. Стратоновичем и В.И. Тихоновым совместно были выполнены важные научные исследования [1–4], результаты которых явились значительным вкладом в статистическую радиотехнику. Основы статистической радиотехники были заложены в середине 40-х гг. крупными учеными современности С.О. Райсом (США) и В.И. Бунимовичем (СССР). В основополагающих работах [1–4] были развиты новые методы решения весьма сложных задач — определения характеристик случайных процессов на выходе линейных и нелинейных инерционных устройств при известных характеристиках сигнала и помех, рассматриваемых в качестве входного воздействия на заданные системы.

Подобные задачи часто возникают на практике и являются типовыми при анализе помехоустойчивости разного рода устройств в системах связи, радиолокации и радионавигации. В ряде случаев необходимо определить распределение вероятностей случайного процесса, формируемого на выходе исследуемой системы. Это распределение однозначно определяется своими кумулянтами. Методы, разработанные в указанных работах, давали теоретические основы для нахождения кумулянтов процесса, действующего на выходе нелинейной системы, через кумулянты случайного процесса, поступающего на ее вход. Содержащиеся в [1–4] новые идеи в последующие годы явились исходным пунктом для исследований многих других ученых и вылились в отдельное научное направление — кумулянтный анализ случайных процессов. В книге профессора А.Н. Малахова «Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований» (Сов. радио. 1978) представлены основные результаты исследований в течение почти 30 лет после публикации основополагающих работ [1–4].

Для развития статистической теории связи большое значение имела работа [1]. Интересно отметить, что эта работа была опубликована в 1953 г., за несколько лет до издания знаменитой книги Н. Винера «Nonlinear problems in random theory» (The Technology Press of MIT and John Wiley&Sons. N.Y. 1958), которая содержала теорию анализа разного рода нелинейных систем на основе их описания рядами Вольтерра. К сожалению, работа [1] в течение ряда лет не привлекала к себе должного внимания ни в нашей стране, ни за рубежом. Исследования различных систем связи с применением рядов Вольтерра стали особенно интенсивными после публикации статьи американских ученых Е. Бедрояна и С.О. Райса (The output properties of Volterra systems (nonlinear systems with memory) driven by harmonic and Gaussian inputs // Proc. IEEE. 1971. № 12), применивших эти ряды к анализу нелинейных искажений, возникающих при прохождении частотно-модулированного сигнала через линейные цепи.

Выбросы случайных процессов. Одна из сложнейших проблем статистической радиотехники — проблема определения статистических характеристик выбросов случайных процессов. Такие характеристики необходимы при анализе работы широко применяемых на практике триггерных устройств, когда воздействующий на них полезный сигнал сопровождается помехами, при определении частот радиосигналов методом счета числа нулей и т.д. Эта проблема привлекала к себе пристальное внимание многих выдающихся ученых современности: С.О. Райса, В. И. Бунимовича, М.А. Леонтовича, Р.Л. Стратоновича и др. После публикаций результатов их исследований число активно работающих ученых и новых результатов в этой области стало быстро расти.

В научную разработку данного направления В.И. Тихонов также внес весомый вклад. На кафедре в ВВИА Тихонов и его ученики с 1955 г. вели экспериментальные и теоретические исследования по проблеме выбросов случайных процессов — определению характеристик, связанных с пересечениями случайного процесса с заданной кривой на фиксированном интервале времени (среднее число и дисперсия числа пересечений, средние интервалы между пересечениями и др.). Результаты этих исследований изложены во многих статьях В.И. Тихонова. Им изданы две фундаментальные, единственные в мировой технической литературе монографии [5, 6], в которых отражены не только важнейшие результаты, полученные в этой области учеными, принадлежащими к научной школе ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, но и те, которые были получены в XX столетии учеными всего мира.

Статистическая динамика фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). ФАПЧ — устройство, которое широко применяют не только в современных синхронных системах связи, но и во многих других областях техники. К исследованиям в этом направлении В.И. Тихонов приступил в 1959 г. и вел их в течение ряда лет вместе со своими учениками. Ему удалось найти решение уравнения Фоккера—Планка—Колмогорова, определяющего распределение вероятностей разности фаз гармонического колебания, принимаемого совместно с широкополосным гауссовским шумом, и подстраиваемого опорного генератора, являющегося элементом системы ФАПЧ. Были исследованы также задачи, характерные для многих следящих радиотехнических устройств (фазовая и частотная автоподстройка, автодальномер и др.) и связанные со срывом слежения и автозахватом. Эти задачи решались с помощью уравнения Понтрягина, которое определяет статистические характеристики достижения случайным процессом определенных границ. Выполненные исследования позволили определить такие важные для проектирования следящих устройств, работающих в условиях действия помех, как среднее число перескоков фазы опорного генератора в единицу времени, а также и другие статистические параметры, характеризующие точность слежения, достигаемую в системе ФАПЧ при заданном отношении сигнал/шум. Были исследованы статистические характеристики систем ФАПЧ с разными видами фильтров, установленных в цепи обратной связи.

Работы В.И. Тихонова послужили отправным пунктом для многочисленных последующих научных работ по квазикогерентному приему радиосигналов, которые велись учеными многих стран. Большую роль сыграли результаты этих исследований в разработке следящих демодуляторов частотно-модулированных сигналов с низким порогом, которые широко применялись в 70-х гг. во многих системах спутниковой связи. За цикл работ этого направления профессор В.И. Тихонов совместно с рядом других отечественных ученых в 1986 г. был удостоен Государственной премии.

Синтез оптимальных устройств приема сигналов. Статистическая задача синтеза направлена на получение алгоритма построения устройства обработки принимаемых сигналов, которое наилучшим образом (в смысле выбранного критерия) воспроизводит переданное информационное сообщение.

Проблема синтеза оптимального устройства приема сигналов с разными видами модуляции на фоне помех в теории связи была впервые сформулирована и решена академиком В.А. Котельниковым, который рассматривал ее как задачу оценки параметров сигналов (амплитуды, фазы, частоты и т.п.), не изменяющихся на интервале времени, в течение которого их оценивали. Для случая, когда полезное сообщение является случайным гауссовским процессом, методы синтеза оптимальных устройств приема были разработаны американскими (Ф.В. Леган и Р. Дж. Паркс, Д.К. Йоула и Г. Ван Трис) и отечественными (И.А. Большаков и В.Г. Репин) учеными. Эти методы были применены для решения большого числа практически важных задач.

В начале 60-х гг. выдающийся советский ученый профессор Р.Л. Стратонович разработал новую марковскую теорию оптимального приема сигналов (называемую также в литературе теорией нелинейной фильтрации). Эта теория применима для задач, в которых принимаемое колебание и фильтруемые сообщения в совокупности представляют собой некоторый марковский процесс, не обязательно являющийся гауссовским. Она охватывает многие практические задачи, ряд которых был рассмотрен самим Р.Л. Стратоновичем и его учениками профессорами И.К. Кульманом и Ю.Г. Сосулиным.

Значительное развитие марковская теория оптимального приема сигналов получила в работах В.И. Тихонова и его учеников. В первых работах по применению марковской теории оптимальной нелинейной фильтрации для синтеза устройств приема сигналов В.И. Тихоновым и Ю.В. Саютиным были рассмотрены многочисленные задачи квазиоптимального приема аналоговых радиосигналов с фазовой, частотной, амплитудной и комбинированными видами модуляции. В.И. Тихоновым были рассмотрены также важные для практики задачи синтеза оптимальных систем разнесенного приема сигналов. Такие системы позволяют значительно повысить помехоустойчивость приема сигналов в многолучевых каналах связи, в которых бывают замирания сигналов в ветвях разнесения.

В этих работах предполагалось, что сообщения являются гауссовскими марковскими процессами невысокого порядка, и подобные задачи могли быть решены и решались другими учеными методами гауссовской теории. Оригинальные исследования оптимального приема сигналов, представляющие значительный практический интерес для цифровых систем связи, были начаты в 1983 г. В.И. Тихоновым совместно с профессором В.Н. Харисовым. В этих исследованиях решалась важная проблема синтеза систем синхронизации. Специфическая особенность систем фазовой и объединенной синхронизации (как систем со счетным числом состояний равновесия) заключается в том, что апостериорная плотность вероятности фильтруемой фазы — многомодальная и к ним непосредственно неприменим стандартный аппарат теории нелинейной фильтрации. С 1983 г. по настоящее время сложной проблеме синтеза систем синхронизации на базе теории нелинейной фильтрации в научной школе ВВИА уделяется большое внимание. Методика синтеза систем синхронизации была развита В.Н. Харисовым. Наиболее важные результаты в области синтеза оптимальных устройств приема сигналов опубликованы в монографиях [7, 8].

На кафедре, возглавляемой профессором В.И. Тихоновым в течение 30 лет, его учениками — известными учеными профессорами В.Н. Харисовым, И.Н. Амиантовым, Ю.Н. Бакаевым, В.А. Смирновым, В.С. Ефименко, А.И. Величкиным, М.С. Ярлыковым, М.А. Мироновым, Ю.В. Саютиным и др. были выполнены многочисленные прикладные исследования. Они основывались на марковской теории нелинейной фильтрации и касались проблем, связанных с авиационной радиосвязью и радионавигацией, с системами связи, в которых используются цифровые (импульсно-кодовая и дельта-модуляции) или аналоговые импульсные (широотно- и фазоимпульсная и др.) виды модуляции. В них изучалось построение объединенных систем связи и навигации, велась разработка интегрированных бортовых радиоэлектронных комплексов. Результаты этих научных исследований отражались в многочисленных книгах, выпущенных многими учеными кафедры.

Прикладные исследования. Профессором В.И. Тихоновым, его сотрудниками и учениками были выполнены важные работы по повышению эффективности отечественной глобальной спутниковой радионавигационной системы (ГЛОНАСС), которые обеспечили качественный скачок в точности навигации. Эта система позволила с высокой точностью определять местоположение летательных аппаратов и судов (единицы сантиметров — десятки метров, в зависимости от режима работы), вектор скорости (единицы сантиметров в секунду), обеспечивать высокую точность синхронизации (единицы — десятки наносекунд) и возможность определения ориентации летательного аппарата. Результаты синтеза систем синхронизации также были внедрены в системах радиосвязи и радионавигации, а также в разрабатываемой в настоящее время объединенной системе навигации и обмена данными.

Многие научно-исследовательские работы, выполненные под руководством В.И. Тихонова, были посвящены разработке и внедрению помехоустойчивых и надежно функционирующих совмещенных авиационно-космических систем радиосвязи и радионавигации. На основе исследований ученых кафедры был, в частности, создан типовой комплекс радиосвязи для самолетов, ознаменовавший собой качественно новый этап развития систем авиационной связи.

Педагогическая деятельность. Велика роль В.И. Тихонова в распространении знаний и подготовке специалистов в области статистической радиотехники и теории связи в нашей стране. Он блестящий педагог, лекции которого пользуются огромной популярностью среди преподавателей и слушателей Академии. На основе этих лекций он самостоятельно и вместе с другими учеными кафедры подготовил и издал ряд монографий [7, 8] и учебников [9—14], охватывающих почти весь спектр направлений данной теории. По этим книгам тысячи специалистов получили необходимую теоретическую подготовку для решения сложных практических задач, связанных с созданием эффективных систем связи, работающих в условиях действия помех. Многие из них, освоив по этим книгам статистические методы, сами стали учеными и выполнили собственные исследования, развивающие теорию связи.

В значительной мере на результатах, полученных в научной школе В.И. Тихонова, базировалась впервые введенная в 1958 г. не только в ВВИА, но и в других радиотехнических институтах нашей страны новая учебная дисциплина «Статистическая теория радиотехнических устройств» с соответствующей лабораторной базой.

В 1965 г. в ВВИА по этой дисциплине был издан учебник [9]. В становлении и развитии учебной дисциплины активное участие принимали ученые кафедры профессора И.Н. Амиантов, Ю.Н. Бакаев, В.Т. Горяинов, В.Н. Харисов и др.

По инициативе В.И. Тихонова в 1972—1977 гг. была переведена на русский язык и издана в нашей стране получившая мировую известность трехтомная монография крупного американского ученого Г. Ван Триса «Теория обнаружения, оценок и модуляции» (Сов. радио), первый том которой вышел под его редакцией. Ее издание способствовало знакомству отечественных специалистов с важнейшими результатами исследований в области теории связи, ведущихся за рубежом.

Как крупный ученый и эрудированный педагог В.И. Тихонов понимал, что для формирования духовного мира молодых ученых важно раскрыть перед ними тот тернистый путь познания, который ведет к установлению новых научных истин. Им были опубликованы две обширные и очень интересные исторические статьи [15, 16] о научных исследованиях в области статистической теории связи, выполненных отечественными учеными за последние 50 лет. Эти статьи ценны тем, что позволяют представить, какой колоссальный коллективный созидательный труд был сделан многими учеными всего мира, работавшими над тем, чтобы установить основные закономерности, связанные с проблемами передачи и приема информации, и поставить их на службу всему человечеству.

Заключение

Работы В.И. Тихонова, посвященные вопросам статистической радиотехники, получили мировое признание. В 1965 г. в США был издан сборник научных статей, в который вошли в переводе на английский язык работы Р.Л. Стратоновича, П.И. Кузнецова и В.И. Тихонова, выполненные им самостоятельно или в соавторстве с коллегами.

Василий Иванович Тихонов приобрел широкую известность и авторитет не только благодаря своему таланту исследователя, огромной эрудиции, высокой научной результативности, а также благодаря тому, что ему удалось создать большую научную школу активно работающих учеников.

Следует отметить ту значительную роль, которую сыграл В.И. Тихонов в судьбе выдающегося ученого современности Р.Л. Стратоновича, который в своих воспоминаниях отмечал, что в 50-х гг., когда он был еще студентом МГУ, В.И. Тихонов привлек его внимание к проблемам статистической теории связи.

Василий Иванович Тихонов является учителем в самом высоком смысле этого слова. Его книги и учебники содействовали развитию и распространению теории связи. По ним эту область изучали и продолжают изучать молодые специалисты, ими пользуются как энциклопедией и кладезем мудрости уже опытные исследователи.

Описание жизни и деятельности В.И. Тихонова можно завершить словами восточного мудреца Калиля Джибрана, удивительно точно передающими то кредо, которого сознательно или бессознательно придерживается всякий поистине великий учитель:

«Твои дети — это на самом деле не твои дети. Они сыновья и дочери жизни, стремящейся продлевать жизнь. Они приходят в мир через твоё посредство, но не благодаря тебе. И хотя они пока что с тобой, они не принадлежат тебе. Ты можешь

дать им твою любовь, но не свои мысли, потому что у них есть собственные мысли. С тобой вместе живут их тела, но не их души, потому что их души обитают в доме завтрашнего дня, куда ты не можешь за ними последовать даже в своих мечтах. Ты можешь стремиться быть похожим на них, но не пытайся добиться, чтобы они были похожи на тебя, потому что жизнь не идет назад и жить во «вчера» невозможно. Ты – лук, из которого твои дети посланы вперед, в будущее».

Литература

1. Кузнецов П.И., Стратонович Р.Л., Тихонов В.И. Прохождение случайных функций через нелинейные системы // Автоматика и телемеханика. 1953. № 2, 4.
2. Кузнецов П.И., Стратонович Р.Л., Тихонов В.И. Квазиомментные функции в теории случайных процессов // Докл. АН СССР. 1954. № 4.
3. Кузнецов П.И., Стратонович Р.Л., Тихонов В.И. Корреляционные функции в теории броуновского движения. Обобщение уравнения Фоккера–Планка // ЖЭТФ. 1954. Т. 26. – Вып. 2.
4. Кузнецов П.И., Стратонович Р.Л., Тихонов В.И. Квазиомментные функции в теории случайных процессов // Теория вероятностей и ее применение. 1960. № 1.
5. Тихонов В.И. Выбросы случайных процессов. – М.: Наука, 1970.
6. Тихонов В.И., Хименко В.И. Выбросы траекторий случайных процессов. – М.: Наука, 1987.
7. Тихонов В.И., Кульман Н.К. Нелинейная фильтрация и квазикогерентный прием сигналов. М.: Сов. радио, 1975.
8. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. – М.: Радио и связь, 1991.
9. Тихонов В.И. Статистическая теория радиотехнических устройств. – М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1965.
10. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Сов. радио, 1966.
11. Горяинов В.Т., Журавлев А.Г., Тихонов В.И. Примеры и задачи по статистической радиотехнике. – М.: Сов. радио, 1970.
12. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. – М.: Сов. радио, 1977.
13. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983.
14. Тихонов В.И. Нелинейные преобразования случайных процессов. – М.: Радио и связь, 1986.
15. Тихонов В.И. Развитие в СССР теории оптимальной фильтрации сообщений // Радиотехника. 1983. № 11.
16. Тихонов В.И. Очерк развития статистической радиотехники // Радиотехника. 1995. № 4, 5.

Лев Матвеевич ФИНК

В научном мышлении всегда присутствует элемент поэзии. Настоящая наука и настоящая музыка требуют однородного мыслительного процесса.

Альберт Эйнштейн

Введение

В 1947 г. академиком В.А. Котельниковым были заложены основы теории потенциальной помехоустойчивости. Эта теория содержала россыпь ярких идей, относящихся к фундаментальным законам оптимальной обработки принимаемых сигналов в присутствии помех, действующих в каналах связи. Независимо в США и Великобритании основы подобной теории были заложены А. Зигертом, Д. Миддлтоном, Ф. Вудвортом и И. Дейвисом. Теория Котельникова обладала, выражаясь словами Эйнштейна, «внутренним совершенством», так как давала общие подходы для решения многих проблем теории связи. Она открывала обширную новую область научных исследований, в которой стали работать тысячи ученых. Их научные исследования касались многочисленных практических проблем, связанных с совершенствованием действующих и созданием новых систем связи.

Одной из научных проблем, которая не затрагивалась В.А. Котельниковым, была проблема передачи и оптимального приема информации по многолучевым каналам радиосвязи. Такие каналы используют для передачи сообщений в системах коротковолновой связи, которые были весьма распространены в 50-е гг. XX в., и в появившихся позже системах тропосферной и ионосферной связи.

В развитии теории потенциальной помехоустойчивости и решении этих проблем приняли участие многие ученые, как отечественные (В.С. Мельников, Д.Д. Кловский, Н.П. Хворостенко, И.С. Андронов и др.), так и зарубежные (Дж. Л. Турин, Р. Прайс, И.Н. Пирс, С. Штейн и др.).

Лидером данного научного направления в нашей стране стал выдающийся ученый Лев Матвеевич Финк — яркая и высокообразованная личность. Он свободно владел английским, французским и немецким языками. Получив высшее музыкальное образование, он пришел, как и великий русский писатель Антон Павлович Чехов (по образованию врач), к убеждению, что «наука — самое важное, самое прекрасное и нужное в жизни человека», и избрал сферой приложения своих незаурядных способностей радиотехнику.



В этой области Л.М. Финк начал работать с 1930 г., а к исследованиям в области теории связи он обратился в конце 40-х гг., после Великой Отечественной войны, и продолжал плодотворно трудиться в этом направлении до своей кончины.

Биографический очерк

Лев Матвеевич Финк родился 11 февраля 1910 г. в Киеве. Его отец был строителем, а мать — домашней хозяйкой. Отец до революции служил в частных строительных компаниях. В годы советской власти он работал в Киевском горкомхозе, позже — на различных стройках Ташкента, Новосибирска, Казани и Москвы, занимая должности от прораба до главного инженера и начальника строительства.

С 14 лет Финк увлекся радиолюбительством. Другим его сильным увлечением в юношеские годы была музыка, к которой у него еще в детстве проявились незаурядные способности. После окончания школы он по совету родителей поступил в Киевский музыкальный техникум, в котором проучился один год. В 1923 г. Л.М. Финк окончил семилетку. В этом же году его постигло горе — у него умерла мама. После окончания школы с 1926 по 1928 г. он учился в Киевском музыкальном техникуме, а в 1928 г. перевелся на композиторский факультет Ленинградской консерватории. Параллельно с учебой в консерватории Л.М. Финк работал в кинотеатрах и в театральном училище, выступая в качестве пианиста вместе со своим другом, ставшим позже знаменитым композитором — В.П. Соловьевым-Седым.

Два года он учился в консерватории, но его тяга к радиотехнике оказалась столь сильной, что в 1930 г. он, продолжая учебу в консерватории, поступает на работу в отраслевую вакуумную лабораторию завода «Светлана». К этому времени он уже был опытным радиолюбителем и обладал хорошими теоретическими знаниями. Всего один год потребовался Л.М. Финку, чтобы освоить инженерную специальность. В 1931 г. он, несмотря на отсутствие диплома об инженерном образовании, был назначен на должность инженера, а затем — старшего инженера. В этом же году ему пришлось оставить занятия в консерватории, так как он уже не мог совмещать учебу с работой.

В 1931 г. в «Журнале экспериментальной и теоретической физики» Л.М. Финк совместно со своим коллегой по лаборатории С.В. Птицыным опубликовал свою первую научную работу «О выделении газов из никеля при нагревании в вакууме».

В 1933 г. Л.М. Финк был призван на службу в Красную Армию. До декабря 1935 г. он служил рядовым в частях противовоздушной обороны. За два года службы он внес несколько рационализаторских предложений, а в 1934 г. получил два авторских свидетельства на изобретения. В середине 1934 г. его как сложившегося специалиста-практика прикомандировывают к Военной краснознаменной академии связи (ВКАС) и направляют на работу в лабораторию телевидения. В 1935 г. Л.М. Финк был зачислен слушателем инженерно-радиотехнического факультета ВКАС, который окончил с отличием в 1940 г., получив диплом военного инженера-электрика. После окончания Академии он был назначен преподавателем Ленинградского военного училища связи.

С началом Великой Отечественной войны Л.М. Финк в августе 1941 г. получает новое назначение — в Научно-исследовательский институт по технике связи Красной Армии (НИИТС КА) в Москве. В этом институте была организована лаборатория,

которую возглавил один из крупнейших отечественных ученых — главный инженер НИИТС КА, профессор Б.П. Асеев. Сотрудниками лаборатории стали известные специалисты в области передающей техники И.Х. Невяжский, М.Г. Марголин, Н.Н. Иванов, а также и Л.М. Финк.

Перед лабораторией была поставлена задача создания радиосредств, позволяющих эффективно вести контрпропаганду на территории Германии. В короткие сроки в лаборатории было разработано устройство, способное с точностью до фазы настраивать наши мощные передатчики на частоту, на которой работали немецкие вещательные станции. Это позволяло в паузах передач гитлеровских вещательных станций вставлять реплики наших дикторов, дезавуировавшие информацию, которая передавалась вражескими станциями.

Следует отметить, что с началом войны немцы были обязаны сдать свои радиоприемники. Но взамен они получали «народный приемник», очень слабенький, рассчитанный на прием лишь местных радиостанций, который был прозван немцами «морда Геббельса», так как по форме он был небольшой, полукруглый, с зияющей впадиной, будто с распахнутым говорящим ртом.

По опубликованным в книге «Радио в дни войны» (Искусство. 1982) воспоминаниям Рихарда Гипнера, который занимал в 80-х гг. в Правительстве Германской Демократической Республики пост заместителя министра иностранных дел, а во время Второй мировой войны работал редактором немецкого отдела московского радио, пропагандистский эффект от применения разработанного отечественными специалистами устройства был поразительным. После часовых выступлений по радио перед миллионной аудиторией гитлеровского министра пропаганды Геббельса, в которых он патетически рассказывал о героизме фашистских солдат, сражающихся «как древние греки у Фермопил», в эфир выходил наш передатчик и диктор объявлял: «Каждые семь секунд в России погибает один немецкий солдат. Герр Геббельс говорил двадцать минут, за это время в России погибло 170 солдат немецкой армии. Среди них мог оказаться твой муж, брат, сын. Долой гитлеровскую войну!»

Можно себе представить панику в гитлеровских спецслужбах и оживление в среде немецких радиослушателей, когда «морда Геббельса» говорила «голосом Москвы»! Сам ошарашенный Геббельс записал в своем дневнике: «Вмешательство московской радиостанции в передачи немецкой радиостанции продолжается непрерывно и производит постепенно крайне неприятное действие». Он собирает совещания специалистов из правительства, армии и промышленности — выработать энергичные меры борьбы против этого. Но тщетно. Геббельс уязвлен и делает следующую запись в дневнике: «Голос по радио из Москвы, вмешивающийся в наши передачи, все еще слышен. Постепенно это становится публичным скандалом. Все в Германии об этом говорили, и публика постепенно начала видеть в этом нечто вроде спорта и наблюдала внимательно, сумеет ли мы опередить технику большевиков».

Опередить «технику большевиков» не удалось. Попавшие под прицел «накладки» немецкие и финские радиостанции были вынуждены прерывать свои радиопередачи. Обычно они делали это без объяснения причин. Но однажды беспомощный и крайне раздосадованный немецкий ведущий заявил так: «Мы вынуждены прекратить передачу. Русские не умеют воевать. Они умеют только хулиганить» (Игорь Лисочкин. «Как “морда Геббельса” говорила “голосом Москвы”». Санкт-Петербургские ведомости. 22 июня 1996 г.).

За изобретение и разработку столь эффективного устройства для ведения контр-пропаганды всей группе разработчиков постановлением Правительства от 10 апреля 1942 г. была присуждена Сталинская премия 1-й степени.

Работа над совершенствованием этого устройства продолжалась, и в 1943 г. Л.М. Финк получил вторую правительственную награду — орден «Знак Почета». Позже он был награжден орденами «Красной Звезды» (1949 г.) и «Красного Знамени» (1953 г.) и семью медалями, включая «За боевые заслуги», «За победу над Германией» и «За победу над Японией».

В 1943 г. работа, которую вел Л.М. Финк, была передана Наркомату связи (НКС), и Лев Матвеевич был прикомандирован к НКС. В 1945 г. Л.М. Финк находился в составе Советской Армии в Китае (Манчжурия). В Наркомате связи (на объекте № 100 — ныне Научно-исследовательский институт радио — НИИР) он работал до 1949 г., а затем получил назначение на должность начальника лаборатории в Военном исследовательском институте в г. Мытищи под Москвой.

В 1947 г. Л.М. Финк представил к защите в ученый совет радиотехнического факультета Московского электротехнического института связи (МЭИС) диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Хотя диссертация была успешно защищена, однако решение факультетского совета не было утверждено ученым советом института.

Вторую кандидатскую диссертационную работу (по специальной тематике) Л.М. Финк защитил на ученом совете ВКАС в 1953 г. К этому времени инженер-подполковник Л.М. Финк уже был известным в стране высококвалифицированным специалистом в области теории и техники радиосвязи и был награжден знаком «Почетный радист».

В 1957 г. Л.М. Финк был утвержден в ученом звании доцента на кафедре радиоприемных устройств ВКАС. В начале 1958 г. инженер-полковник Л.М. Финк представил свою докторскую диссертацию на тему «Элементы теории радиотелеграфной связи». Успешная защита докторской диссертации Л.М. Финка состоялась на ученом совете Академии 17 ноября 1959 г.

После защиты диссертации Л.М. Финк продолжал активно вести научную работу. Он опубликовал статьи в ведущих отечественных научных журналах, издал книги по вопросам теории оптимального приема сигналов в каналах с переменными параметрами, занимался проблемами помехоустойчивого кодирования, руководил научной работой аспирантов.

В 1970 г. Л.М. Финк в звании полковника уходит в отставку и начинает работать профессором в Ленинградском электротехническом институте связи (ЛЭИС), продолжая активную преподавательскую и научную деятельность. Как член редакционной коллегии он активно сотрудничает с журналом «Проблемы передачи информации», возглавляет одну из секций Совета по статистической радиотехнике Академии наук СССР, председателем которого был академик Ю.Б. Кобзарев.

Л.М. Финк принимает самое активное участие в работе Научно-технического общества радиотехники, электроники и связи (НТОРЭС) им. А.С. Попова, во всесоюзных конференциях по теории кодирования и проводимых в 70-е гг. в СССР международных симпозиумах по теории информации. Во время научных визитов в нашу страну выдающихся ученых современности Клода Шеннона и Норберта Винера он общается с ними и выступает во время их научных докладов в качестве синхронного переводчика.

Он — член различных редакционных советов, специализированных ученых советов. Долгие годы Л.М. Финк руководил секцией «Теории передачи информации» при Ленинградском областном правлении НТОРЭС им. А.С. Попова. Эта секция в настоящее время в честь памяти Л.М. Финка носит его имя, и ее возглавляет его ученик профессор В.И. Коржик.

Всю свою жизнь Л.М. Финк сохранял любовь к музыке и искусству, он сочинил концерт для фортепиано с оркестром. Его близким другом был известный советский дирижер Н.С. Рабинович. Будучи уже признанным ученым, Л.М. Финк прочитал в Ленинградском электротехническом институте связи (ЛЭИС) курс лекций «Математическая теория музыки», который пользовался большим успехом. У Л.М. Финка была собрана богатая фонотека, содержащая произведения классической музыки выдающихся композиторов от Баха до Шостаковича. Он часто и с наслаждением их прослушивал. Это, по-видимому, помогало ему в научной работе, что может служить подтверждением той мысли Эйнштейна, которая приведена ранее в эпитафии.

В 1932 г. Л.М. Финк женился на драматической актрисе Зинаиде Дмитриевне Старицыной. В 1938 г. у них родилась дочь Нора. В 1959 г. Зинаида Дмитриевна скончалась, и через два года Л.М. Финк женился второй раз. Его вторая жена — Юлия Алексеевна, с которой он прожил 27 лет, до конца его дней проявляла заботу о нем — человеке совершенно беспомощном в быту.

В 1979 г. в жизни Л.М. Финка произошли нелегкие события. Все началось с того, что его дочь вместе с мужем эмигрировали в США. Из-за этого руководство ЛЭИС тут же уволило его с должности профессора кафедры, мотивируя это тем, что он не может воспитывать молодых специалистов, так как не смог должным образом воспитать собственную дочь. И он, выдающийся ученый с мировым именем, был лишен возможности учить студентов. Его перевели на должность старшего научного сотрудника в научно-исследовательскую часть института — в Отраслевую научно-исследовательскую лабораторию передачи дискретной информации (ЛПДИ), возглавляемую Ю.Б. Окуневым. Нужно сказать, что Л.М. Финк мужественно и даже философски перенес опалу и как истинно мудрый человек с удовольствием принялся за работу в ЛПДИ — одной из ведущих исследовательских лабораторий по разработке систем цифровой радиосвязи. В ЛПДИ работало немало бывших учеников Л.М. Финка, среди которых он и нашел единомышленников. Он работал в ЛПДИ до самой своей кончины.

Лев Матвеевич Финк скончался 8 декабря 1988 г. в Ленинграде.

Научный вклад Л.М. Финка в теорию связи

К научным исследованиям в области теории связи Л.М. Финк приступил, будучи уже сложившимся специалистом. Изучив докторскую диссертацию Котельникова, он увидел те широкие перспективы, которые открывали идеи созданной В.А. Котельниковым теории потенциальной помехоустойчивости в изучении проблем передачи и приема сигналов в реальных каналах связи с переменными параметрами.

В своей докторской диссертации он представил фундаментальные научные результаты в области теории оптимального приема двоичных и многопозиционных сигналов как в каналах с постоянным коэффициентом передачи, но со случайной фазой

принимаемого сигнала, так и в каналах с замираниями. Им были детально рассмотрены как одиночный, так и разнесенный прием сигналов. На основе своей докторской диссертации он пишет монографию «Теория передачи дискретных сообщений» (Сов. радио. 1963; 1970), которая стала настольной книгой для нескольких поколений отечественных ученых и инженеров.

В работах Л.М. Финка была определена структура оптимальных демодуляторов и получены формулы, определяющие их помехоустойчивость. Он рассмотрел вопросы некогерентного приема в приемных устройствах, оптимальных по Котельникову, и впервые установил важный теоретический результат, определяющий условие обеспечения максимальной помехоустойчивости некогерентного приема сигналов — их ортогональность в усиленном смысле. Такая ортогональность имеет место, когда ортогональны не только сами передаваемые сигналы, но и их преобразования Гильберта. Им была также исследована помехоустойчивость не только оптимальных, но и других устройств, применяемых на практике. В частности, он исследовал вопросы помехоустойчивости приема сигналов с частотной манипуляцией с использованием частотного дискриминатора. Подобные исследования были выполнены также американскими учеными В. Беннетом и Дж. Залтцем.

Многие ученые вели исследования помехоустойчивости приема сигналов с относительной фазовой манипуляцией (ОФМ) и двукратной ОФМ-ДОФМ (метод передачи, при котором фаза передаваемого сигнала от посылки к посылке изменяется на 90°). Были рассмотрены разные алгоритмы приема этих сигналов и получены формулы, определяющие вероятность ошибочного приема, изучено группирование ошибок, свойственное этому методу передачи сигналов, рассмотрены вопросы реализации устройств для их приема. Весомый вклад в эти исследования был сделан Л.М. Финком. Кроме него в СССР подобные исследования проводили Н.П. Хворостенко, Ю.Б. Окунев и др. Эти ученые исследовали помехоустойчивость разных методов приема сигналов с ОФМ и ДОФМ как в каналах с постоянными параметрами, так и в каналах с замираниями. Важный результат, относящийся к помехоустойчивости двоичных систем с ФРМ второго порядка при различных методах приема, был получен Л.М. Финком совместно с Ю.Б. Окуневым в 1984 г. В работе, опубликованной в 9-м номере журнала «Радиотехника», на примере ОФМ второго порядка было впервые показано, что многоэлементный оптимальный прием таких сигналов обеспечивает асимптотическое приближение к идеальному когерентному приему.

Л.М. Финком были получены оригинальные результаты, относящиеся к вычислению пропускной способности и оптимальному приему в каналах с переменными параметрами. Он не только сам вел исследования в этой области, но и внимательно и критически следил за научными публикациями других ученых.

В 50-х гг. крупные отечественные ученые — академик А.А. Харкевич и профессор Э.Л. Блох, следуя методу, использованному К. Шенноном, «уточнили» его знаменитую формулу $C = F \ln(1 + P_s/P_n)$ для пропускной способности канала связи (здесь F — полоса канала связи, P_s и P_n — мощности полезного сигнала и шума). Л.М. Финк был первым, кто заметил ошибку. Дополнительное исследование, которое провели А.А. Харкевич и Э.Л. Блох в ответ на критику Л.М. Финка, показало, что метод, использованный Шенноном для вывода этой формулы, должен быть уточнен, так как строгое следование этому методу действительно приводит к ошибочному результату.

Л.М. Финком и В.С. Котовым были получены результаты, определяющие потенциальную помехоустойчивость приема четырехпозиционных сигналов с ЧМ (сигналов ДЧТ — двухканального частотного телеграфирования) в каналах с неопределенной фазой при произвольном законе флуктуаций уровня принимаемого сигнала. Идея системы ДЧТ, в которой передача сигналов происходит на четырех различных частотах, была предложена еще в 1923 г. советским академиком, известным специалистом в области распространения коротких волн А.Н. Щукиным. В 1946 г. в СССР инженером И.Ф. Агаповым эта система была реализована и широко применялась в России на линиях коротковолновой связи.

В 1955 г. американский ученый П. Элайс предложил сверточные коды (СК), которые он рассматривал как способ непрерывной обработки информации. В этом же году Л.М. Финком и В.И. Шляпоберским был впервые предложен СК для исправления пакетов ошибок. Это весьма важный класс кодов, которые широко применяются в современных системах связи. Однако поскольку работа Л.М. Финка и В.И. Шляпоберского была опубликована в СССР только в 1966 г. (Бюллетень изобретений № 23), то на Западе о результатах наших ученых ничего не было известно. В 1959 г. появилась статья американского ученого Д.В. Хагельбергера из знаменитой Белл-лаборатории, в которой было дано подробное описание этих кодов. Статья вызвала большой интерес и стимулировала появление многочисленных работ, посвященных исследованию СК. Вот почему в настоящее время эти коды в научной литературе часто называют кодами Хагельбергера.

Л.М. Финком были всесторонне исследованы многие вопросы теории приема сигналов в каналах со случайными параметрами. Для каналов с неопределенной фазой сигналов он исследовал прием M -позиционных ортогональных сигналов, рассмотрел прием таких сигналов в каналах с гладкими рэлеевскими замираниями с использованием разнесенного и одинарного приема. Для систем двукратного разнесенного приема он исследовал влияние корреляции замираний в ветвях разнесения на помехоустойчивость приема и показал, что это влияние незначительно.

Ученики Л.М. Финка также выполнили важные исследования в области разнесенного приема сигналов. Один из них, И.С. Андронов, в 1964—1966 гг. исследовал помехоустойчивость разнесенного приема различных сигналов при когерентном и некогерентном сложениях. Им же были проведены первые исследования помехоустойчивости систем разнесенного приема сигналов в случае, когда замирания в ветвях разнесения происходят по закону Райса, а также когда в каждой ветви разнесения с определенной точностью осуществляются измерения интенсивности и фазы принимаемых сигналов. Совместно Л.М. Финком и И.С. Андроновым была написана одна из наиболее полных в мировой технической литературе книг по теории систем разнесенного приема, в которой представлены результаты исследований в этой области, полученные до 1969 г.

Л.М. Финка интересовали не только вопросы передачи и приема сообщений, но и общие вопросы радиотехники, в частности теория сигналов. В 1966 г. им была опубликована в журнале «Проблемы передачи информации» статья, в которой установлены изящные соотношения между спектром и мгновенной частотой сигнала.

С 1970 г. творческая работа Л.М. Финка продолжается в ЛЭИС. Помимо чтения лекций он активно ведет научные исследования и пишет новые книги.

В центре его интересов в этот период оказывается теория кодирования. Вместе со своим учеником В.И. Коржицом в 1975 г. он выпускает книгу «Помехоустойчивое кодирование дискретных сообщений в каналах со случайной структурой», в которой развивается системный подход к проектированию систем связи. При этом выбор и оптимизация модема и кодека рассматривались как единая задача. В книге исследовались также вопросы кодирования в каналах с обратной связью и в векторных каналах связи.

В 1978 г. в издательстве «Связь» была опубликована весьма интересная книга по теории связи исторического характера «Сигналы, помехи, ошибки...» Л.М. Финка. В этой оригинальной и поучительной книге дан своеобразный анализ нетривиальных парадоксов и ошибок крупных ученых в разные годы. Ему удалось показать, что процесс познания является напряженным и мучительным путем поиска истины, в котором участвуют ученые разных стран. Этот поиск ведется коллективно и непрерывно, нужны годы, чтобы то, над чем работают ученые, превратилось в утверждение, которое воспринимается всеми как истина.

В 1981 г. вышла последняя, единственная в своем роде, научная книга Л.М. Финка, написанная совместно с ленинградскими учеными В.И. Коржицом и К.Н. Щелкуновым, — справочник «Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений». Этот справочник подводил итог более чем 30-летнему развитию теории потенциальной помехоустойчивости и отражал основные результаты теории оптимального приема дискретных сигналов в разных каналах связи, полученные к 1980 г.

В 80-е гг. Л.М. Финк принимает активное участие в создании системы высококачественного многопрограммного стереофонического цифрового радиовещания (ЦРВ) в диапазоне метровых волн. К решению этой проблемы были привлечены ведущие специалисты Всесоюзного научно-исследовательского института радиовещательного приема и акустики им. А.С. Попова (ИРПА), Всесоюзного научно-исследовательского института телевидения и радиовещания, НИИР, ЛЭИС и Московского электротехнического института связи. Участие в этих работах Л.М. Финка определило ЛПДИ как «мозговой центр» данной разработки. Уже в 1983 г. в Ленинграде была организована опытная зона цифрового радиовещания, и в том же году получены первые авторские свидетельства на способы и устройства формирования сигналов ЦРВ.

Вопреки мнению многих специалистов в области звукового вещания, специалистами ЛПДИ было предложено использовать в системе ЦРВ многочастотный сигнал с ортогональным разделением, двукратную фазоразностную модуляцию и мощные каскадные коды с глубоким перемежением символов. На такую систему Л.М. Финком совместно со специалистами ИРПА (В.М. Колесников и М.У. Банк) и ЛПДИ (М.Я. Лесман и Ю.Б. Окунев) было получено авторское свидетельство на изобретение (№1078648. БИ № 9. 1984). В последней статье Л.М. Финка «Проблемы формирования сигналов в системе цифрового радиовещания», через год после его кончины опубликованной в соавторстве с М.Я. Лесманом и Ю.Б. Окуневым в журнале «Электросвязь» (1989. № 10), были показаны важные технические достоинства такой системы ЦРВ.

Следует отметить, что в те же годы вопрос о выборе системы ЦРВ изучался ведущими инженерами и учеными европейских стран, разрабатывающих в Европейском институте стандартов (ETSI) систему цифрового звукового вещания. Они пришли к аналогичному техническому решению, которое воплотилось в системе Digital

Audio Broadcasting (DAB), принятой в настоящее время для внедрения всеми европейскими странами, включая Россию и страны СНГ. К сожалению, на разработку системы DAB идеи отечественных ученых влияния не оказали, так как по существовавшим в те годы в СССР политическим мотивам контакты наших и зарубежных ученых были ограничены. Поэтому советские специалисты не имели возможности участвовать в разработке этой системы в рамках международной кооперации.

Одна из последних научных работ Л.М. Финка была посвящена повышению помехоустойчивости передачи дискретных сообщений по коммутируемым каналам большой протяженности. Лев Матвеевич с увлечением разрабатывал оригинальные алгоритмы функционирования систем передачи информации с обратной связью, исследовал эффективность различных алгоритмов кодирования и декодирования, включая разработанные им методы стохастического кодирования.

Последняя книга Л.М. Финка вышла за месяц до его кончины («Папа, мама, я и микрокалькулятор». Связь. 1988) и была обращена к совсем юным читателям, которым он стремился передать свои знания и опыт.

Заключение

Л.М. Финк был необычайно одаренным и энциклопедически образованным человеком. В его доме было много книг, в том числе и прекрасно изданных. Его разносторонность проявлялась и в его деятельности в области теории связи. Ему принадлежат яркие и важные идеи не только в области теории потенциальной помехоустойчивости, но и в теории кодирования и теории сигналов. Он отчетливо понимал, что ничего великого никогда не может быть достигнуто без энтузиазма. И он всю свою жизнь работал очень много, с большим энтузиазмом, пробуждая такой же энтузиазм в своих учениках и коллегах.

Финк был великолепным педагогом, подготовившим многих инженеров-связистов. Благодаря его предложениям появилось более десяти новых курсов для студентов и аспирантов. Свою любовь к науке он старался привить ученикам и коллегам. Им было опубликовано более 100 научных работ, в том числе 15 монографий и несколько прекрасных учебников, по которым теорию связи осваивали тысячи специалистов.

Влияние Л.М. Финка на развитие научных исследований в области теории связи в нашей стране было весьма значительным. Более 40 из его учеников стали кандидатами, а 10 — докторами наук. Очень многие отечественные ученые осваивали теорию связи по его книгам и считали себя его учениками.

К сожалению, Л.М. Финк, будучи крупнейшим и признанным отечественным специалистом в области связи и прекрасно владея несколькими европейскими языками, был лишен, как и большинство советских ученых, возможности научных контактов с зарубежными коллегами. Он никогда не выезжал за границу и не участвовал в проводимых там многочисленных научных конференциях в области связи. Его результаты и его имя не были широко известны на Западе.

«Железный занавес», существовавший в советскую эпоху между Востоком и Западом, нанес значительный урон отечественным ученым, которые оказались оторванными от своих коллег в других странах. Такой занавес не только служил барьером,

препятствующим влиянию проводимых в стране научных исследований на развитие мировой науки, но и лишил отечественную науку и наших ученых заслуженного мирового признания. Тем не менее благодаря таким талантливым и высокообразованным людям, как Л.М. Финк, в стране готовились высококвалифицированные специалисты в области теории связи и отечественными учеными были получены значительные результаты.

Судьба Л.М. Финка является иллюстрацией важной закономерности развития науки как потока идей. Мысль, блеснувшая в уме одного ученого (в данном случае академика В.А. Котельникова), вызывает цепную реакцию идей в науке. Круг ученых, разрабатывающих эти идеи, расширяется, рождаются новые идеи, эти идеи воплощаются в новые разработки, и в результате творческий акт отдельного человека с возрастающей мощностью охватывает все более широкие области труда, преобразуя окружающий нас мир. Таким образом происходит необратимый прогресс в человеческом обществе.

В конце своей жизни знаменитый французский ученый Паскаль обратился к поискам места человека в окружающем нас мире. Он писал: *«Человек, по-видимому, создан, чтобы мыслить; в этом все его достоинство, вся его заслуга; вся его обязанность в том, чтобы мыслить как должно...»* Эта мысль перекликается с мыслью Эйнштейна, приведенной в эпиграфе к данной биографии Л.М. Финка, о том, что природа мышления творческой личности является единой и не зависит от сферы ее деятельности. Жизнь этого выдающегося ученого и его научная деятельность подтверждают справедливость сформулированного Паскалем положения о предназначении и роли человека в этом мире.

Литература

1. *Быховский М.А., Лесман М.Я., Окунев Ю.Б.* Профессор Л.М. Финк и развитие теории потенциальной помехоустойчивости // Электросвязь. 2003. № 2.

Александр Александрович ХАРКЕВИЧ

*Великие умы ставят перед собой цели;
остальные люди следуют своим желаниям.*

Вашингтон Ирвинг



Введение

Совсем недолгую жизнь (всего 61 год) прожил Александр Александрович Харкевич — один из крупнейших отечественных ученых в области связи, но эта жизнь была необычайно насыщенной, а сделанное им составило не одну страницу летописи отечественной науки.

Вся его сознательная жизнь была подчинена единой цели, и этой целью было научное творчество. В его жизни как научного работника можно выделить два периода. В первом (до 1952 г.) его научные интересы связаны с проблемами акустики.

Он выполнил важные для страны разработки электроакустического оборудования и написал несколько фундаментальных монографий, в которых была изложена стройная теория электроакустических аппаратов в форме, удобной для приложений.

В конце 40-х гг. почти одновременно крупнейшими учеными XX в. создаются две фундаментальные теории, устанавливающие основные законы электросвязи. Отечественный ученый академик В.А. Котельников создает теорию потенциальной помехоустойчивости (1947 г.), давшую инженерам инструмент для синтеза оптимальных устройств приема сигналов в присутствии помех. В США К. Шеннон и Н. Винер (1948 г.) создают теорию информации, устанавливающую законы передачи сообщений по каналам связи. Обе эти теории являются краеугольными камнями общей теории связи.

Следует отметить, что в начале 50-х гг. отношение к теории информации, возникшей в США, в нашей стране было весьма настороженным. В классической статье К. Шеннона «Математическая теория связи», выпущенной в 1953 г. на русском языке, редактор перевода извратил ее название и опустил ее существенные части, считая, по видимому, их идеалистическими и чрезмерно абстрактными.

Второй период жизни А.А. Харкевича (начиная с 1952 г.) посвящен интенсивной научной работе в области теории связи и организации в этом новом направлении широкого фронта исследований в нашей стране. Благодаря А.А. Харкевичу издаются переводы на русский язык основных работ американских ученых по теории информации и в Академии наук (АН) СССР разворачиваются исследования в области теории

связи. Можно с уверенностью сказать, что благодаря академику А.А. Харкевичу это перспективное научное направление в нашей стране получило интенсивное развитие и появились выдающиеся ученые, которым принадлежат научные результаты, получившие признание во всем мире.

По своей природе А.А. Харкевич был не только ученым, но организатором и просветителем. В разные периоды своей жизни он организовал несколько научных лабораторий и создал научные коллективы, в которых и занимались важными для страны исследованиями. Существенная и неотъемлемая часть его творчества — преподавание. Он был прекрасным методистом, и его книги и статьи отличались безукоризненной ясностью, простотой и изяществом изложения. Ему принадлежат замечательные книги по радиотехнике, многие из которых были переведены на иностранные языки. Первые книги по теории связи, блестяще написанные и изданные в нашей стране, также принадлежат перу А.А. Харкевича.

Деятельность А.А. Харкевича была направлена не только на решение важнейших научных проблем и организацию крупных научных центров в нашей стране. Он мыслил глобально и уже в начале 60-х гг. видел широкие перспективы развития телекоммуникаций во всем мире. Еще тогда он предвидел создание на Земле в будущем глобального информационного общества, в котором каждый человек будет располагать средствами связи, позволяющими ему получить доступ к необходимой информации в любое время и в любом месте на земном шаре. Он отчетливо понимал необходимость модернизации в стране всей системы телекоммуникаций, которая должна развиваться по единому плану и в соответствии с едиными принципами и стандартами, которым должны удовлетворять ее отдельные элементы. В 1962 г. на основе его предложений принимается важное правительственное решение о создании Единой автоматизированной системы связи (ЕАСС). Работа в этом направлении продолжается и в настоящее время.

Биографический очерк

Александр Александрович Харкевич родился 3 февраля 1904 г. в С.-Петербурге. Начав учиться еще до революции в гимназии, он в 1921 г. окончил среднюю школу. На следующий год поступил в Петроградский электротехнический институт. А.А. Харкевич совмещал учебу с работой: сначала монтером в аккумуляторной лаборатории, а затем техником и руководителем работ на заводе. На заводе, он вел научные исследования и в 1928 г. опубликовал свою первую научную статью «Экспериментальное исследование некоторых свойств репродукторов». Один из пионеров отечественной радиотехники профессор Ленинградского электротехнического института И.Г. Фрейман был учителем А.А. Харкевича.

С 1929 г. А.А. Харкевич начинает работать в акустической лаборатории, входящей в состав крупнейшего советского научного учреждения — Центральной радиолаборатории (ЦРЛ) в Ленинграде. Он быстро становится ведущим сотрудником этой лаборатории и выполняет важные исследования. Уже в 1929 г. он разработал первый отечественный диффузорный динамический громкоговоритель и в этом же году приступил вместе с другим сотрудником ЦРЛ К.А. Ламагиным к разработке рупорных

громкоговорителей. В 1930—1931 гг. 500-ваттные громкоговорители и их конструкции применялись для озвучивания происходящего на Красной площади в Москве и на Дворцовой площади в Ленинграде. В 1930 г. А.А. Харкевич окончил институт и получил диплом инженера.

С 1932 г. А.А. Харкевич начал преподавать и вести научные исследования в Военной электротехнической академии. В 1938 г. А.А. Харкевич защищает докторскую диссертацию и получает профессорское звание. К этому времени он становится крупнейшим отечественным ученым в области теоретической и прикладной акустики. В том же году он возглавил кафедру в Ленинградском электротехническом институте связи, в котором работал до 1941 г.

До начала Великой Отечественной войны он издал три фундаментальные монографии: «Электроакустическая аппаратура» (1933 г.), «Примеры технических расчетов в области акустики» (1938 г.) и «Теория электроакустических аппаратов» (1940 г.).

Во время войны А.А. Харкевич заведует лабораторией в Физико-техническом институте АН СССР, где занимается разработкой электроакустических преобразователей на основе пьезоэлектрических и магнитострикционных эффектов. Такие преобразователи находят применение в гидроакустических устройствах, широко используемых на гражданском и военном флоте, в том числе и на подводных лодках, а также в других областях техники.

В 1944 г. А.А. Харкевича направляют в Львовский политехнический институт в качестве профессора и заведующего кафедрой. Через четыре года его избирают членом-корреспондентом АН Украинской ССР, и он переезжает в Киев, где организует отдел технической физики в Институте физики АН УССР. В Киеве он успешно руководил разработками в новой в те годы области техники — магнитной записи сигналов. В эти же годы он выполнил глубокие теоретические исследования волновых процессов и установил важное соотношение взаимности в акустических системах.

Результаты своих исследований в 40-х гг. он опубликовал в книгах «Теория преобразователей» (1948 г.) и «Неустановившиеся волновые явления» (1952 г.).

В 1952 г. А.А. Харкевич переехал в Москву, где возглавил кафедру теоретической радиотехники Московского электротехнического института связи (ныне Московский технический университет связи и информатики) и полностью отдался педагогической работе.

В течение 10 лет он писал замечательные книги по радиотехнике, которые сыграли огромную роль в обучении специалистов в этой области. В 1952 г. издаются две книги «Спектры и анализ» и «Автоколебания», в 1956 г. — «Нелинейные и параметрические явления в радиотехнике», в следующем году — «Теоретические основы радиосвязи», а в 1962 г. — «Основы радиотехники». Эти талантливо написанные книги пользовались огромной популярностью и переводились в Польше, Китае, США и Англии.

Тонкое научное чутье А.А. Харкевича подсказывает ему, что центральными проблемами в области электросвязи становятся проблемы теории связи. С 1954 г. он в качестве старшего научного сотрудника начал работать в Лаборатории по разработке проблем проводной связи АН СССР, занимаясь совершенно новой для себя областью —

теорией связи. С этого года он активно ведет научные исследования в данной области и публикует их результаты в научных журналах. Позже эта лаборатория стала называться Лабораторией систем передачи информации (ЛСПИ).

Следует отметить, что в 1954 г. ему исполнилось 50 лет. Он авторитетнейший специалист в области акустики и занимает прочное положение в научном мире. А для того чтобы заняться новыми и весьма сложными научными проблемами, необходим трудный период изучения всего, что было сделано ранее другими учеными, необходим период «вживания» в эти новые проблемы. Если же учесть, что неизбежно с возрастом удача редко приходит к ученым, то нет никакой гарантии, что начатые исследования оставят достойный след в выбранной новой области знания.

Для того чтобы решиться на столь крутой поворот в своей научной судьбе, ученому, без сомнения, нужны большое мужество, огромная вера в свои интеллектуальные возможности и в свою звезду. Кроме того, необходим также огромный внутренний интерес к новым проблемам.

В силу своей человеческой природы академик А.А. Харкевич не мог продолжать идти по наезженной колее. По-видимому, он испытывал такие же чувства и рассуждал так же, как в свое время русский поэт Игорь Северянин:

*Я жить хочу совсем не так, как все,
Живущие, как белка в колесе,
Ведущие свой рабий хоровод,
Боящиеся в бурях хора вод.
Я жить хочу крылато, как орел,
Я жить хочу надменно, как креол,
Разя, грозя помехам и скользя*

*Меж двух соединившихся «нельзя».
Я жить хочу, как умный человек,
Опередивший на столетье век,
Но кое в чем вернувшийся назад,
По крайней мере, лет на пятьдесят.
Я жить хочу, как подобает жить
Тому, кто в мире может ворожить
Сплетеньем новым вечно старых нот,
Я жить хочу, как жизнь сама живет.*

Уже в 1955 г. А.А. Харкевич выпустил первую в нашей стране книгу «Очерки общей теории связи», в которой, как и академик В.А. Котельников, широко использовал геометрические методы исследования. Эта книга открыла для широкого круга инженеров и ученых в нашей стране возможность ознакомления с важнейшими идеями теории информации.

В 1961 г. на базе ЛСПИ, по инициативе А.А. Харкевича, постановлением Президиума АН СССР создается Институт проблем передачи информации (ИППИ) АН СССР и директором назначают А.А. Харкевича. Институт был создан для развития теории информации и ее приложений, разработки принципиальных вопросов единой системы передачи и распределения информации (структуры сетей и узлов связи, ком-

мутации, автоматического управления, теории телетрафика), разработки методов автоматического опознавания (читающие машины, опознавание зрительных образов, опознавание звуков речи).

С 1961 г. в ИППИ начал издаваться журнал «Проблемы передачи информации». В нем печатали работы крупнейших отечественных ученых, таких, например, как академик А.Н. Колмогоров, профессора Р.Л. Добрушин, М.С. Пинскер, Э.Л. Блох, Л.М. Финк, и многих других.

В первые годы существования ИППИ в нем были развернуты исследования по теории передачи информации и теории кодирования, сформулирована и разработана концепция ЕАСС страны, заданы новые направления исследований в области теории распознавания образов и обработки изображений.

Для работы в области теории связи А.А. Харкевич привлек большое число специалистов (связистов, математиков, физиков). Значительная часть работ в ИППИ проводилась при прямом участии А.А. Харкевича или под его научным руководством. Он занимался проблемами обнаружения и приема слабых сигналов, сжатием спектра сигналов, статистическим и помехоустойчивым кодированием, изучал помехоустойчивость различных видов модуляции. Ежегодно с 1954 г. он публиковал пять — семь научных работ по теории связи.

Ученые ИППИ Р.Л. Добрушин, М.С. Пинскер, Б.С. Цыбаков, И.А. Овсеевич и др. провели глубокие математические исследования в области теории информации, Э.Л. Блох, В.В. Зяблов, К.Ш. Зигангиров, К.А. Мешковский, Н.Е. Кириллов и др. — в теории кодирования, А.Д. Харкевич, Г.П. Башарин, М.А. Шнепс и др. — в теории телетрафика. Были проведены важные для практики работы по методам коммутации информационных потоков и управления большими сетями связи (В.Н. Рогинский, В.И. Нейман, В.Г. Лазарев, Г.Г. Саввин и др.). Академик А.А. Харкевич стимулировал в ИППИ исследования систем передачи информации с обратной связью. Результаты этих исследований были обобщены в написанной в 1963 г. профессором Э.Л. Блохом одной из первых книг на эту тему «Помехоустойчивость систем связи с переспросом». В ИППИ были развиты методы передачи изображений, использующие свойства зрения и статистику изображения (Ю.М. Штарьков, Й. Юстесен, Л.П. Ярославский и др.), а также развит ряд аспектов теории распознавания образов (В.С. Файн, Э.М. Браверман, В.А. Гармаш, М.А. Азерман и др.).

В 1963 г. вышла последняя, также замечательная книга А.А. Харкевича «Борьба с помехами». В этой книге он с поразительной ясностью изложил многие сложные вопросы теории помехоустойчивости и указал на ряд перспективных проблем. Книга эта разошлась мгновенно, и ее второе издание было выпущено уже в начале 1965 г.

За выдающиеся заслуги перед наукой в 1960 г. А.А. Харкевич был избран членом-корреспондентом АН СССР, а в 1964 г. — академиком. Он был награжден орденами Ленина и Трудового Красного Знамени.

А.А. Харкевич скоропостижно скончался 30 марта 1965 г. в Москве. Созданный им Институт проблем передачи информации и сегодня остается крупнейшим научным центром по разработке проблем теории связи. Этот институт с 1966 по 1989 г. возглавлял известный ученый в области связи член-корреспондент АН СССР В.И. Сифоров, а с 1990 г. — академик Н.А. Кузнецов.

Вклад А.А. Харкевича в теорию связи

Судьба отвела А.А. Харкевичу всего лишь десять лет на работу в области теории связи. Однако за этот короткий срок им было сделано поразительно много.

Важнейшая его заслуга — организация ИППИ — научного центра, в котором успешно работали сотни ведущих ученых в области теории информации. В этом центре, который получил мировую известность, были выполнены многочисленные теоретические исследования и важные практические разработки.

Исключительно велика его просветительская роль. Благодаря его переводам актуальных работ зарубежных ученых и оригинальным статьям и книгам, в которых разъяснялись основные понятия теории связи, и выступлениям на научных конференциях к проблемам этой теории было привлечено внимание тысяч ученых в нашей стране. Это создало чрезвычайно благоприятную атмосферу для быстрого развития данного научного направления в СССР.

В ряде его собственных оригинальных научных работ содержались идеи, которые оказали серьезное влияние на развитие техники связи и не утратили своего значения и сегодня.

В 1957 г. в своей работе «Передача сигналов модулированным шумом» (Электросвязь. № 11) академик А.А. Харкевич теоретически доказал эффективность применения широкополосных сигналов для повышения помехоустойчивости приема в многолучевых каналах связи. Это был совершенно неожиданный научный результат, противоречащий укоренившимся в те годы представлениям инженеров. К сожалению, в нашей стране до практической реализации этих идей в те годы дело не дошло. Подобные идеи разрабатывались в США в 1956–1958 гг., где были выполнены как теоретические исследования, так и работы по практической реализации подобной системы. В 1958 г. крупными американскими учеными Р. Прайсом и П.Е. Грином была опубликована статья с подробным описанием принципиально новой системы связи «Rake», которая явилась практической реализацией этих исследований.

А.А. Харкевичем и Э.Л. Блохом был предложен метод коррекции ошибок в каналах связи, в которых эти ошибки группируются и возникают пакетами. В таких каналах задача коррекции пакетов ошибок может быть сведена к задаче коррекции независимых ошибок путем применения метода перемежения символов, который состоит в перестановке передаваемых символов таким образом, чтобы соседние символы передаваемой кодовой комбинации оказывались разнесенными в достаточной степени во времени, чтобы их искажения в канале связи были независимыми. На приеме производится восстановление исходного порядка символов. Эта простая идея была выдвинута А.А. Харкевичем и Э.Л. Блохом в 1960 г. (Электросвязь. № 9) и позднее в 1970 г. американским ученым Дж. Л. Рамсеем, Сегодня метод перемежения символов применяется во многих системах радиорелейной и подвижной связи, в которых при приеме цифровых сигналов ошибки группируются.

Всего начиная с 1953 г. по вопросам теории связи им было опубликовано 37 научных работ.

Важной вехой в истории развития связи в нашей стране стали выдвинутые А.А. Харкевичем идеи создания ЕАСС. Эти идеи были опубликованы в 1962 г. в статье «Информация и техника» (журнал «Коммунист». № 12). В этой статье

А.А. Харкевич раскрыл роль информации в развитии человеческого общества. Он писал: «...стала ясной всеобъемлющая роль информации не только в отношениях между людьми, но и во взаимодействии человека и машины, а также в жизнедеятельности любого организма... с повышением экономического, технического и культурного уровня общества стремительно растет количество информации, которую нужно собрать, передать и так или иначе использовать для обеспечения всех функций сообщества людей. Никакая организованная форма деятельности немислима без обмена информацией. Без информации невозможно ни планирование, ни управление». Эти мысли не утратили своей актуальности и сегодня. В своей статье он формулирует закон «...количество информации растет, по меньшей мере, пропорционально квадрату промышленного потенциала страны», который сегодня называют законом Харкевича.

А.А. Харкевич обосновал пути организационно-технического объединения сетей, предугадав важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. Единая автоматизированная сеть связи страны должна, по его мнению, представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий всю существующую сеть связи. Эта сеть будет развиваться путем планомерного ее наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Надо отметить, что органическая увязка сетей связи с сетями ЭВМ, намеченная А.А. Харкевичем, переросла в выдвинутую позже академиком В.М. Глушковым идею создания Государственной сети вычислительных центров и на ее базе Общегосударственной системы сбора и обработки информации для учета, планирования и управления народным хозяйством. Эти идеи можно рассматривать как предтечи идей создания глобальной сети Интернет, развитие которой началось в конце 60-х гг. в США и которая получила всемирное распространение (в СССР эти идеи, к сожалению, не получили должного развития).

В 1963 г. началась реализация идей А.А. Харкевича. По предложению АН и Минсвязи СССР для координации работ по созданию ЕАСС был образован Межведомственный координационный совет под председательством министра связи генерал-полковника Н.Д. Псурцева.

Этот совет согласовывал основные принципы построения ЕАСС, этапы ее развития, необходимые научные и опытно-конструкторские работы, объемы производства оборудования. Большое внимание уделялось разработке и утверждению норм и правил, обеспечивающих надежность сети и высокое качество передаваемой информации.

Единая автоматизированная сеть связи сыграла большую роль в развитии электросвязи и информатизации страны. На ее основе решались сложнейшие задачи по передаче и распределению различных видов информации для народного хозяйства, населения и обороны. На базе ЕАСС и Государственной сети вычислительных центров формировалась Общегосударственная система сбора и обработки информации для учета, планирования и управления народным хозяйством, объединявшая отраслевые и территориальные автоматизированные системы управления основных министерств, ведомств и союзных республик.

Работа над развитием взаимоувязанной сети связи страны (так теперь называется ЕАСС) продолжается и в настоящее время.

Заключение

А.А. Харкевич был яркой личностью и обладал очень развитым чувством юмора. По воспоминаниям Ю.М. Брауде-Золотарева — одного из его учеников, общаться с ним было чрезвычайно интересно и поучительно. Говорил он всегда энергично, кратко, образно. Его высказывания были афористичны, раскрывали его философское отношение к науке и запоминались на многие годы. Приведем некоторые из них:

«В любой выборке смекалистые и просто умные встречаются равновероятно редко, будь то Петровы, Ивановы, инженеры, кандидаты, доктора и так далее. Иная домашняя хозяйка для званого обеда затратит столько творческой энергии, сколько ошастливило бы многих членов ученого совета».

При обсуждении новых идей, он как-то заметил: *«Истина не имеет права на стыдливость. Она ОБЯЗАНА появиться во всей наготе в таком месте и в такое время, чтобы никто не посмел сделать вид, будто ее не заметил».*

Весьма глубоким является следующее его высказывание: *«Надо уметь отличить момент конца непонимания идеи от момента начала ее полного понимания. Между ними лежит немалое время и труд».*

В беседах с аспирантами он отмечал: *«Иные нелепые парадигмы умирают только вместе с их носителями».* И еще: *«Первейшая задача научного работника — осознание собственной ограниченности. А мы все ограничены сроком жизни, рабочими часами в сутках и, к сожалению, способностями. Вторая задача — лично избегать эффекта преждевременного насыщения, когда радость от удачи заслоняет пути дальнейших работ».*

Рассматривая перспективы развития теории связи, он говорил: *«Гений Шеннона дал все направления математической теории кодирования — теории информации, — но он вынужденно снял ограничения сложности и задержки. Наша задача разработать конструктивную теорию кодирования, обосновывающую выбор кодирования простейшего и с наименьшей задержкой».*

При обсуждении статьи, предложенной для публикации, он сказал ее автору: *«Вы уже показали в прошлой работе, что эта идея мертва. Важно ли читателю обсуждение, по какому разряду ее хоронить?»*

Он часто спрашивал своих аспирантов: *«В чем различие диссертационной работы от исследовательской?»* И, не получив вразумительного ответа, говорил: *«Исследовательская работа хороша, если требует многих продолжений, а диссертационная — должна иметь своевременный конец».*

Придавая особое значение интеллекту своих студентов, он так формулировал свое кредо оценки их знаний на экзаменах. Он говорил: *«Я ставлю 5 тому, кто все знает и все понимает, 4 — тому, кто все понимает, но ничего не знает, 3 — тому, кто все знает, но ничего не понимает, а 2 — тому, кто ничего не знает и не понимает».*

Он имел развитое чувство собственного достоинства и глубоко уважал своих сотрудников, независимо от занимаемой ими должности. Чувства подострастия перед высоким начальством он был лишен. Однажды, когда он был вызван к руководству Академии, он попросил перенести эту встречу, так как им уже были назначены встречи аспирантам и сотрудникам. Он позвонил и сказал: *«К сожалению, у меня уже на это время назначена важная встреча и я не могу ее отменить».*

А.А. Харкевич был художественной натурой, понимал и любил природу, любил путешествия за рулем автомобиля и моторной лодки, которыми управлял с большим мастерством. В часы досуга он прекрасно лепил из пластилина, увлекался художественной фотографией. Его цветные стереоскопические фотографии были выполнены высокопрофессионально. Он любил кино и современную литературу. У него были «золотые руки», и он очень любил на досуге заниматься разными поделками, мог починить часы и любое тонкое ювелирное изделие, ликвидировать неполадки в автомобиле, в его рабочем кабинете был токарный станок. Но самым любимым и главным делом в его жизни была наука. Он считал, что наука — самое важное, самое прекрасное и самое нужное в жизни человека.

А.А. Харкевич не только обладал творческим даром исследователя, но и редчайшим педагогическим талантом. В одном из своих стихотворений русский поэт Яков Полонский писал:

*Кто упростит задачи сложность?
Кто к совершенству даст возможность
Расчистить миллион дорог?*

Если говорить о теоретических проблемах электросвязи, то в ответ на эти вопросы следует указать на академика А.А. Харкевича. Он расчистил путь к знаниям тысячам инженеров, которые, познав законы электросвязи, своей работой способствовали тому огромному техническому прогрессу, который произошел в области телекоммуникаций за вторую половину XX в.

А.А. Харкевич был человеком глубоко мыслящим и интересовался не только техническими проблемами, но и тайнами природы человеческого творчества. В одной из последних работ А.А. Харкевича «Некоторые воззрения на механизм творческого процесса» содержится анализ взглядов А. Пуанкаре и У. Эшби на проблему творчества и излагаются его собственные взгляды. Он пришел к выводу, что в принципе возможно создание машины, выполняющей творческие функции. Этот вывод согласуется с мыслью Пуанкаре: «Творить — это распознавать, это выбирать из множества возможных комбинаций идей те, которые полезны».

Живший в XIX в. английский писатель Самюэл Смайлс как-то высказал мудрую мысль: «Число годов еще ничего не свидетельствует о длине жизни; жизнь человека измеряется тем, что он в ней сделал и почувствовал». Если оценивать продолжительность жизни академика А.А. Харкевича с этой точки зрения, то она оказалась необычайно длинной. Этим же писателем было сказано: «Книги обладают способностью бессмертия. Они самые долговечные плоды человеческой деятельности». Своей созидательной деятельностью и своими замечательными книгами академик А.А. Харкевич, без сомнения, обеспечил себе почетное место в истории отечественной науки.

Литература

1. Харкевич А.А. Избранные труды. — М.: Наука, 1973. Т. 1; 3.

Александр Яковлевич ХИНЧИН

Нельзя не признать, что занятия математикой — ниспосланное богами безумие человеческого духа.

Альфред Норт Уайтхед



Введение

Математика — это язык, на котором пишутся законы природы. Подобно эсперанто для ученых он является универсальным средством международного общения и обмена идеями. Универсальность математического языка в том, что на нем можно выражать законы, относящиеся не только к математике, но и к разным областям науки и техники. На этом языке могут быть выражены законы физики, химии, биологии, социологии и многих других областей человеческой деятельности. Язык математики чрезвычайно важен и для электросвязи.

Знаменитый российский поэт Иосиф Бродский сказал: *«Поэт — орудие языка»*. С тем же основанием можно утверждать, что математик — орудие математического языка. В этом отношении математик подобен поэту, творящему новые языковые формы. Развитие математики, как и развитие языка, расширяет возможности мышления людей и способствует интеллектуальному развитию человечества.

К крупнейшим математикам современности принадлежит Александр Яковлевич Хинчин, которым получены фундаментальные результаты во многих областях: теории функций, теории чисел, теории вероятностей и случайных процессов, а также теории информации. Ряд его работ оказал глубокое влияние на развитие теории связи.

Он был необыкновенно яркой личностью — любил и основательно знал поэзию и театр, был дружен с Владимиром Маяковским и со многими актерами Художественного театра.

Большое внимание А.Я. Хинчин уделял вопросам преподавания математики в средней школе. Одной из центральных проблем в методике является проблема формализма знаний учащихся. А.Я. Хинчин рассматривал сущность и различные проявления этого явления при обучении школьников математике. Он связывал процесс обучения с развитием интеллекта школьников и воспитанием их личности.

Биографический очерк

Александр Яковлевич Хинчин родился 19 июля 1894 г. в с. Кондрово Медынского уезда Калужской губернии в семье инженера-технолога, который работал главным инженером на крупной бумажной фабрике. Еще в школе он проявил большие способ-

ности к математике. Однако математика была не единственным его увлечением. В школьные годы он серьезно интересовался театром. Это увлечение было так велико, что он организовал в Кондрове любительский театр, в котором был режиссером и участвовал в спектаклях в качестве актера. Одно время он брал у любимых актеров МХАТ уроки мастерства и дикции. Школу он окончил в 1911 г. Со школьных лет у А.Я. Хинчина была очень сильна любовь к поэзии. Он писал стихи и после окончания школы выпустил два небольших стихотворных сборника: «Пленения» (Калуга. 1912) и «О деве с тайной в светлом взоре» (Калуга. 1914).

Долгое время увлечение поэзией конкурировало с увлечением математикой. Однако в конце концов последнее взяло верх, и в 1911 г. он поступил на физико-математический факультет Московского государственного университета (МГУ). Увлечение изящной литературой и театром сделало А.Я. Хинчина широкообразованным человеком и сказалось на его формировании как блестящего лектора и педагога, автора прекрасных монографий и учебников, написанных с поразительной ясностью и изяществом.

В МГУ он посещал семинар выдающегося советского математика академика Н.Н. Лузина и под его руководством выполнил ряд неординарных работ по метрической теории функций. Его первая публикация в 1916 г. была посвящена теории интегрирования. Результаты его исследований по теории функций в 1927 г. были подытожены в вышедшей на французском языке большой статье «Исследования структуры измеримых функций».

После окончания в 1916 г. МГУ А.Я. Хинчин был оставлен в аспирантуре, окончание которой позволяло ему преподавать математику в университете. В течение нескольких лет он преподавал математику в Московском женском институте и в различных школах Москвы, а с 1919 г. — в Иваново-Вознесенске.

С 1922 г. научные интересы А.Я. Хинчина концентрируются вокруг проблем теории чисел и теории вероятностей. В области теории чисел ему удалось усилить результаты знаменитых английских математиков Г. Харди и Дж. Литлвуда, получивших оценку количества простых чисел, меньших заданного натурального числа.

В 1927 г. Хинчин стал профессором МГУ и в этом же году опубликовал книгу «Основные законы теории вероятностей». В 1932–1934 гг. он выполнил исследования, заложившие основы теории стационарных случайных процессов, играющей значительную роль во многих прикладных областях и в том числе в теории связи. Полученные результаты нашли отражение в его ставших классическими монографиях «Асимптотические законы теории вероятностей» (1933 г.) и «Предельные законы для сумм независимых случайных величин» (1938 г.). В 1935 г. А.Я. Хинчин переехал из Москвы в Саратов, где в течение двух лет преподавал математику в Саратовском университете.

В 1936 г. вышла книга А.Я. Хинчина «Цепные дроби», которая была переиздана в 1949 г. В этой книге содержались как классические сведения о непрерывных дробях, так и оригинальная глава по метрической теории диофантовой аппроксимации.

Возвратившись в 1937 г. в Москву, он вместе с А.Н. Колмогоровым и своим учеником Б.В. Гнеденко создал в МГУ научную школу теории вероятностей.

В 1938–1939 гг. в Математическом институте им. Стеклова АН СССР и в МГУ работала группа ведущих математиков университета: П.С. Александров, И.М. Гельфанд, А.Н. Колмогоров, И.Г. Петровский, А.Я. Хинчин и др. В этом институте был организован отдел теории вероятностей и математической статистики, которым завел А.Н. Колмогоров.

С 1940 г. интересы Хинчина снова меняются и он начинает теоретические исследования в области статистической механики.

Хинчин написал книгу «Восемь лекций по математическому анализу», вышедшую впервые в 1943 г. Эта книга содержала изящное изложение основных положений математического анализа и переиздавалась семь раз. В том же году вышла его другая книга «Математические принципы статистической механики», давшая математически строгое изложение классической статистической механики. Работу в этой области он продолжал и в последующие годы. В 1951 г. была опубликована книга «Математические основы квантовой статистики», которая в 1956 г. была переведена на немецкий, а в 1960 г. — на английский языки. Эти книги, благодаря ясности изложения, полезны как для математиков, работающих над применением математических методов к физическим проблемам, так и для физиков, нуждающихся в знании математических основ своей области.

В 1945 г. А.Я. Хинчин пишет брошюру «Три жемчужины теории чисел», в которой элементарными методами были доказаны три теоремы теории чисел. Эти теоремы имели чрезвычайно простую формулировку, но долгое время не поддавались усилиям многих крупных математиков. Интересна история создания этой книги. А.Я. Хинчин написал ее по просьбе своего молодого ученика, который был ранен на фронте и из госпиталя прислал ему письмо с просьбой прислать «каких-нибудь математических жемчужинок». Эта мастерски и с большим изяществом написанная книга была в 1952 г. переведена на английский язык.

Последние годы своей жизни А.Я. Хинчин посвятил математической разработке идей шенноновской теории информации. В 1957 г. он опубликовал важную книгу «Математические основы теории информации», которая в этом же году была переведена на английский язык. В книге математически строго доказывались основные теоремы теории информации Шеннона.

Всего А.Я. Хинчиным опубликована 151 научная работа в области теории вероятностей.

В 1939 г. А.Я. Хинчин стал членом-корреспондентом АН СССР, а в 1943 г., когда была организована Академия педагогических наук (АПН) РСФСР, А.Я. Хинчина избрали ее академиком. Этой Академии поручалась научная разработка вопросов общей педагогики, истории педагогики, психологии, школьной гигиены и методов преподавания основных дисциплин в начальных и средних школах, а также подготовка через аспирантуру и докторантуру научно-педагогических кадров для вузов и научно-исследовательских институтов по педагогике и психологии.

В 1941 г. состоялось первое присуждение Сталинских (ныне — Государственных) премий СССР. За выдающиеся научные результаты в области теории вероятностей лауреатами премии стали А.Н. Колмогоров и А. Я. Хинчин.

Александр Яковлевич Хинчин скончался 18 ноября 1959 г. в Москве.

Научные работы

Как уже отмечалось, А.Я. Хинчин являл собой пример разносторонне развитой личности. Существенный вклад он внес во многие разделы математики. Полученные им результаты в области теории массового обслуживания, теории случайных процессов и теории информации имеют непосредственное отношение к теории связи и оказали серьезное влияние на ее развитие.

Теория массового обслуживания. В электросвязи зародился один из крупных разделов математической теории случайных процессов — теория массового обслуживания. Первый камень в фундамент этой теории заложил датчанин, сотрудник Копенгагенской телефонной компании А.К. Эрланг. В своих работах 1908—1918 гг. он дал четкую математическую формулировку проблемы очередей, возникающих в сетях связи из-за того, что количество телефонных каналов по причинам экономического характера всегда существенно меньше числа установленных телефонов. Эрланг преследовал практическую цель — дать методику расчета числа каналов, достаточного для обслуживания всех подключенных к сети телефонных аппаратов с малой вероятностью потери вызова.

Направление, которое начал развивать Эрланг, называется в настоящее время теорией телетрафика. Следует отметить, что именно с работ Эрланга началось проникновение в электросвязь весьма широко используемых сегодня статистических методов исследования. Однако проблема, которой он коснулся, — проблема очередей — одна из острейших в XX в. Важная задача определения надежности работы различного рода устройств радиоэлектроники и связи также решается на основе теории массового обслуживания.

Таким образом, теория массового обслуживания, возникнув в связи с конкретной практической задачей, приобрела чрезвычайно широкую сферу приложений, найдя применение во многих областях человеческой деятельности.

Первые работы по теории телетрафика в СССР были выполнены академиком М.Ю. Юрьевым, опубликовавшим в 1925 г. в 5-6-м номере журнала «Жизнь и техника связи», статью «Определение числа соединительных линий между районными телефонными станциями». В начале 30-х гг. инженерами К.В. Базилевичем и В.А. Горюковым была подготовлена первая советская книга «Трафик и работа приборов соединения автоматических телефонных станций».

Неудивительно, что теорию, имеющую столь важное практическое значение, стали развивать многие ученые, в том числе известные математики. В создании теории участвовали американские ученые — Т. Фрай, выпустивший в 1928 г. первую книгу по теории вероятностей, в которой одна из глав посвящена теории телетрафика, В. Феллер, Д. Кенделл и др.

Проблемы теории массового обслуживания привлекли внимание А.Я. Хинчина в начале 30-х гг., когда он, будучи депутатом Моссовета, вошел в секцию связи, которая в те годы рассматривала проблемы внедрения в Москве автоматических телефонных станций. В это время по просьбе специалистов московского телефонного узла А.Я. Хинчин выполнил ряд оригинальных исследований, имевших практическую направленность. Результаты этой работы были опубликованы в начале 30-х гг. в двух статьях А.Я. Хинчина. В одной из них он развил новый перспективный метод, кото-

рый впоследствии получил название метода «вложенных цепей Маркова». Этот метод позволил определять распределение времени ожидания для случая простейшего потока вызовов, поступающих на один прибор, обслуживаемых с очередью для произвольного распределения времени обслуживания.

К проблемам теории массового обслуживания А.Я. Хинчин вернулся вновь в 1953 г. в связи с работами, проводившимися на московской телефонной сети. В это время, помимо консультационной деятельности, он составил и прочел для инженеров курс теории телетрафика. Готовя этот курс, он ознакомился со значительной журнальной литературой по данному вопросу и наметил основные задачи теории массового обслуживания. Результаты выполненных А.Я. Хинчиным исследований были опубликованы в 1955 г. в его монографии «Математическая теория массового обслуживания», в которой систематически и математически строго излагались основы теории телетрафика.

Теория телетрафика — один из крупных, интенсивно развивающихся разделов теории массового обслуживания. Это обусловлено быстрыми темпами развития сетей связи, что делает весьма важной проблему повышения эффективности ее использования путем управления потоками сообщений, передаваемых по каналам сетей.

Значительные научные исследования с привлечением метода статистического моделирования на ЭВМ для решения данных проблем были выполнены советскими учеными Г.П. Башариным, Б.С. Лившицем, А.Д. Харкевичем, М.А. Шнепсом и др.

Теория случайных процессов. Исключительное значение в теории связи имеет теорема, установленная в начале 30-х гг. знаменитыми математиками современности Н. Винером (1930 г.) и А.Я. Хинчиным (1934 г.). Эта теорема, носящая во всех книгах имя теоремы Винера—Хинчина, имеет следующую формулировку: «Функция автокорреляции и энергетический спектр стационарного случайного процесса, имеющего нулевое математическое ожидание, связаны между собой преобразованием Фурье».

Она дала в руки инженеров инструмент для решения многих возникающих на практике задач, требующих анализа процессов прохождения случайных сигналов в приемных и передающих устройствах через различного рода нелинейные блоки, в которых осуществляется их обработка. При этом на входе устройств обработки сигналов известны статистические характеристики сигналов, и необходимо определить спектр сигналов, действующих на выходе таких устройств. Особую актуальность подобные задачи приобрели с возникновением радиолокационных и спутниковых систем связи, которые должны были проектироваться так, чтобы обеспечивалась высокая помехоустойчивость приема сигналов. С начала 50-х гг. в фундаментальных монографиях В.И. Бунимовича «Флуктуационные процессы в радиоприемных устройствах» (1951 г.), Д. Миддлтона «Введение в статистическую теорию связи» (1960 г.), Б.Р. Левина «Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике» и В.С. Пугачева «Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления» (1957 г.) и многочисленных учебниках на основе теоремы Винера—Хинчина решаются многочисленные задачи, связанные с детектированием радиосигналов с разными видами модуляции. Советским ученым С.В. Бородичем и английским ученым Р.Г. Медхэрстом была создана теория, на основе которой разра-

батывались методы расчета нелинейных искажений, возникающих при прохождении с частотной модуляцией (ЧМ) через линейные цепи. Эта теория сыграла ключевую роль при проектировании многоканальных радиорелейных систем связи с ЧМ, которые с середины XX в. широко используются для организации линий связи во всех странах мира.

Теория информации. Основы теории информации были заложены в 1948 г. одним из крупнейших ученых современности Клодом Шенноном. А.Я. Хинчин заинтересовался проблемами теории информации в начале 50-х гг. В своих работах он существенно развил концепцию Шеннона о пропускной способности канала связи и энтропии источника информации. Его работы, дающие глубокое и строгое изложение основных положений теории информации, содержат полное изложение всех шенноновских результатов. Книга А.Я. Хинчина «Математические основы теории информации» — одна из первых книг по теории информации, написанных известными математиками. Она сыграла важную роль в развитии этой теории в нашей стране и за рубежом.

Заключение

Поэт слышит голос музы и создает поэму. Математик, ощущая невозможность на существующем в настоящее время математическом языке отразить гармонию окружающего нас мира и его законы, создает новую математическую теорию — новый язык. Язык — мощнейший катализатор прогресса, и его развитие позволяет человечеству продвинуться еще на одну ступень в познании природы.

А.Я. Хинчин был одним из тех, кто в XX в. сделал многое для формирования новых разделов математики, сыгравших значительную роль в разработке важнейших законов теории связи, касающихся передачи сообщений по каналам связи. Он оставил после себя богатейшее научное наследие.

Его научные интересы формировались не только под влиянием потребностей практики (например, работы по теории массового обслуживания), но в не меньшей степени его эстетическим чутьем, чувством гармонии, красоты. Именно этим можно объяснить его громадный творческий диапазон, позволивший ему охватить столь широкий круг сложнейших математических проблем. Его любовь к поэзии, к театру, интерес к педагогике являлись продолжением этих его качеств в науке.

Исключительно ценные человеческие черты А.Я. Хинчина — скромность и порядочность. Вспоминает его ученик академик АН УССР Б.В. Гнеденко: «Он не признавал недоделанных дел и никогда не позволял себе перекладывать на плечи других порученную ему работу. Он не стремился к внешним почестям и, будучи уже ученым с мировым именем, членом-корреспондентом АН СССР и академиком АН РСФСР, продолжал жить довольно скромно, отличая людей за их внутренние качества, а не за их служебное положение».

В качестве одного из эстетических критериев в математике и в педагогике А.Я. Хинчин говорил о стремлении всегда искать кратчайший путь, ведущий к цели. Внутри него всегда горел огонь, и этим огнем была его мысль.

Российский поэт Николай Минский в начале XX в. писал:

*...Не тот бессмертен на Земле,
Кто превзошел других в Добре или во Зле,
Кто славы хрупкие скрижали заполнил повестью,
Бесцельною, как сон,
Пред кем толпы людей,
Такой же прах как он,
Благоговели иль дрожали,
Но всех бессмертней тот,
Кому сквозь прах Земли
Какой-то новый мир мерещился вдали,
Несуществующий, но вечный!
Кто цели неземной так жаждал и страдал,
Что силой жажды сам мираж себе создал
Среди пустыни бесконечной.*

Такой новый мир создал великий российский ученый А.Я. Хинчин.

Литература

1. Хинчин А.Я. Избранные труды по теории вероятностей. — М.: ТВП, 1995.

Ричард Весли ХЭММИНГ

Классические произведения – это, быть может, такие произведения, которые способны застыть, не умирая и не разлагаясь.

Поль Валери



Введение

В книге Стефана Цвейга «Звездные часы человечества» есть замечательный рассказ «Гений одной ночи» об офицере французской армии Руже де Лиле, написавшем в течение одной ночи знаменитую «Марсельезу». Эта песня почти мгновенно, в течение нескольких дней, распространилась по всей Франции. Она получила колоссальную популярность во всем мире и впоследствии стала национальным гимном Французской Республики. История сохранила имя Руже де Лиля в памяти потомков только благодаря этой единственной песне.

В подобном же смысле американского ученого Ричарда Хэмминга можно назвать «гением одной идеи», так как идея построения кодов, корректирующих ошибки, изложена только в одной его научной статье, опубликованной в 1950 г. Статья содержала конструкцию блочного кода, корректирующего одиночные ошибки, возникающие при передаче сообщений.

Всю жизнь Хэмминг активно вел научные исследования, однако всемирно знаменитой и классической стала его единственная работа в области теории информации, составляющая по своему объему ничтожный процент его научного творчества. Эта статья быстро получила мировую известность и принесла ему заслуженную славу.

Подобно тому, как за открытиями Фарадея, Максвелла и др. последовали многочисленные исследования и изобретения в области электросвязи, изменившие нашу жизнь, так и после создания Клодом Шенноном теории информации, В.А. Котельниковым теории потенциальной помехоустойчивости открылись новые возможности для развития телекоммуникаций. Одним из важнейших разделов теории информации является теория кодирования, основы которой заложил Хэмминг.

Шеннон установил, что информация по каналу связи может передаваться безошибочно в том случае, если скорость ее передачи не превышает его пропускной способности. Однако доказательство Шеннона носило неконструктивный характер. Более

поздние исследования американских ученых С.О. Райса и К. Шеннона показали, что практически любой случайно выбранный код позволяет достичь предела помехоустойчивости приема сообщений, указываемого теорией. Однако такой код имел высокую сложность декодирования — число операций, необходимых для декодирования принятой кодовой комбинации такого кода, возрастало экспоненциально с ростом его длины.

Хэмминг был первым, кто предложил конструктивный метод построения кодов с избыточностью, которые имели простой метод декодирования. Работа Хэмминга стала классической и предопределила большинство последовавших позже работ в этой области.

Биографический очерк

Ричард Весли Хэмминг родился 11 февраля 1915 г. в Чикаго. В 1937 г. он окончил Чикагский университет и получил степень бакалавра. Свое образование он продолжил в университете штата Небраска, в котором в 1939 г. ему была присвоена магистерская степень. Завершил свое образование он в 1942 г., став доктором философии в области математики в университете штата Иллинойс.

В 1945 г. Хэмминг участвовал в знаменитом Манхэттенском исследовательском проекте, целью которого было создание атомной бомбы. Он был приглашен участвовать в этом проекте, так как в то время работал в Колумбийском университете, и ему пришлось трудиться в Лос-Аламосе.

С 1946 г. после окончания Второй мировой войны Хэмминг начинает работать в Белл-лаборатории, где занимается конструированием компьютеров. В этой знаменитой лаборатории, в которой работал К. Шеннон и многие другие выдающиеся ученые, он проработал почти тридцать лет.

В 1976 г. Хэмминг переехал в город Монтеррей штата Калифорнии и возглавил научные исследования в области вычислительной техники в Высшем военно-морском училище. В этом училище он преподавал и писал книги по теории вероятностей и комбинаторике.

Работа Хэмминга была отмечена многими наградами. В 1968 г. он стал почетным членом Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) и был награжден премией Тьюринга Ассоциации компьютерных технологий. За исключительно важный вклад в развитие информационных наук и систем в 1979 г. в IEEE он получил премию Эммануила Пиоре. В 1980 г. его избрали членом Национальной академии инженерных наук, в 1981 г. он получил премию Гарольда Пендера от Пенсильванского университета, а в 1988 г. был награжден почетной медалью IEEE. В 1996 г. в Мюнхене за свою работу по кодам, корректирующим ошибки, Хэмминг получил престижную премию Эдуарда Рейна в размере 130 000 долл. В честь Хэмминга Институтом инженеров по электротехнике и электронике учреждена медаль, которой награждают ученых, выполнивших значительные работы в области теории информации.

Ричард Весли Хэмминг скончался 7 января 1998 г. в Монтеррее, штат Калифорния.

Работы, заложившие основы теории кодирования

Коды, способные корректировать ошибки, возникающие (в каналах связи или в цифровых вычислительных машинах и т.п.) при обработке сигналов, были придуманы Хэммингом еще до 1948 г., когда была опубликована знаменитая статья Шеннона «Математическая теория связи», заложившая прочную основу теории связи. В этой статье Шеннон, ссылаясь на выполненное в 1947 г. исследование Хэмминга, с которым он общался, так как они оба были сотрудниками Белл-лаборатории, описал в качестве примера простой код длины 7, корректирующий все одиночные ошибки. Публикация же оригинальной статьи Хэмминга по патентным соображениям была задержана до апреля 1950 г.

Следует отметить, что пример корректирующего ошибки кода, приведенный в упомянутой статье Шеннона, инициировал исследование другого американского ученого М.Е. Голея. Голей независимо от Хэмминга открыл коды, корректирующие одиночные ошибки, и до появления в печати статьи Хэмминга опубликовал свои результаты в 1949 г. в короткой заметке (всего на полстраницы) в «Proc. IEEE». В ней Голей рассмотрел не только бинарные коды, но и коды общего вида, кодовые комбинации которых принадлежат конечному полю (математическому множеству элементов, в котором определены операции сложения, вычитания, деления и умножения) с p^n элементами (p — простое число, а n — целое).

История науки дает возможность осознать всю сложность и деликатность проблемы приоритета в установлении тех либо иных научных истин, относительно которого часто возникают ожесточенные споры, приобретающие порой уродливый характер споров некомпетентных людей о национальном приоритете. Данная история также показывает, что абсолютных критериев для установления таких приоритетов не существует. В этой связи интересно отметить, что ряд основополагающих идей теории связи был известен в математике еще до того, как их еще раз открыли ученые, решающие проблемы передачи сообщений по каналам связи. В своей книге «Алгебраическая теория кодирования» крупный американский специалист в области теории кодирования Э. Берлекамп сделал интересное замечание. Он отметил, что конструкция кодов Хэмминга была описана (правда, в совсем ином контексте) еще в 1942 г. известным американским математиком Р.А. Фишером, работа которого была посвящена теории факторного анализа (одного из разделов математической статистики) и ее связи с математической теорией групп. Вспомним, что теорема В.А. Котельникова, указывающая на возможность представления аналоговых сигналов в цифровом виде, также была сформулирована еще в начале XX в. английскими математиками Э.Т. Уиттекером и Дж. М. Уиттекером как один из частных математических результатов теории интерполяции функции. Следует подчеркнуть, что ни Фишер, ни упомянутые английские ученые не связывали свои результаты с важнейшими для современного мира проблемами передачи информации по каналам связи.

Великий немецкий поэт Гете говорил: *«Недостаточно только получить знания; надо найти им приложение. Недостаточно только желать; надо делать»*. Для теории и техники связи теорема Котельникова и коды Хэмминга имеют исключительное значение, поскольку именно благодаря этим ученым перед инженерами откры-

лась ясная перспектива создания цифровых систем, которые в конце XX в. произвели революцию в электросвязи, и их с полным на то основанием называют именами этих ученых.

Статья Хэмминга стала катализатором, ускорившим развитие теории кодирования, и она обратила на себя внимание научной общественности. Во всех учебниках этот класс кодов называют кодами Хэмминга и изложение теории кодирования начинают с описания их конструкции. По-видимому, было бы справедливее эти коды называть кодами Хэмминга–Голея, учитывая, что Голей пришел к тем же идеям, что и Хэмминг, независимо и опубликовал их раньше. Его статья не вызвала к себе сразу же должного внимания по причинам, скорее всего, случайного характера.

По сравнению с кодами, на существование которых указывала теория Шеннона, коды Хэмминга были разочаровывающе слабы. Однако предложенные Хэммингом регулярные методы построения кодов, корректирующих ошибки, имели фундаментальное значение. Они показали инженерам практическую возможность достижения тех пределов, на которые указывали законы, установленные теорией информации. Эти коды нашли практическое применение при создании компьютерных систем. В своей статье он ввел в научный обиход важнейшие понятия теории кодирования — расстояние Хэмминга между кодовыми комбинациями в векторном пространстве (для двоичных кодов оно определяется как количество позиций этих комбинаций с различными символами) и границы Хэмминга для исправляющей способности блочных корректирующих кодов. Границу Хэмминга для двоичных кодов определяет следующее выражение:

$$\sum_{j=0}^e C_N^j \leq 2^N/M,$$

где e — связывающее число ошибок, которое может быть исправлено корректирующим блочным кодом длиной N , имеющим M кодовых комбинаций (здесь C_N^j — биномиальный коэффициент).

Значение этой работы Хэмминга в том, что она сыграла ключевую роль в последующем развитии теории кодирования и стимулировала обширные исследования по алгебраической теории кодирования, выполненные в последующие годы. Давид Слэпьян был первым, кто в 1956 г. изложил теорию кодов с проверкой на четность на строгой математической основе. Основной сдвиг в области теории кодирования произошел, когда французский ученый А. Хоквингем (1959 г.) и американские ученые Р.К. Боуз и Д.К. Рой-Чоудхури (1960 г.) нашли большой класс кодов (коды БЧХ), исправляющих кратные ошибки. В это же время американские ученые И.С. Рид и Г. Соломон (1960 г.) нашли связанный с кодами БЧХ класс кодов для не двоичных каналов.

В 1980 г. Хэмминг написал учебник «Теория кодирования и теория информации», который в 1983 г. был переведен на русский язык. Эту книгу, как, впрочем, и другие написанные им книги, отличает оригинальная постановка вопросов, популярность изложения, глубокое понимание практических задач, корректность и разумная степень строгости математической трактовки затронутых вопросов. Изложение книги построено так, чтобы читателю было интуитивно понятно, почему справедлива та или иная теорема.

Заключение

Как уже отмечалось, выдающимся научным вкладом Хэмминга в теорию связи является его знаменитая статья, посвященная кодам, корректирующим ошибки. Следует, однако, подчеркнуть, что он обладал широчайшей эрудицией и в сферу его научных интересов входил обширный круг математических и технических проблем. Он получил первоклассные научные результаты не только в теории кодирования, но и в ряде других областей науки.

В 1956 г. Хэмминг, работая над созданием одного из первых компьютеров IBM 650, разработал язык программирования высокого уровня, который применяют и сегодня. Оригинальные работы были выполнены им в области численных методов решения разного рода прикладных математических задач. Им были разработаны новые методы численного интегрирования дифференциальных уравнений и спектрального анализа. Он предложил для сглаживания данных при спектральном анализе использовать «окно Хэмминга», позволяющее осуществлять их предварительную эффективную «фильтрацию», избавляясь от ошибок измерений.

Хэмминг прославил свое имя не только как ученый, но и как выдающийся педагог. С 1962 по 1997 г. он написал восемь книг для ученых и инженеров по прикладным численным методам анализа (1962, 1971 и 1989 гг.), цифровым фильтрам (1977 г.), теории кодирования и теории информации (1980 г.), теории вероятностей и математической статистике (1985 г.). В этих работах проявилось истинно научное и педагогическое дарование автора, и они пользовались большой популярностью. Три его книги (по численным методам анализа, цифровым фильтрам, теории кодирования и теории информации) были изданы в России.

Создавая замечательные математические книги для инженеров, Хэмминг видел свою задачу не только в том, чтобы изучающие их специалисты получили глубокие знания, но и в том, чтобы они почувствовали сам дух науки. Его девизом было «...цель расчетов не числа, а понимание». В этом он был подобен Г. Лейбницу, который так характеризовал свое творческое кредо: *«Я старался писать так, чтобы изучающий всегда мог видеть внутреннюю основу изучаемых им вещей, чтобы он мог обнаружить источник открытия и, следовательно, во всем разобратся так, как если бы он придумал это сам».*

В последней весьма интересной книге Хэмминга «Искусство научного исследования и изобретения: учиться изучать» — «The Art of Doing Science and Engineering: Learning to Learn», изданной в 1997 г., изложены его философские взгляды на природу и технологию научного творчества.

Клод Элвуд ШЕННОН

Из всех имен, которым посвящено общественное внимание, нет и, поистине, быть не может более славных, чем имена великих подвижников знания.

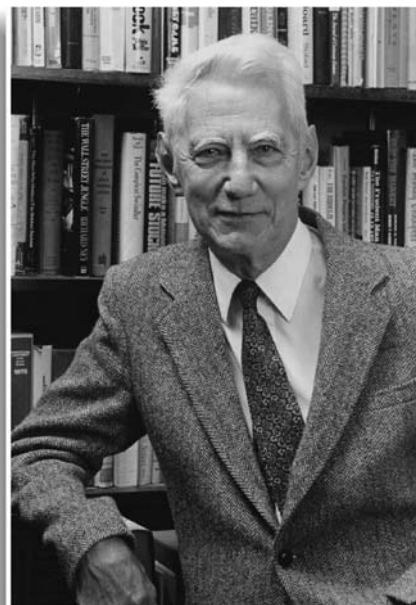
Жоффруа Сент-Илер

Введение

Конец XX в. был ознаменован бурным развитием цифровых систем связи. За последние 50 лет многократно возросли потоки информации, циркулирующие по каналам связи. В ряде развитых стран почти 100% населения охвачены телефонной связью, почти каждый пятый житель Земли в 2006 г. будет иметь мобильный телефон и пользоваться услугами систем сотовой связи. Во многих странах мира началось развитие систем цифрового и звукового вещания. Быстрыми темпами развивается Интернет – универсальная всемирная сеть связи, позволяющая уже сегодня сотням миллионов людей решать свои насущные проблемы, имея свободный доступ к различным базам данных, содержащим информацию по разным научным, социальным, политическим, профессиональным, бытовым и другим вопросам.

Прогресс достигнут благодаря огромным успехам в познании законов природы в области физики и химии, а также развитию полупроводниковой технологии, позволяющей создавать недорогие и компактные радиоэлектронные устройства для передачи, приема и обработки информации. Благодаря прогрессу человечество вступает в новую эпоху создания информационного общества, которое, в том числе благодаря и средствам связи, приведет человечество к единению, утраченному с библейских времен.

Огромное влияние на этот прогресс оказали работы, установившие важнейшие закономерности в области передачи и приема информации. Выдающийся научный вклад в данном направлении был сделан крупнейшим ученым современности Клодом Шенноном – создателем теории информации. Его работы вошли в сокровищницу человеческой мысли. Так же как идеи Ньютона, Эйнштейна, Бора оказали и продолжают оказывать влияние на жизнь последующих поколений, так и фундаментальные идеи Шеннона будут направлять исследования и разработки в области информационных систем.



Биографический очерк

Клод Элвуд Шеннон родился 30 апреля 1916 г. в г. Питоски штата Мичиган, США. Его детство прошло в маленьком городе Гаулорде в Мичигане, где он окончил среднюю школу. Еще в школе у Шеннона проявились исключительные способности к математике, интерес к науке, а также обнаружился талант к созданию моделей различных устройств. Им была построена почти километровая линия телеграфной связи, соединившая его дом с домом друга. Одним из кумиров его детства был знаменитый американский изобретатель Томас Алва Эдисон, который, как это выяснилось позже, был дальним родственником Шеннона.

Шеннон носил имя отца, работавшего нотариусом. Его мать звали Волк Мейбл Кэтрин. В школьные годы Шеннон любил играть с радиоконструктором и с баллотировочным аппаратом — электрическим устройством для подсчета голосов избирателей, которые ему подарил отец. Он также очень любил решать математические головоломки, которые давала ему старшая сестра Кэтрин, ставшая впоследствии профессором математики. По его словам, одним из его сильных юношеских увлечений была криптография.

В 1936 г. Шеннон окончил Мичиганский университет по редкой для тех лет специальности — электротехника и математика, получив степень бакалавра. Он начал работать ассистентом-исследователем в знаменитом Массачусетском технологическом институте (МТИ).

В МТИ Клод Шеннон до 1940 г. занимался разработкой дифференциального анализатора и теорией релейных и переключающих схем. В 1940 г. в этом институте ему была присвоена степень доктора наук в области математики. После защиты докторской диссертации К. Шеннон год провел в Институте перспективных исследований в Принстоне, в котором в то время вел свои исследования А. Эйнштейн.

С 1941 по 1956 г. Шеннон — сотрудник знаменитой математической Белл-лаборатории и преподает в качестве профессора электротехники в Мичиганском университете. Во время Второй мировой войны он разрабатывал системы криптографии, одна из которых использовалась для правительственной связи при организации трансокеанских конференций между Президентом США Рузвельтом и Премьер-министром Великобритании Черчиллем. Именно работа в области криптографии привела его, по его же словам, к идеям теории информации.

В 1948 г. в журнале «Bell System Technical Journal» была опубликована самая знаменитая статья Шеннона «Математическая теория связи», заложившая основы теории информации. В 1956 г. он был приглашенным профессором, а с 1958 г. — постоянным профессором МТИ.

В возрасте 50 лет в 1966 г. К. Шеннон вышел на пенсию. В течение последующих десяти лет он вел научные исследования. Однако далеко не все результаты были опубликованы, так как он не считал их достаточно важными. Он понимал, что прошел пик своих научных достижений, и говорил: *«Большинство великих математиков сделали свои лучшие работы, когда они были молоды»*.

После 1966 г. К. Шеннон вел свободный образ жизни. На досуге он занимался конструированием механических моделей, и в частности им была создана модель цирка, в котором движущиеся фигурки жонглировали булавами. Одним из его увле-

чений в этот период стала игра на бирже. Он никогда не стремился к богатству, и в данном случае его интерес к этой сложной игре носил научный характер — он решил разработать оптимальную стратегию игры на бирже. По его словам, он с успехом пользовался разработанной стратегией в течение многих лет. Однажды Шеннон выступил в Массачусетском технологическом институте с лекцией, в которой изложил свою теорию, однако подробности своей стратегии не публиковал никогда. До 1972 г. К. Шеннон оставался консультантом в Белл-лаборатории. После выхода в отставку с 1978 г. был почетным профессором МТИ.

Интересы К. Шеннона не ограничивались только академическими исследованиями. Он был замечательным человеком и обладал разносторонними способностями, обожал показывать фокусы и жонглировать. Как фокусник он имел сертификат «доктора магических наук», любил разные механические безделушки, которых собрал у себя дома великое множество. По воспоминаниям Давида Слепяна — крупного американского ученого, работавшего вместе с ним в Белл-лаборатории, в обеденный перерыв в холле лаборатории часто можно было видеть Шеннона, разъезжающего на одноколесном велосипеде и жонглирующего несколькими булавами.

Шеннон изобрел компьютер, выполняющий арифметические операции над римскими цифрами, создал механическое устройство для решения головоломки кубика Рубика, разработал основы создания компьютерных систем для игры в шахматы.

К. Шеннон был счастлив в семейной жизни, женившись в 1949 г. на Мэри Элизабет Мур, также работавшей в Белл-лаборатории и занимавшейся проблемами компьютерной техники. В их семье были три сына и дочь.

Клод Шеннон скончался 24 февраля 2001 г.

Вклад Клода Шеннона в науку

В научных работах Клода Шеннона — выдающегося математика и инженера XX в. сочетаются глубокие математические идеи с конкретным анализом сложнейших технических проблем.

Он является творцом теории информации, на результатах которой в значительной степени основан высокий уровень развития систем связи, достигнутый в последние десятилетия. Он внес существенный вклад в теории автоматов, вероятностных схем и управляющих систем — научные направления, объединенные общим понятием «кибернетика».

С 1938 по 1960 г. К. Шенноном было опубликовано 34 работы, причем пик его творческой активности приходится на десятилетие с 1948 по 1958 г., когда он получил свои основные научные результаты, опубликованные в 28 научных статьях. Работы Шеннона стали классикой и вошли в «золотой фонд» науки.

Первая работа К. Шеннона, выполненная под руководством доктора В. Буша, была посвящена исследованию дифференциального анализатора — механического устройства, представляющего собой специализированную аналоговую вычислительную машину, предназначенную для решения системы дифференциальных уравнений. Шеннон рассмотрел математические вопросы теории дифференциального ана-

лизатора и определил условия, при которых с помощью этого устройства могут быть смоделированы функции одного или нескольких переменных. Он также рассмотрел пути его совершенствования, используя вместо механических узлов электрические цепи.

Еще в середине 30-х гг. К. Шеннон обратил внимание на то, что булева алгебра является адекватным математическим аппаратом, описывающим работу контактных схем, применяемых в телефонных коммутаторах, в аппаратуре управления двигателями и в большинстве схем, предназначенных для автоматизации сложных процессов. Результаты этой работы были опубликованы в 1938 г. и легли в основу его магистерской диссертации как инженера-электрика и его докторской диссертации в области математики. Они сразу же получили признание и стали применяться при проектировании телефонных систем. За эту работу в 1940 г. Клод Шеннон был удостоен Американским институтом инженеров-электриков (АИЕЕ) премии Альфреда Нобеля. Поскольку цифровые цепи составляют основу современных компьютеров и оборудования связи, то эти результаты являются одними из наиболее важных, полученных в XX столетии. Следует отметить, что примерно в те же годы независимо от К. Шеннона к подобным результатам пришли советский ученый В.И. Шестаков и японский — А. Накасима.

Разработав метод анализа переключающих схем, К. Шеннон занимался исследованиями в данном направлении до 1953 г. и опубликовал еще несколько основополагающих работ. Им были рассмотрены вопросы синтеза двухполюсных переключающих схем, существенно развит метод, впервые предложенный одним из крупнейших математиков XX в. Дж. фон Нейманом и позволяющий синтезировать надежные схемы из ненадежных реле, указан метод оценки объема памяти телефонного коммутатора, предложены и обоснованы принципы построения вычислительной машины для проектирования переключающих схем.

Ряд чрезвычайно важных исследований К. Шеннона, выполненных в период с 1950 по 1956 г., был направлен на исследование возможностей создания логических машин, способных решать интеллектуальные задачи. Эти исследования продолжали работу, начатую знаменитыми предшественниками Шеннона в создании теории цифровых вычислительных машин А.М. Тьюрингом и Дж. фон Нейманом. К. Шеннон считал это направление чрезвычайно важным и писал в 1953 г.: «Это — не поднятая целина для ученых. Речь идет не о разработке старых месторождений, а об открытии новых богатых жил и, пожалуй, в некоторых случаях просто о том, чтобы подобрать самородки, лежащие на поверхности». Шеннон одним из первых занялся разработкой играющих машин, и в частности машин для игры в шахматы.

В 1952 г. К. Шенноном была построена лабиринтная машина — механическая мышь, названная им Тезеем в честь мифического греческого героя, победившего страшное чудовище — Минотавра и нашедшего способ выбраться наружу из запутанного лабиринта. Мышь с встроенной памятью могла самостоятельно найти путь в лабиринте, запоминая сделанные ходы и обучаясь выбору правильного пути методом проб и ошибок.

Фундаментальная работа К. Шеннона «Теория связи в секретных системах», завершенная в 1945 г., имела гриф секретности. Лишь в 1949 г. работа была рассмотрена и опубликована. Она положила начало целому ряду открытых научных пуб-

ликаций по проблеме засекречивания сообщений. В эпоху развития и массового применения цифровых систем связи данная проблема приобрела особое значение, поскольку засекречивание требуется не только в военных системах, но и в гражданских, по которым передается конфиденциальная информация коммерческого или личного характера.

Важнейшей работой К. Шеннона, которая сделала его всемирно известным ученым, стала опубликованная в 1948 г. статья «Математическая теория связи». В ней был заложен фундамент современной теории и техники передачи, хранения и обработки любой информации и, в частности, теории и техники связи. Установленные им основные закономерности передачи информации по каналам связи дали направление огромному числу исследований, выполненных множеством ученых в США, СССР, Франции, Израиле и других странах. К. Шеннон ввел понятие информации, содержащейся в сообщениях, подлежащих передаче по каналу связи, обобщил идеи Р.В. Хартли, который предложил в качестве меры информации I , содержащейся в M сообщениях, использовать логарифмическую функцию $I = \log(M)$. Обобщение Шеннона состояло в том, что он впервые стал рассматривать статистическую структуру передаваемых сообщений и действующих в канале шумов не только как конечные, но и как непрерывные множества сообщений. Созданная им теория информации дала ключ к решению двух основных проблем теории связи: устранение избыточности источника сообщений и кодирование сообщений, передаваемых по каналу связи с шумами.

Решение первой проблемы позволяет устранить избыточность из сообщения, подлежащего передаче, и достичь высокой эффективности использования канала связи.

Решение второй проблемы дает возможность при заданном отношении сигнал/шум в месте приема, определяющем пропускную способность канала связи, передать по нему сообщения со сколь угодно высокой достоверностью. Для этого необходимо использовать помехоустойчивые коды, а скорость передачи информации по этому каналу должна быть меньше его пропускной способности.

В оригинальных трудах К. Шеннона была доказана принципиальная возможность решения указанных проблем, что явилось в конце 40-х гг. полным откровением для специалистов. Это, как и труды в области теории потенциальной помехоустойчивости, созданной в СССР академиком В. А. Котельниковым, породило целую лавину исследований, продолжающихся уже более 50 лет. Отечественные и американские математики (в СССР — А.Н. Колмогоров, А.И. Хинчин, Р.Л. Добрушин, М.С. Пинскер и др., в США — А. Файнштейн, Р. Галлагер, Дж. Вольфовиц и др.) дали строгую трактовку этой теории.

С учетом фундаментальных законов передачи сообщений, установленных К. Шенноном, создаются современные цифровые системы связи. В соответствии с положениями теории информации в этих системах перед передачей сообщения по каналу связи устраняется его избыточность, а затем оно кодируется с использованием помехоустойчивых кодов. На основе этой теории были разработаны алгоритмы, позволившие значительно сократить избыточность факсимильных, речевых и телевизионных сообщений. Это привело к бурному развитию во второй половине XX в. эффективных цифровых систем подвижной, фиксированной и спутниковой связи, а также цифро-

го звукового и телевизионного вещания. Такие системы уже начали внедряться, а в первом десятилетии XXI в. они полностью заменят системы, разработанные в середине прошлого века.

Следует отметить, что некоторые положения общей теории связи были разработаны предшественниками Шеннона. В США Г. Найквистом в 1924 г. была установлена связь между скоростью передачи информации и полосой пропускания канала связи, а Р.В. Хартли в 1928 г. предложил логарифмическую меру информации, содержащуюся в сообщении. В нашей стране академик В.А. Котельников еще в 1933 г. сформулировал теорему отсчетов, лежащую в основе преобразования аналоговых сигналов в цифровую форму, а профессор Д.В. Агеев в 1935 г. разработал общие принципы линейной селекции сигналов [1].

Исследования в области теории связи К. Шеннон продолжал до 1960 г. Им было опубликовано 14 важнейших научных работ, в которых развивалась теория информации и методы вычисления скорости передачи информации и пропускной способности каналов связи. В работе «Каналы с дополнительной информацией на передатчике», опубликованной в 1948 г., была впервые исследована система передачи информации с обратной связью. В таких системах из места приема сигналов по обратному каналу на передающую сторону посылаются сообщения о качестве приема сигналов. Это позволяет обеспечить весьма надежную связь даже по каналам с низким качеством приема.

Интересно отметить, что подобные системы получили распространение после 1953 г., когда известным голландским специалистом Ван Дюреном для коротковолновых линий связи был предложен новый метод передачи цифровых сигналов с автозапросом — ARQ (Automatic Request Queuing). Метод состоял в том, что для передачи сообщений использовались коды, обнаруживающие ошибки, а на приеме при обнаружении ошибок осуществлялся автоматический запрос передатчика на повторение кодовых комбинаций, принятых с ошибками. Системы ARQ широко применялись на линиях коротковолновой связи, позволяя существенно повысить их помехоустойчивость при передаче цифровой информации [1].

Последняя из опубликованных работ К. Шеннона (1960 г.) также была посвящена системам передачи информации с обратной связью.

В 1948 г. К. Шеннон совместно со своими коллегами по Белл-лаборатории — видными американскими учеными Б. Оливером и Дж. Пирсом опубликовал первое научное исследование возможностей использования импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) для передачи сигналов. В этой статье было также приведено доказательство теоремы отсчетов, о которой уже упоминалось ранее.

Следует отметить, что независимо подобные результаты были опубликованы в СССР в 1949 г. С.В. Бородичем, который исследовал возможность создания цифровых радиорелейных систем связи с использованием ИКМ [1].

Совместно с Г. Боде — крупнейшим специалистом в области электрических цепей К. Шеннон опубликовал в 1950 г. важную для теории связи работу «Упрощенный вывод линейной теории сглаживания и предсказания по методу наименьших квадратов». В этой работе основные результаты теории сглаживания и предсказания стационарных временных рядов Винера—Колмогорова были получены новым методом, основанным не на формальном математическом подходе, а на наглядных физических соображениях и теории электрических цепей.

В 1959 г. К. Шеннон вслед за известным американским ученым С.О. Райсом получил результаты, перекидывающие мост между фундаментальной теорией потенциальной помехоустойчивости, созданной В.А. Котельниковым, и теорией информации, оценив вероятность ошибочного приема сигналов в системе связи, в которой используются многопозиционные сигналы.

Популярность теории информации среди ученых стремительно возрастала, и ее пытались, не всегда обосновано, применять во многих научных направлениях, таких как биология, психология, экономика, физика, и в других областях науки и техники. Это вызвало сильное беспокойство у Шеннона, выступившего в 1956 г. со статьей «Бандвагон», в которой он писал: *«...значение теории информации было, возможно, преувеличено и раздуто до пределов, превышающих ее реальные достижения... Теория информации, как модный опьяняющий напиток, кружит голову всем вокруг...»* К. Шеннон выступил против формальных работ, в которых понятия новой теории переносились в другие области науки, и предупреждал: *«Здание нашего несколько искусственно созданного благополучия слишком легко может рухнуть, как только в один прекрасный день окажется, что при помощи нескольких магических слов, таких как информация, энтропия, избыточность... нельзя решить всех нерешенных проблем»*.

Помимо исследований в области теории управляющих систем, криптографии и теории информации Шеннон выполнил ряд блестящих исследований более частных проблем. В 1951 г. он разработал метод, позволяющий определить энтропию печатного текста, и применил его к английскому тексту, определив его избыточность. Важной для проектирования сложных сетей связи является его статья «О максимальном потоке через сеть», опубликованная им в 1956 г. совместно с П. Элайсом и А. Файнштейном — известными американскими учеными.

Заключение

Работы Шеннона получили всемирное признание. Он был удостоен многих наград за научные достижения. Среди них — упомянутая ранее премия Альфреда Нобеля, премия М. Либмана, присужденная в 1941 г. Институтом радиоинженеров (IRE), Национальная премия за достижения в науке, присужденная в 1966 г., премия Киото — высшая японская научная награда. Общество инженеров акустиков (AES) наградило его в 1985 г. золотой медалью. Клод Шеннон являлся членом Национальной академии наук США (избран в 1958 г.) и Американской академии искусств и наук.

Святая Тереза Авильская, жившая в Испании в XVI в., писала: *«Кто делает упорные усилия, чтобы взойти на вершину совершенства, тот никогда не восходит на нее один, а всегда ведет за собой, как доблестный вождь, бесчисленное воинство»*. В областях науки, открытых Шенноном, стали работать тысячи ученых. Они достигли выдающихся результатов и довели его идеи до практических разработок принципиально новых систем связи.

Его работы привели к созданию новой отрасли прикладной математики. В данном направлении изучались общие свойства энтропии и информации, математически строго обосновывались условия, при которых верна основная теорема

Шеннона для дискретных и непрерывных каналов связи, разрабатывались методы вычисления скорости передачи информации, пропускной способности и ϵ -энтропии (скорости передачи информации аналоговых сигналов как функции искажения), исследовались обобщения результатов К. Шеннона на двухсторонние каналы с обратной связью и каналы с неизвестными и переменными параметрами. Теория информации нашла применение в математической статистике, физике, психологии и лингвистике.

Ряд новых прикладных направлений в области теории телекоммуникаций также возник в результате развития идей Шеннона. Многие исследования в области теории информации были направлены на разработку теории кодирования сообщений. Это привело к созданию различных конструкций мощных помехоустойчивых кодов с достаточно простыми алгоритмами декодирования.

Идеи статистического кодирования сообщений также были существенно развиты и нашли применение в современных системах связи при создании методов сокращения избыточности звуковых, факсимильных и телевизионных (ТВ) сигналов, что позволило во много раз повысить эффективность использования каналов связи. В качестве примера достигаемой эффективности можно отметить, что современные, широко применяемые на практике методы устранения избыточности из сигнала телевизионного вещания позволяют в полосе одного аналогового ТВ-канала передавать до шести цифровых ТВ-программ с коммерческим качеством.

На основании выполненных за последние полвека исследований созданы рекомендации Международного союза электросвязи по применению методов кодирования источников и помехоустойчивого кодирования в современных системах цифровой связи.

В США в мае 1951 г. в Институте инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) создается Секция по проблемам теории информации. Для разработки этих же проблем в СССР в декабре 1961 г. был создан Институт проблем передачи информации. С 1950 г. регулярно в разных странах мира проводятся международные научные конференции по проблемам теории информации, в которых участвуют сотни ученых из многих стран мира. Начиная с 1955 г. в США и с 1961 г. в России начинают издаваться специализированные научные журналы: «IEEE Transaction on Information Theory» и «Проблемы передачи информации». Полный сборник научных трудов Шеннона на русском языке [2] был опубликован в СССР в 1963 г.

Шеннон был уникальной личностью. Академик А.Н. Колмогоров в предисловии к русскому переводу сборника трудов Шеннона дал ему такую оценку: *«Шеннон является исключительным примером соединения глубины математической мысли с широким и в то же время совершенно конкретным пониманием проблем техники. Его в равной степени можно считать одним из первых математиков и одним из первых инженеров XX века. Он создал основы теории информации и в значительной мере предопределил своими работами развитие общей теории дискретных автоматов».*

Коллега Шеннона по Белл-лаборатории Давид Слепян писал: *«Он всегда работал в полном уединении за закрытой дверью, но если вы входили, то он был очень терпелив и готов оказать вам любую помощь. Он мгновенно схватывал суть проблемы. Это был настоящий гений. Из тех, кого я знал, Шеннон — единственный человек, к которому я с полным основанием применил бы это слово».*

Жизнь великого человека всегда является определенным нравственным уроком для потомков. Немецкий философ Фридрих Ницше считал, что «...каждый серьезный труд оказывает на нас моральное воздействие. Усилие, делаемое нами для того, чтобы сосредоточить свое внимание на заданной теме, можно сравнить с камнем, брошенным в нашу внутреннюю жизнь: первый круг невелик по площади, число чередующихся кругов увеличивается, и сами они расширяются».

Уже говорилось, что с 1960 г. К. Шеннон перестал вести научные исследования, несмотря на настойчивые приглашения, не посещал научные конференции по проблемам, которые были им поставлены. Только в 1985 г. он решил посетить Международную конференцию по теории информации в Англии. По словам одного из участников этой конференции, для присутствующих это событие было воспринято учеными как такое же чудо, как если бы на конференции по физике вдруг неожиданно появился сам Ньютон.

Американский ученый Э.Р. Берлекамп считал, что отказы Шеннона от участия в научных конференциях связаны со страхом, что он не сможет оправдать ожиданий аудитории, считавшей его гением. А может быть, дело совсем не в этом, а в уникальном своеобразии личности Шеннона. Дело в том, что он был абсолютно лишен такого распространенного среди ученых человеческого качества, как тщеславие, желание собрать как можно больше наград за свои достижения. На Земле таких благородных и цельных личностей всегда было немного. К таким людям можно отнести одного из самых значительных философов XVII в. Бенедикта Спинозу, который, не желая утратить свою независимость, не принимал весьма лестные предложения влиятельных правителей занять престижные должности и всю жизнь зарабатывал себе на хлеб, полируя увеличительные стекла. Таким был и знаменитый российский поэт Борис Пастернак, который в одном из своих блестящих стихотворений сформулировал жизненное кредо таких людей:

*Быть знаменитым некрасиво,
Не это подымает ввысь.
Не надо заводить архива,
Над рукописями трястись.
Цель творчества — самоотдача,
А не шумиха, не успех.
Позорно, ничего не знача,
Быть притчей на устах у всех.
Но надо жить без самозванства,
Так жить, чтобы в конце концов
Привлечь к себе любовь пространства,
Услышать будущего зов.
И надо оставлять пробелы
В судьбе, а не среди бумаг,
Места и главы жизни целой
Отчеркивая на полях.*

Шеннон, осознавая в полной мере значение выдвинутых им идей для прогресса науки и особенно телекоммуникаций, никогда не стремился к почестям и оставался

всю свою жизнь, говоря словами знаменитого поэта Иосифа Бродского, «...человеком частным и частность эту всю жизнь какой-либо общественной роли предпочитающим». Шеннон говорил: «Мои интересы никогда не определялись тем, будут ли результаты исследований представлять коммерческий интерес или иметь какую-нибудь ценность для мира. Я очень много времени потратил на совершенно бесполезные вещи». Приводя это высказывание Шеннона, следует отметить, что на самом деле значение полученных им научных результатов для развития телекоммуникаций во всем мире колоссально.

Шеннон, ощущая, что он уже не сможет в своей научной работе получать столь же фундаментальные результаты, которые ему удалось получить прежде, по-видимому, решил отойти от активной научной работы и стал вести счастливую жизнь человека, отдавая все время своей семье и своим изобретательским интересам.

Литература

1. *Быховский М.А.* Круги памяти // Сер. изданий «История электросвязи и радиотехники». — М.: Мобильные коммуникации. 2001. Вып. 1.
2. *Шеннон К.* Труды по теории информации и кибернетике / Пер. с англ.; Под ред. Р.Л. Добрушина и О.Б. Лупанова. — М.: ИЛ. 1963.

Агнер Краруп

ЭРЛАНГ

Ничего великого никогда не было достигнуто без энтузиазма.

Ральф Уолдо Эмерсон

Введение

Дания — небольшая страна в центре Европы. О себе датчане, выражаясь словами одного из известнейших физиков XX в. Генриха Антона Лоренца, могут с гордостью сказать, что они принадлежат к нации, слишком маленькой для того, чтобы совершать большие глупости. Дания не входит в число так называемых великих держав. Несмотря на это, она очень многое дала мировой культуре и науке. Среди имен датчан, которых знает весь мир, знаменитый писатель Ханс Кристиан Андерсен (на его сказках учились добру и благородству миллионы детей всего мира), великие физики: Эрстед, открывший влияние электрического тока на магнитную стрелку, что сыграло ключевую роль в развитии теории электромагнетизма, Нильс Бор — гуманист, основоположник квантовой теории строения атомов и молекул и основатель Копенгагенской научной школы физиков, из стен которой вышли многие крупнейшие физики современности. Знаменитым и почитаемым во всех странах является и датский математик Агнер Краруп Эрланг — основоположник одного из важнейших разделов теории связи — теории телетрафика.

У датчан существует особое выражение для характеристики людей, которые отличаются утонченным умом, интеллигентностью и добротой. О них говорят, что эти люди высоки — до самого потолка. Безусловно, что к такой породе людей принадлежал и Эрланг, который, будучи человеком долга, в своей жизни всегда следовал девизу — служить, но не властвовать.

Имя Эрланга — основоположника теории телетрафика известно не только тысячам инженеров на всех континентах. Это имя хорошо знали многие выдающиеся математики XX в., такие как А.Н. Колмогоров, А.Я. Хинчин, Т. Фрай, В. Феллер и др., которые, познакомившись с его идеями, интенсивно разрабатывали открытое А.К. Эрлангом новое научное направление.

Теория телетрафика зародилась в связи с необходимостью проектирования автоматических телефонных станций (АТС), которые должны были обрабатывать поступающие от абонентов телефонной сети вызовы. Стоимость сети связи весьма внушительна и определяется числом линий, соединяющих между собой АТС, на-



ходящиеся в разных районах. Поэтому при проектировании АТС число этих линий должно быть выбрано минимально возможными, при этом должны быть обеспечены малые вероятность потери вызова абонента или длительность ожидания им соединения.

В работах Эрланга 1908–1918 гг. был заложен фундамент теории телетрафика и дана четкая математическая формулировка проблемы очередей, возникающих в сетях связи из-за того, что число телефонных каналов по причинам экономического характера всегда существенно меньше числа установленных телефонов. Эрланг преследовал практическую цель — дать методику расчета числа каналов, достаточного для обслуживания всех подключенных к сети телефонных аппаратов с малой вероятностью потери вызова.

Следует отметить, что именно с работ Эрланга началось проникновение в теорию связи широко используемых сегодня статистических методов исследования. Однако проблема, которой он коснулся, — проблема очередей оказалась более широкой, нежели проблема проектирования АТС.

Проблема очередей является одной из острейших в XX в. Экономические потери из-за возникновения очередей, огромны. Важная задача определения надежности работы различного рода устройств радиоэлектроники и связи также относится к этой проблеме, которая решается на основе теории массового обслуживания.

Таким образом, теория массового обслуживания, возникнув в связи с конкретной практической задачей, которая была исследована в работах А.К. Эрланга, приобрела чрезвычайно широкую сферу приложений, найдя применение во многих областях человеческой деятельности.

Неудивительно, что теорию, имеющую столь важное практическое значение, стали развивать многие ученые, в том числе известные математики. В создании теории участвовали американцы Т. Фрай, выпустивший в 1928 г. первую книгу по теории вероятностей, в которой одна из глав посвящена теории телетрафика, В. Феллер, Д. Кенделл и др. Значительный вклад внесли известные советские ученые, члены-корреспонденты АН СССР и УССР А.Я. Хинчин и Б.В. Гнеденко.

Биографический очерк

Агнер Краруп Эрланг родился 1 января 1878 г. в Логборгене на юге Дании. Его отец Ханс Нилсен Эрланг был учителем в сельской школе, а мать Магдалена Краруп происходила из именитой в Дании духовной семьи, и среди ее предков был известный датский математик Томас Финк. У Агнера были старший брат Фредерик и две младшие сестры, Мэри и Ингеборг. Все они учились в школе своего отца. В школьные годы одним из любимых предметов Агнера была астрономия и его любимым занятием было писать поэмы на астрономические темы.

Завершив начальное школьное образование, он в 14 лет стал готовиться к сдаче экзамена в Копенгагенский университет на звание сельского учителя. Получив специальное разрешение и успешно сдав экзамены, он в течение двух лет работал ассистентом учителя в школе своего отца. В течение этих лет он продолжал заниматься и изучал французский и латинский языки.

По желанию отца он начал готовиться к поступлению в Копенгагенский университет. Семья не имела достаточных средств, чтобы оплатить его учебу. Поэтому он воспользовался своим правом готовиться к вступительным экзаменам, получая бесплатно питание и жилье в колледже Копенгагенского университета. В университете Эрланг изучал математику и естественные науки. В 1901 г. он окончил университет, получив магистерскую степень учителя математики (как главный предмет), а также астрономии, физики и химии.

Затем в течение семи лет А.К. Эрланг преподавал в различных школах, и хотя его призванием была исследовательская работа, он оказался превосходным учителем. По натуре он не был общительным человеком, не любил быть в центре внимания и в компаниях предпочитал оставаться в тени. За это его друзья дали ему прозвище «частное лицо». Он во всем предпочитал краткость и не любил длинных речей.

Во время летних школьных каникул он много путешествовал: побывал во Франции, Швеции, Германии и Великобритании. В этих странах он посещал художественные галереи и библиотеки. Работая учителем, он продолжал упорно изучать математику и естественные науки. Эрланг был членом Датского математического общества.

На собраниях этого общества он познакомился с главным инженером Копенгагенской телефонной компании, который в 1908 г. пригласил Эрланга на работу. В начале своей работы в компании А.К. Эрланг не имел сотрудников и должен был сам выполнять все измерения статистики телефонных потоков. Его часто можно было видеть на улицах Копенгагена в сопровождении рабочего, несшего лестницу, которая использовалась для того, чтобы спуститься вниз в телефонные люки. Сначала Эрланг работал в этой компании как научный сотрудник, а позже стал руководителем лаборатории. В работе А.К. Эрланг сразу же начал применять теорию вероятностей к проблемам телефонного трафика. В 1909 г. он опубликовал свою первую научную статью «Теория вероятностей и телефонные разговоры», в которой было показано, что случайные телефонные вызовы распределены по закону Пуассона.

Научные статьи Эрланг публиковал регулярно. Его наиболее важная статья «Решение некоторых проблем теории вероятностей, важных для проектирования автоматических телефонных станций» вышла в 1917 г. В ней содержались формулы для определения вероятности потери вызова и среднего времени ожидания соединения, которые являются в теории телефонного трафика теперь общеизвестными. Эти формулы широко использовались во всем мире при проектировании автоматических телефонных станций.

Среди ученых интерес к научным работам Эрланга был очень большим. Известен случай, когда один из специалистов Белл-лаборатории в США специально выучил датский язык, для того чтобы читать статьи Эрланга в оригинале. Наиболее важные из этих статей были переведены на английский, французский и немецкий языки. Они написаны очень кратко и трудны для понимания. Положение усугублялось тем, что Эрланг часто опускал доказательства своих результатов, представлявших значительный практический интерес.

Все свое время и энергию А.К. Эрланг отдавал исследованиям. Он никогда не был женат и имел обыкновение работать далеко за полночь. В его обширной библиотеке было много книг по математике, астрономии и физике. Он также интересовался исто-

рией, философией и поэзией. Друзья считали его эрудированным человеком, знакомым со многими областями науки и культуры. Он щедро делился своими знаниями с окружающими его людьми и был очень добрым и благородным человеком. Часто он, не афишируя, помогал нуждающимся людям.

В Копенгагенской телефонной компании Эрланг проработал почти 20 лет. У него никогда не было времени заниматься своим здоровьем, но в январе 1929 г., когда у него началось воспаление брюшной полости, он был вынужден лечь в больницу. К сожалению, медицина уже не могла ему помочь.

Агнер Краруп Эрланг скончался 3 февраля 1929 г.

Интерес к его работам не прекратился и после его смерти. В 1943 г. по предложению известного шведского ученого в области теории массового обслуживания К. Пальма был объявлен конкурс на название единицы телефонной нагрузки. За большие заслуги в создании и развитии теории телетрафика имя Эрланга было увековечено в названии этой единицы. С 1944 г. этот термин использовался в Скандинавских странах, а в конце Второй мировой войны на собрании Международного союза электросвязи он был принят в качестве международного.

Научные работы Эрланга и теория телетрафика

В каждом человеческом начинании именно великие личности придают работе смысл, направление и цель. Как уже отмечалось, А.К. Эрланг был первым, кто приступил к исследованию проблем телефонных сетей и установил закономерности, которые применимы к многим проблемам, связанным с массовым обслуживанием.

Изучая работу автоматических телефонных станций, он установил, что если λ — среднее число вызовов, поступающих в единицу времени, то вероятность поступления n вызовов за время t определяется законом Пуассона $(\lambda t)^n \exp(-\lambda t)/n!$, где λt — математическое ожидание числа вызовов за время t . Это распределение было проверено на практике для периодов интенсивной нагрузки. Аналогично, если μ — средняя продолжительность разговора, то распределение вероятностей длительности телефонного разговора определяется выражением $\exp(-\mu t)$.

Эрланг изучал три вида обслуживания абонентов телефонной сети в системе коммутации N каналов, имеющих на АТС.

Первый вид обслуживания (полнодоступный пучок линий, система с потерями) обеспечивает доступ любого из абонентов (число абонентов намного превышает значение N) к любому из свободных в данный момент каналов связи. Если в момент поступившего вызова свободных каналов нет, то происходит потеря вызова.

Второй вид обслуживания (полнодоступный пучок линий, система с ожиданиями) также обеспечивает доступ любого из абонентов к любому из свободных в данный момент каналов связи. Если в момент поступившего вызова свободных каналов нет, то потери вызова не происходит, а абонент ставится в очередь, и через некоторое время устанавливается соединение, и ему предоставляется канал связи.

Третий вид обслуживания (неполнодоступный пучок линий, система с потерями) обеспечивает доступ любого из абонентов только к ограниченному числу $D < N$ имеющихся линий в том случае, если хотя бы одна из этих D линий свободна в момент поступления вызова. В противном случае вызов теряется.

Ключевой вклад А.К. Эрланга в современную теорию стохастических процессов состоит в идее стохастического равновесия, которое означает, что вероятность пребывания системы в определенном состоянии (в случае телетрафика — число занятых в пучке линий) не зависит от момента времени, в который рассматривается система.

Используя эти предпосылки, А.К. Эрланг развил теорию телетрафика для трех указанных выше видов обслуживания и получил формулы для вероятностей потери вызова и распределения времени ожидания при равновесном состоянии системы. Такие формулы он получил для системы с ожиданием при постоянном времени обслуживания в случае одного, двух и трех каналов, а также при произвольном числе каналов при экспоненциальном времени обслуживания.

Исследования Эрланга по теории телетрафика получили международное признание. В литературе установленные Эрлангом формулы для трех видов обслуживания называют в его честь 1-й, 2-й и 3-й формулами Эрланга. Эти формулы были официально рекомендованы Британским министерством связи для использования при проектировании АТС. Эрланг был принят в число членов Британского института инженеров-электриков.

Хотя модель Эрланга проста, математическое описание работы современных сложных телефонных сетей все еще основывается на этой модели.

Теория телетрафика является, с одной стороны, одним из разделов теории связи, а с другой — одним из крупных и интенсивно развивающихся разделов теории массового обслуживания. Ее развитие как раздела теории связи обусловлено быстрыми темпами развития сетей связи, что делает важной проблему повышения эффективности ее использования путем управления потоками сообщений, передаваемых по каналам сетей.

За рубежом ценный вклад в обобщение и развитие теории телетрафика внесли Г. О'Делл, К. Пальм, К. Якобеус, К. Ли и другие, которые изучали случаи конечного числа абонентов, подключенных к АТС, ограниченного времени подключения абонентов к каналу связи и разрабатывали методы расчета многозвенных коммутационных систем.

В СССР первые работы по теории телетрафика были выполнены академиком М.С. Юрьевым в 1925 г. В последующие годы важные научные исследования с привлечением метода статистического моделирования на ЭВМ для решения данных проблем были проведены учеными Г.П. Башариным, Б.С. Лившицем, А.Д. Харкевичем, М.А. Шнепсом и др.

В области связи сегодня результаты Эрланга широко используются не только для проектирования АТС, но и сотовых, транкинговых и спутниковых систем подвижной связи, а также систем фиксированной спутниковой связи VSAT.

Кроме теории телетрафика, Эрланга интересовали также проблемы вычисления таблиц математических функций. У него были обширные познания в истории математических таблиц с древних времен. Эрланг установил новые принципы вычисления некоторых форм математических таблиц, в частности таблиц логарифмов.

Заключение

Достижения Эрланга следует отнести к разряду крупнейших. Он открыл новый обширный научный материк, осваивать который начали сотни последователей. Развитие его работ привело к созданию теории массового обслуживания, давшей специалистам инструмент для решения огромного числа социальных проблем, связанных с обслуживанием людей, с поточным производством различной продукции, а также других прикладных задач.

Совсем недолгую жизнь — всего 51 год — прожил А.К. Эрланг. Однако человек оставляет после себя то, с чем связывается его имя.

Эта мысль весьма четко выражена в книге Милтона Стейнберга «Основы иудаизма»: *«Человек преодолевает смерть многими, иногда совершенно естественными способами. Он может быть бессмертен биологически, в своих детях; благодаря силе своей мысли, оставляя по себе память; благодаря силе своего влияния, когда его личность продолжает вести за собой последователей; его бессмертие может быть идеальным, если он полностью отождествляет себя с вечными ценностями духа...»*

А.К. Эрланг действительно обеспечил себе бессмертие. Никто из ученых, работающих в области массового обслуживания, не может избежать его влияния. На благоприятной почве, которая была подготовлена трудами Эрланга, были выполнены сотни новых научных исследований и решены тысячи важнейших для жизни людей практических задач.

Часть II

Очерки истории создания и развития статистической теории связи

Перед чем останавливаешься и замираешь в священном трепете и безмолвном уважении – так это перед миром мысли. Ибо мир мысли – это единственная реальность в том водовороте привидений и призраков, который зовется реальным миром.

Иво Андрич

Глава I. Развитие статистической радиотехники

§ 1. Предыстория

Предысторию статистической радиотехники следует отсчитывать от 1918 г., когда немецкий ученый В. Шоттки теоретически предсказал [1], что дробовый шум в электронных лампах, работающих в режиме насыщения, испытывает случайные флуктуации, имеющие спектральную плотность

$$S(f) = 2eI,$$

где I — средний ток, а e — заряд электрона.

Спустя десять лет американский ученый **Г. Найквист** теоретически установил и обосновал свою знаменитую формулу [2], определяющую спектральную плотность случайного напряжения на резисторе с сопротивлением R ,

$$S(f) = 4kTR(hf/kT)/(e^{hf/kT} - 1),$$

где f — частота, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана, T — температура сопротивления, $h = 6,62 \cdot 10^{-21}$ Дж·с — постоянная Планка. В том же году эта формула получила экспериментальное подтверждение в работе еще одного американца Дж. Джонсона.

К середине 30-х гг. ученые уже отчетливо понимали, что решение проблем теории передачи и приема сигналов невозможно без учета статистического характера многих процессов, связанных со случайными изменениями уровня принимаемого сигнала (его замираниями) и флуктуационными шумами.

Начало теоретических исследований эффективности приема, основанных на применении методов теории вероятностей, относится к 30-м гг. [3]. Первые работы в этом направлении были выполнены известными учеными — англичанином Т.Л. Экерслеем и советскими специалистами **В.И. Сифоровым**, **В.А. Котельниковым**, **Н.И. Шумской** и **А.Н. Шукиным**.

Однако только в годы Второй мировой войны в связи с бурными темпами развития радиолокационной техники, широко применявшейся в военных операциях, началось становление нового научного направления — статистической радиотехники. В те годы одной из важнейших проблем была проблема максимального увеличения чувствительности локационных приемников, работающих в условиях действия случайных шумов. Это должно было увеличить дальность действия радиолокаторов, что повышало эффективность их применения в боевых действиях. Острота этой проблемы стимулировала теоретические исследования, связанные с обработкой случайных сигналов в приемных устройствах, содержащих как линейные фильтры, так и нелинейные элементы, такие как детекторы, частотные дискриминаторы, ограничители и т.д. Для решения данной проблемы в США, России и Великобритании были привлечены крупные ученые и инженеры.

В США над этими проблемами в 40-х гг. работали такие выдающиеся ученые, как **Н. Винер**, Дж. Г. Ван Флек, **Д. Миддлтон**, **С.О. Райс**. В нашей стране подобные исследования в эти же годы выполнялись **В.И. Бунимовичем**, **Р.Л. Стратоновичем**, **В.И. Тихоновым**, **Б.Р. Левиным** и др.

Проблемы, которые относятся к статистической радиотехнике, связаны с созданием методов решения специфических вероятностных задач, возникающих при проектировании устройств обработки сигналов, принимаемых на фоне помех. Данная область привлекла внимание многих ученых всего мира и интенсивно развивалась на протяжении всего XX в.

Статистическая радиотехника базируется на математическом аппарате теории вероятностей и случайных процессов. В ней рассматриваются задачи, связанные с определением спектров мощности и распределением вероятностей случайных процессов на выходе линейных или нелинейных элементов различных трактов обработки случайных сигналов. Кроме того, исследуются статистические характеристики выбросов случайных процессов, и разрабатываются методы анализа нелинейных искажений разного рода случайных сигналов. Особый круг задач, связанных с проектированием различных следящих систем, приводит к сложным в математическом отношении задачам анализа срыва слежения.

Пользуясь разработанным математическим аппаратом, можно исследовать самые сложные алгоритмы обработки как аналоговых, так и цифровых сигналов и расчетным путем определять качество приема. Статистическая радиотехника дает мощное средство для проектирования современных систем.

Вальтер ШОТТКИ

Знаменитый немецкий ученый, один из основателей радиофизики, Вальтер Шоттки родился 23 июля 1886 г. в Цюрихе (Швейцария) однако всю свою сознательную жизнь провел в Германии. Его отец Фредерик Шоттки преподавал математику в университете Марбурга, а затем — в Берлине. В 1904 г. В. Шоттки поступил на физический факультет университета им. Гумбольдта в Берлине. В 1912 г. он защитил докторскую диссертацию, которая была посвящена развитию специальной теории относительности, открытой А. Эйнштейном в 1905 г. Научным руководителем В. Шоттки был выдающийся ученый Макс Планк — нобелевский лауреат по физике, заложивший основы квантовой физики. После получения докторской степени В. Шоттки переехал в Йену (Германия), где стал работать в лаборатории Йенского университета, возглавляемой известным немецким физиком Вином. Здесь он начал свои исследования взаимодействия электронов и ионов в вакууме и в твердом теле, которым он посвятил всю свою жизнь. В 1920—1923 гг. В. Шоттки читал лекции в Вюрцбургском университете, а в 1923—1927 гг. стал профессором Ростокского университета и вел научные исследования совместно с Вином, получившим в 1911 г. Нобелевскую премию по физике за открытие законов излучения энергии «черного тела».



Преподавательскую деятельность в 1916–1919 гг. и с 1927 г. Шоттки совмещал с работой в лабораториях фирмы «Сименс и Гальске» — одного из крупнейших производителей радиооборудования, где он работал постоянно до выхода на пенсию в 1958 г.

Исследования В. Шоттки относятся к физике твердого тела, вакуумной электронике, статистической физике, электронике и физике полупроводников. В 1913 г. в Йене В. Шоттки открыл основной закон, определяющий зависимость тока в электронной лампе от напряжения между анодом и катодом.

Он выполнил основополагающие исследования природы двух основных видов шумов (теплого и дробового), возникающих в электронных устройствах и ограничивающих возможности приема слабых электрических сигналов. Дробовый шум был открыт им в 1914 г., когда он учился в Берлине у знаменитого физика М. Планка. В. Шоттки установил, что такой шум возникает вследствие случайности скорости электронов, попадающих на анод вакуумных ламп. Им экспериментально и теоретически были определены закономерности дробового шума, что позволило конструировать такие радиолампы, в которых уровень этого шума был минимальный. В. Шоттки опубликовал полученные результаты в своей знаменитой статье в 1918 г., за десять лет до того, как подобные результаты независимо были получены американскими учеными — сотрудниками Белл-лаборатории Г. Найквистом и Дж. Б. Джонсоном.

В. Шоттки был не только выдающимся физиком, но и изобретателем. Его изобретения оказали существенное влияние на прогресс радиотехники и электроники. Работая в фирме «Сименс и Гальске», он изобрел в 1919 г. тетрод — первую в мире многосеточную радиолампу, позволяющую создавать стабильно работающие высокочастотные усилители с большим коэффициентом усиления. В 1918 г. независимо от известного американского инженера Е. Армстронга он изобрел супергетеродинный приемник, а в 1924 г. совместно с Эрвином Герлахом — ленточный микрофон и ленточный динамик.

В 1929 г. В. Шоттки приступил к исследованиям в области полупроводниковой электроники и добился значительных результатов. В своей книге «Термодинамика», изданной в 1929 г., он был одним из первых, кто отметил существование электронных «дырок» в валентной зоне полупроводников. В 1938 г. им была разработана теория, позволившая объяснить детекторный эффект контакта металл–полупроводник тем, что на поверхности между двумя контактами появляется барьерный слой. Созданные на основе этой теории элементы называют барьерным диодом Шоттки. Такие диоды нашли широкое применение при создании высокочастотных смесителей с низким коэффициентом шума и быстродействующих коммутирующих цепей.

Вальтер Шоттки скончался 4 марта 1976 г.

В память о выдающемся ученом Немецким обществом физиков учреждена премия имени В. Шоттки, которую присуждают за научные достижения в области физики твердого тела.

§ 2. Прохождение сигналов и шумов через линейные и нелинейные устройства

Первой фундаментальной работой, в которой были рассмотрены основные задачи статистической радиотехники, и она оформилась как самостоятельное научное направление, явились статьи американского ученого **С.О. Райса** [4], опубликованные в 1944 и 1945 гг. В этих статьях, получивших мировую известность

и стимулировавших многочисленными научными исследованиями в данном направлении учеными многих стран, последовательно изложена общая теория флуктуационных шумов.

В упомянутых статьях есть важный раздел, в котором приведены методы определения корреляционной функции $R(\tau)$ (и, следовательно, энергетического спектра мощности $S(\omega)$) процесса, действующего на выходе нелинейного безынерционного устройства, на вход которого поступает случайный процесс $V(t)$. В этом разделе рассмотрены конкретные примеры определения $R(\tau)$ для случаев, когда $V(t)$ представляет собой гармоническое колебание и гауссовский шум, а нелинейное устройство — детекторы с произвольной характеристикой детектирования (в том числе линейной и квадратичной). Для решения подобных задач **С.О. Райс** предложил эффективный метод характеристических функций, суть которого в том, что для определения $R(\tau)$ вначале находится преобразование Фурье от нелинейной характеристики устройства $F(\omega)$. Тогда, представляя нелинейную характеристику интегралом Фурье и зная характеристическую функцию $\Phi(\omega_1, \omega_2, \tau)$ процессов $V(t)$ и $V(t + \tau)$, можно определить $R(\tau)$ в виде двумерного интеграла, под знаком которого стоит функция $\Phi(\omega_1, \omega_2, \tau)F(\omega_1)F(\omega_2)$. Данный метод впоследствии широко применяли многие исследователи для решения разнообразных практических задач.

В середине 40-х гг. XX в. подобные задачи рассматривались и известным отечественным ученым **В.И. Бунимовичем**, который, как и С.О. Райс, является одним из тех, кто заложил основы статистической радиотехники. В 1951 г. В.И. Бунимович издал одну из первых в мире книг [5], в которой было дано систематическое изложение широкого круга вопросов в области статистической радиотехники.

Другой крупной фигурой в данной области является выдающийся американский ученый **Д. Миддлтон**, который также в середине 40-х гг. получил оригинальные научные результаты, а в начале 60-х — выпустил фундаментальную монографию [6], обобщающую все основные результаты, полученные им и другими учеными в этой области. Д. Миддлтоном были решены задачи по определению $R(\tau)$ и $S(\omega)$ для многих важнейших элементов передающих и приемных устройств (модуляторов, преобразователей частоты, детекторов и т.п.).

В 1949 и 1950 гг. Д. Миддлтон определил корреляционные функции и энергетические спектры мощности сигналов, модулированных по амплитуде, фазе или частоте случайными процессами. Кроме того, в это же время он разработал важную для практики энергетическую теорию детектирования ЧМ-сигналов, которая позволила, в частности, теоретически определить энергетический спектр мощности шума на выходе частотного дискриминатора и пороговый уровень сигнала. При снижении уровня принимаемого ЧМ-сигнала ниже порогового качество приема на выходе ЧМ-дискриминатора резко уменьшалось. Подобные результаты были независимо получены и другими учеными — Н.М. Блэкманом и Ф.Л. Стумперсом в 1948 г.

Следует отметить, что в частном случае, когда уровень принимаемого ЧМ-сигнала намного выше порогового, помехоустойчивость приема была исследована еще за десять лет до Миддлтона [3]. Соответствующие результаты были получены отечественными и американскими учеными: **В.И. Сифоровым** — в 1936 г., В.Б. Пестряковым — в 1938 г., М.К. Кросби — в 1937 г., Г. Родером — в 1937 г., Дж. Р. Карсоном и Т.К. Фраем — в 1937 г.

Значительное развитие статистическая радиотехника получила в фундаментальных работах П.И. Кузнецова, **Р.Л. Стратоновича** и **В.И. Тихонова** [7–9], опубликованных в 1954 и 1960 гг., где было предложено случайные процессы представлять в виде кумулянтных и квазимоментных функций. Такое представление на входе произвольного инерциального нелинейного устройства дает возможность определять статистические характеристики процесса на его выходе.

Предложенные идеи получили значительное развитие в работах отечественных и американских ученых: М.Л. Дашевского и Р.Ш. Липщера (1965 и 1967 гг.), А.Н. Малахова (1973–1978 гг.), Р. Кубо (1962 г.), Н.Г. Ван Кампена (1974 г.), Р.Ф. Фокса (1974 г.) и др. В книге А.Н. Малахова [10] приведены оригинальные результаты автора и других ученых в данном направлении. Методы кумулянтного анализа [10] позволяют определить преобразования кумулянтных и моментных функций случайных, в общем случае негауссовских процессов (в том числе и марковских) при произвольных инерциальных нелинейных преобразованиях. Определив кумулянты процесса на выходе нелинейного устройства, можно находить аппроксимации распределений вероятностей случайных процессов, действующих на их выходе, в виде ряда Эджворта.

§ 3. Методы анализа нелинейных искажений

Можно выделить два круга технических задач, в которых возникает необходимость исследования нелинейных искажений сигнала. Первый связан с проектированием устройств, в которые поступает модулированный полезным сообщением сигнал, представляющий собой случайный процесс $S(t)$. При этом сигнал на выходе может быть представлен в виде $W(t) = S(t) + \varepsilon(t)$, где $\varepsilon(t)$ — продукт искажения сигнала. Анализ нелинейных искажений сигналов в разных устройствах связан с определением корреляционной функции или спектра мощности процесса $\varepsilon(t)$.

К первому виду задач относятся многочисленные задачи анализа нелинейных искажений в системах связи с ЧМ. В этих системах искажения возникают при прохождении ЧМ-сигналов через линейные цепи передающих и приемных трактов, в дискриминаторах и т.д. Системы с ЧМ в XX в. были самым распространенным видом систем, таких как многоканальные радиорелейные и спутниковые системы связи, системы подвижной связи и звукового радиовещания. Анализ нелинейных искажений в таких системах посвящено очень много исследований.

К первому виду задач относятся и задачи анализа искажений, возникающих в узлах передающего тракта из-за амплитудно-фазовой конверсии, которая возникает во многих радиотехнических устройствах: в ограничителях, в преобразователях частоты и разного рода усилителях сигналов — усилителях на лампах бегущей волны, в передатчиках ВЧ и СВЧ и т.д. Такие искажения возникают, в частности, в бортовых ретрансляторах спутниковых систем связи и ограничивают полное использование мощности бортовых передатчиков, так как для уменьшения таких искажений приходится заметно снижать уровень усиливаемого в ретрансляторе сигнала и, следовательно, мощность сигнала, излучаемую со спутника.

Ко второму виду задач относятся задачи, связанные с проектированием радиоприемных устройств, принимающих полезный сигнал на фоне сильных помех от систем, работающих в соседних частотных каналах. Из-за нелинейности отдельных элементов

приемного тракта (усилительных каскадов, преобразователей частоты и др.) в приемнике возникают искажения принимаемого сигнала. Эти искажения связаны с эффектом блокирования (уменьшение коэффициента передачи приемного тракта для полезного сигнала из-за действия помехи), перекрестными искажениями (паразитной модуляцией полезного сигнала помехой), интермодуляцией (взаимодействия в нелинейном тракте двух или более помех, в результате чего появляются новые спектральные составляющие помехи, лежащие в полосе пропускания приемника) и т.п. Такие искажения приводят к снижению помехозащитности приемных устройств и уменьшают пропускную способность каналов связи.

Фундаментальные исследования искажений ЧМ-сигналов со случайной модуляцией [3] были выполнены С.В. Бородичем, В.А. Смирновым, Р.Г. Медхарстом и основоположником статистической радиотехники **С.О. Райсом**. Оригинальный метод анализа ЧМ-искажений, который с 1950 г. развивался С.В. Бородичем, изложен в его монографии [11].

Общий подход к описанию прохождения сигнала через элементы нелинейного тракта, в котором возникают искажения, состоит в том, что преобразования сигнала представляют некоторым нелинейным функционалом, который описывается в общем случае нелинейным интегродифференциальным уравнением. Такие преобразования называют иногда инерциальными нелинейностями или нелинейными преобразованиями с памятью. При сравнительно небольших уровнях сигнала функционал может быть представлен рядом Вольтерра — аналогом полиномиального ряда Тейлора. Ряды Вольтерра, названные так в честь известного итальянского математика конца XIX в., одного из создателей теории линейных интегральных уравнений, получили широкое применение при анализе нелинейных искажений в различных устройствах связи.

Первой публикацией, в которой были рассмотрены нелинейные преобразования случайных процессов общего вида, в том числе полиномиальные и представляемые рядом Вольтерра, явилась статья П.И. Кузнецова, **Р.Л. Стратоновича** и **В.И. Тихонова** [12] (1953 г.).

Следует отметить, что **Н. Винер** использовал эти ряды для описания поведения нелинейных устройств еще в 1942 г. [13], решая задачи, связанные с оборонной тематикой. Однако данный подход был опубликован им лишь в 1958 г. [14], где теория Винера применялась для решения ряда проблем, в том числе и проблемы определения спектра ЧМ-сигнала, модулированного случайным процессом.

Одним из первых, кто обратил внимание на то, что предложенный Винером метод исследования нелинейных преобразований случайных процессов носит весьма общий характер и пригоден для анализа широкого класса нелинейных систем, в том числе и систем с обратной связью, был американский ученый Р. Деч. В 1955 г. он выступил на конференции Американского института радиоинженеров (IRE) с докладом, где рассмотрел применение этого метода к анализу нескольких нелинейных устройств, в которых в цепях обратной связи установлены фильтры. Позднее эти результаты он включил в свою книгу [15], изданную в 1962 г.

В 1966 г. в журнале *Proceeding IEEE* (№ 4 и 10) появилась публикация румынского ученого А. Мирча [16, 17], применившего ряды Вольтерра для анализа нелинейных искажений, возникающих при прохождении ЧМ-сигналов через линейные цепи передающего и приемного трактов. Результаты А. Мирча, к сожалению, оказались незамеченными

специалистами, и в 1968 г. они были вновь независимо получены крупными американскими учеными Е. Бедросяном и **С.О. Райсом**, статья которых [18] приобрела широкую популярность и явилась отправной точкой многих исследований в данном направлении. Эти ученые провели еще ряд фундаментальных исследований, которые создали предпосылки для широкого использования аппарата рядов Вольтерра для решения многих задач связи. В 1971 г. они опубликовали статью [19] о подходе к определению спектра мощности процесса на выходе нелинейного инерциального устройства такого вида, когда на его входе действует сумма гауссовского сигнала и нескольких гармонических.

В 1973 г. М.А. Быховский в статье [20] предложил комбинированный метод анализа линейных и нелинейных искажений ЧМ-сигналов, объединяющий достоинства квазистационарного метода и метода, основанного на применении рядов Вольтерра. В работах [21, 22] описано, как с помощью рядов Вольтерра были исследованы линейные и нелинейные искажения, возникающие в различных системах обработки ЧМ-сигналов. Ряды Вольтерра применялись для анализа искажений сигнала в каналах связи с АМ-ФМ-преобразованием **Д. Миддлтоном** [23] и Е. Бедросяном [24]. Одной из первых работ, в которых эти ряды были применены для анализа нелинейных искажений сигналов в транзисторных усилителях, используемых в радиоприемных устройствах, стала статья американского ученого С. Нарайанана [25]. Это направление активно развивалось в последующие годы многими отечественными и зарубежными учеными. Данную проблематику не обошел своим вниманием и основоположник статистической радиотехники С.О. Райс, который одну из своих работ посвятил исследованию искажений сигналов в преобразователях частоты [26].

В начале 70-х гг. в Ромском научно-исследовательском центре ВВС США были исследованы нелинейные эффекты, возникающие в каскадах радиоприемных устройств из-за действия радиопомех. Результаты этих исследований в 1974 г. опубликованы в фундаментальной статье Дж. Буссганга, Л. Эрмана и Дж. Грейама [27]. В ней рассмотрены методы получения решений нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих поведение нелинейных узлов радиоприемных устройств, в виде рядов Вольтерра; правила нахождения таких рядов для систем, представляющих собой каскадное соединение нелинейных ступеней; вопросы построения канонических моделей нелинейных устройств, а также приведены результаты экспериментальных исследований конкретных приемных устройств, показавшие высокую эффективность применения рядов Вольтерра для анализа нелинейных эффектов, возникающих из-за воздействия радиопомех.

Значительное развитие в нашей стране получил метод нелинейных функционалов для анализа устройств радиосвязи в работах профессоров Б.М. Богдановича, А.А. Ланнэ и Л.В. Данилова, выполненных ими совместно со своими учениками и сотрудниками. Эти исследования начались в начале 70-х гг., и полученные результаты были опубликованы в 1974–1990 гг. в ряде монографий [28–31]. Были разработаны методы анализа нелинейных электрических цепей с использованием теории функционалов, предложены методы аппроксимации нелинейных функционалов при больших уровнях воздействующих сигналов.

Важным направлением в области исследований искажений сигналов в нелинейных системах является синтез таких систем, в которых эти искажения были бы минимальны. Пионерской работой в этом направлении была докторская диссертация **Г. Ван Триса** [32], которая была издана в Массачусетском технологическом институте (МТИ) в 1962 г.

Эти идеи получили дальнейшее развитие [28–31], и в начале 80-х гг. были разработаны методы синтеза трактов передачи сигналов с высокой линейностью, основанные на включении в них дополнительных линейных и нелинейных корректирующих цепей. Кроме того, был разработан пакет прикладных программ для анализа нелинейных электрических цепей. В США также вышел ряд книг, в которых излагались теория Вольтерра–Винера и ее применение к разнообразным задачам теории связи [33].

В настоящее время методы анализа нелинейных искажений сигналов в системах и устройствах разного назначения являются развитым разделом теории связи.

§ 4. Теория выбросов случайных процессов

Определение статистических характеристик выбросов случайных процессов (их пересечений с заданной кривой), таких как распределение числа выбросов за определенный промежуток времени, длительности между соседними пересечениями, распределение максимумов (минимумов) случайных процессов и т.п., необходимо для решения многих практических задач. В радиотехнике эти задачи часто связаны с анализом работы различного рода следящих устройств в условиях, когда уровень полезного сигнала соизмерим с уровнем воздействующих на такие устройства шумов. К ним относятся также задачи, связанные с определением распределения длительности замираний уровня полезного сигнала, которые всегда сопровождают прием сигналов, передаваемых по радиоканалу. Знание этого распределения необходимо для исследования помехоустойчивости приема сигналов в таких каналах.

Начало исследованиям выбросов случайных процессов было положено **С.О. Райсом**, опубликовавшим в 1939 г. статью о распределении максимумов случайного процесса. Другой важной ранней работой, посвященной этой теории, явилась работа американского математика М. Каца, опубликованная в 1943 г. В 1945 г. в знаменитой теоретической работе С.О. Райса [4] для нескольких видов случайных процессов были получены формулы для определения среднего числа выбросов и распределения максимумов, а также разработан приближенный метод определения плотности распределения вероятности для длительностей выбросов. В отечественной литературе первой публикацией в данном направлении стала работа **В.И. Бунимовича** и **М.А. Леонтовича** [34].

В своем научном творчестве Райс еще дважды обращался к этой тематике и получал важные научные результаты. В 1948 г. он рассмотрел статистические свойства случайного процесса, представляющего собой сумму гармонического колебания и случайного гауссовского шума. Этот процесс является, в частности, математической моделью замираний сигнала на линиях радиосвязи, и распределение длительности выбросов огибающей данного процесса дает распределение длительности замираний сигнала на таких линиях. В 1963 г. он разработал теорию, позволяющую определить среднее число импульсов, возникающих в течение одной секунды на выходе частотно-детектора, на входе которого действует ЧМ-сигнал. Результаты этой работы широко использовали многие специалисты при анализе пороговых характеристик приема ЧМ-сигналов.

В последующие годы выбросы случайных процессов рассматривались в ряде теоретических и экспериментальных работ. Теория выбросов случайных процессов получила развитие в работах крупных американских и отечественных ученых. В США важные исследования были выполнены А. Дж. Сигертом (1951 г.), К.В. Хелстромом (1968 г.), **Д. Слепяном** (1959 и 1962 гг.), Дж. Рейналом (1968 и 1987 гг.) и др. Значительный вклад в теорию выбросов случайных процессов внесли отечественные ученые П.И. Кузнецов, **Р.Л. Стратонович**, **В.И. Тихонов** [35] (1954 г.).

В одной из основополагающих книг Р.Л. Стратоновича [36] по статистической радиотехнике теории выбросов посвящена одна из глав. Он разработал ряд оригинальных методов определения среднего числа выбросов и распределения вероятности их длительности на основе теории процессов Маркова, теории сглаженных случайных процессов и теории коррелированных случайных точек.

Теория выбросов получила развитие в работах В.И. Тихонова и его учеников. В 1970 и 1987 гг. им были изданы две уникальные книги [37, 38], посвященные теории выбросов, которым в мировой литературе не было равных. В них обобщены все наиболее важные результаты теоретических и экспериментальных исследований в данной области, полученные многими учеными.

Эффективный метод решения задач теории выбросов случайных процессов, основанный на их временной дискретизации и названный авторами методом опорных импульсов, был предложен **Б.Р. Левиным** и его аспирантом А.Я. Фоминым. Этот метод изложен в первом томе монографии Б.Р. Левина [39].

§ 5. Методы анализа срыва слежения

Нелинейные следящие устройства широко используют на практике в различных системах связи, навигации и в других областях техники. Специфичным для таких устройств, которые во многих случаях представляют собой разновидности фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), является то, что они часто работают в условиях воздействия на них флуктуационных шумов. Эти шумы не только ухудшают точность работы следящего устройства, но и могут вызвать нарушение самого режима слежения, т.е. его срыв. При проектировании необходимо выбрать параметры устройств таким образом, чтобы они обеспечивали минимальные значения ошибки слежения и вероятности срыва слежения. Задачи, связанные с анализом работы подобного рода устройств, часто возникают на практике. Эти весьма сложные в математическом отношении задачи в течение последних десятилетий привлекали внимание многих крупных ученых.

Одной из первых основополагающих работ в этом направлении явилась опубликованная в 1933 г. статья Л.С. Понтрягина, А.А. Андропова и А.А. Витта [40], в которой впервые было предложено использовать математический аппарат марковской теории случайных процессов для определения статистических характеристик процессов, действующих на выходе динамической системы. Успеху такого подхода способствовали работы академика **А.Н. Колмогорова** [41], в которых был дан строгий вывод уравнений Фоккера—Планка. В 50-х гг. в США были разработаны методы анализа проблем срыва слежения на основе теории марковских случайных процессов [42].

Дальнейшее развитие таких методов в значительной степени связано с именами отечественных ученых **Р.Л. Стратоновича** [36], исследовавшего в 1958 г. синхронизацию автогенератора при наличии помех, и **В.И. Тихонова** [43], выполнившего в 1959 г. работу по статистической динамике ФАПЧ.

Первые исследования анализа срыва слежения в системах автоматического регулирования были выполнены в 1959 г. А.М. Васильевым [44] и И.А. Большаковым [45].

Важное значение в развитии статистической радиотехники, в том числе и данного направления, сыграла монография Р.Л. Стратоновича [36], в которой была систематически изложена теория марковских случайных процессов и даны примеры ее применения для решения ряда практических задач. В.И. Тихоновым и его учениками были выполнены обширные теоретические и экспериментальные работы по исследованию процессов срыва слежения в системах ФАПЧ с разными фильтрами в цепи обратной связи.

Позже исследования в этом направлении вели многие ученые. В нашей стране анализом статистических характеристик системы ФАПЧ занимались В.И. Тихонов (1956–1965 гг.), В.В. Шахгильдян, А.А. Ляховский [46] (1961–1972 гг.), Г.В. Обрезков и В.Д. Розевиг [47] (1972 г.) и др.; в США фундаментальные исследования проводили **Э.Д. Витерби** [48] (1963 г.), В.К. Линдсей [49] (1972 г.) и др.

Система ФАПЧ, как показывает теория оптимального приема аналоговых сигналов, является оптимальным демодулятором сигналов с частотной модуляцией. Этот вид модуляции широко применялся во второй половине XX столетия для передачи сигналов в радиорелейных, спутниковых и других системах связи. Частотная модуляция является нелинейным видом модуляции, и приему сигналов с ЧМ принципиально присущ порог — при уменьшении уровня принимаемого сигнала ниже порога качество приема полезного сообщения резко падает. Во многих случаях при проектировании таких систем необходимо обеспечить низкий пороговый уровень принимаемого сигнала. На основе методов исследования срыва слежения в системе ФАПЧ (см. [50]) были разработаны теоретические основы проектирования следящих демодуляторов ЧМ-сигналов, обладающих пониженным порогом.

§ 6. Монографии и учебники по статистической радиотехнике

Количество публикаций по статистической радиотехнике необозримо. С 1950 г. начинают издаваться монографии и учебники, в которых в систематизированном виде излагаются основные методы исследования и полученные результаты. Эти работы сыграли огромную роль в коренном изменении подхода к подготовке специалистов в области связи. Если ранее образование таких специалистов ограничивалось такими предметами, как приемная, передающая и антенная техника, линии дальней связи, теория электрических цепей, распространение радиоволн и т.п., то с середины XX в. существенное значение приобретает преподавание статистической радиотехники, основанной на теории вероятностей и случайных процессов.

Первая подобная монография [51] была издана в США в 1950 г. и содержала результаты, относящиеся к повышению чувствительности приемных устройств, работающих в присутствии гауссовского случайного шума.

В 1951 г. вышла фундаментальная монография **В.И. Бунимовича** [5], в которую были включены как его оригинальные результаты, так и результаты основоположника этой области **С.О. Райса**. В 1957 г. в СССР вышли еще две замечательные монографии по статистической радиотехнике **Б.Р. Левина** [52] и **В.С. Пугачева** [53], сыгравшие значительную роль в распространении идей в этой области и подготовке отечественных специалистов. В последующие годы выходили дополненные и переработанные издания этих книг.

В 1958 г. в США вышли две книги по статистической радиотехнике Дж. Бендата [54] и В.Б. Давенпорта, В.Л. Рута [55], которые вскоре были переведены на русский язык и также имели существенное значение в распространении знаний и в постановке образования в этой области.

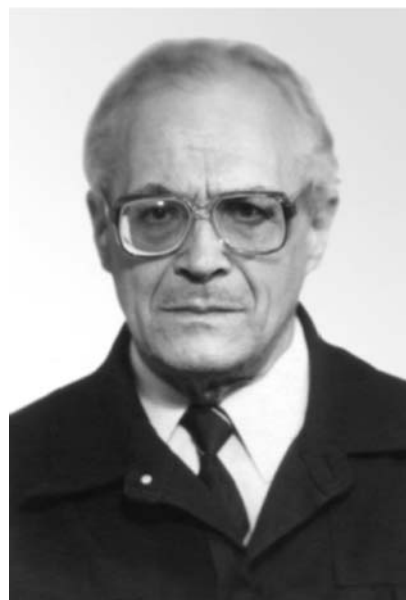
Важную роль в развитии статистической радиотехники играли фундаментальные работы **Д. Миддлтона** [6], в которых были отражены основные результаты статистической теории связи, полученные многими учеными, а также оригинальная монография профессора МГУ **Р.Л. Стратоновича** [36], содержащая новые методы решения ряда задач статистической радиотехники, получившие развитие в последующие годы.

Значительный вклад в подготовку методически совершенных учебников, охватывающих весь спектр вопросов статистической теории связи, внес отечественный ученый профессор Военно-воздушной инженерной академии (ВВИА) им. проф. Н.Е. Жуковского **В.И. Тихонов**. В области статистической радиотехники им были изданы две книги [56, 57] и задачник [58].

Все эти книги являются научным фундаментом, на котором построена система подготовки специалистов в области связи и других смежных областях науки и техники.

Владимир Семенович ПУГАЧЕВ

Владимир Семенович Пугачев родился 25 марта 1911 г. в Рязани. Он один из крупнейших отечественных специалистов в области теории управления, механики и прикладной математики. Важную роль в становлении статистической радиотехники сыграла монография В.С. Пугачева «Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления», вышедшая в 1957 г. и явившаяся одной из первых книг по статистической радиотехнике. В этой монографии были изложены методы решения ряда задач статистического анализа и синтеза линейных и нелинейных систем, впервые была представлена теория канонических разложений случайных функций и



даны практические методы их получения. Было показано, что каноническое разложение является мощным инструментом при исследовании различных стохастических систем и синтезе оптимальных систем обработки сигналов.

Теория канонических разложений была создана В.С. Пугачевым в конце 40-х гг. независимо от исследований французского и финского ученых М. Лозва и К. Карунена, которыми было доказано (соответственно в 1945 и 1946 гг.), что случайный процесс может быть разложен в ряд по функциям, которые определяются видом корреляционной функции этого процесса, а коэффициенты ряда являются некоррелированными случайными величинами. В научной литературе такое разложение часто называют рядом Карунена—Лозва. Теория канонических разложений, созданная М. Лозвом, К. Каруненом и В.С. Пугачевым, является важным разделом теории случайных функций.

Продолжая работы А.Н. Колмогорова, Н. Винера, Л.А. Заде, Дж. Р. Рагазини, В.С. Пугачев разработал общую теорию оптимизации линейных систем по критерию минимума среднего квадрата ошибки. Он был одним из первых ученых, исследовавших проблемы оптимизации многомерных линейных систем и линейных систем с распределенными параметрами. К концу 70-х гг. внимание В.С. Пугачева было сосредоточено на теории оптимальной фильтрации, и он предложил принципиально новый подход к синтезу оптимальных фильтров и решил задачу нелинейной фильтрации.

Монография «Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления» была переиздана в 1960 г. В нее дополнительно были включены некоторые новые результаты В.С. Пугачева по теории выбросов случайных процессов. В частности, были приведены формулы математического ожидания и дисперсии числа выбросов на данном интервале времени. В 1971 г. В.С. Пугачевым получена общая формула для моментов числа выбросов всех порядков.

Существенный вклад В.С. Пугачев внес в теорию марковских случайных процессов. В 1944 г. им впервые получено уравнение для одномерной характеристической функции случайного процесса, определяемого стохастическим дифференциальным уравнением, которое теперь называют уравнением Пугачева. В работах 80-х гг. В.С. Пугачев вывел уравнения для всех конечномерных характеристических функций случайного процесса, определяемого стохастическим дифференциальным уравнением, и дал решение этих уравнений.

В.С. Пугачевым совместно со своими учениками И.Е. Казаковым, Д.И. Гладковым, Л.Г. Евлановым, С.В. Мальчиковым, А.Ф. Мишаковым, В.Д. Седовым и В.И. Соколовым были написаны монографии под общим названием «Основы автоматического управления». В этих монографиях, изданных в 1963, 1968 и 1974 гг., даны основы теории оптимальных линейных и нелинейных систем.

В монографии «Стохастические дифференциальные системы» (1985 г.), написанной В.С. Пугачевым совместно с И.Н. Сеницыным, выведены основные формулы и уравнения теории оптимальной фильтрации. Подробно рассмотрены оптимальные линейные и субоптимальные нелинейные фильтры. Дано полное изложение разработанной им теории условно-оптимальной фильтрации, экстраполяции и оценивания параметров в стохастических дифференциальных системах.

В.С. Пугачев внес значительный вклад в статистическую теорию автоматических систем. Он автор фундаментальных работ в области прикладной математики, статистической динамики автоматических систем, авиационной науки и техники. Он был выдающим-

ся педагогом и создал в ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского ряд научных школ. Среди его непосредственных учеников свыше 30 профессоров и докторов наук, более 100 кандидатов наук.

В 1958 г. В.С. Пугачеву было присвоено звание заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, в 1966 г. он был избран членом-корреспондентом по отделению механики и процессов управления (автоматическое управление) АН СССР, а в 1981 г. — академиком по отделению механики и процессов управления (теория управления, вычислительная техника).

Его научные заслуги отмечены престижными премиями. Он лауреат двух Государственных премий (1948 и 1976 гг.). В 1990 г. он стал лауреатом Ленинской премии за работы по созданию статистической теории процессов управления.

Скончался Владимир Семенович Пугачев 25 марта 1998 г. в Москве.

§ 7. Хронология развития статистической радиотехники

1. Определение спектральной плотности дробового шума (1918 г. — В. Шоттки).
2. Открытие формулы, определяющей спектральную плотность мощности теплового шума на резисторе (1928 г. — Г. Найквист) и ее экспериментальное подтверждение (1928 г. — Дж. Джонсон).
3. Разработка метода анализа срыва слежения на основе математического аппарата марковской теории случайных процессов (1933 г. — Л.С. Понтрягин, А.А. Андронов и А.А. Витт).
4. Определение спектра мощности на выходе частотного дискриминатора для случая, когда уровень принимаемого сигнала выше порогового (1936 г. — В.И. Сифоров, 1937 г. — М.К. Кросби, Г. Родер, Дж. Р. Карсон и Т.К. Фрай, 1938 г. — В.Б. Пестряков).
5. Первые исследования статистических характеристик выбросов случайных процессов (1939 и 1945 гг. — С.О. Райс, 1943 г. — М. Кац, 1946 г. — В.И. Бунимович и М.А. Леонтович).
6. Разработка математического аппарата статистической радиотехники (1944—1945 гг. — С.О. Райс, В.И. Бунимович).
7. Определение порогового уровня при приеме ЧМ-сигнала (1948 г. — Н.М. Блэкман и Ф.Л. Стумперс).
8. Создание энергетической теории детектирования сигналов с разными видами модуляции (1950 г. — Д. Миддлтон).
9. Развитие теории выбросов случайных процессов (1951 г. — А. Дж. Сигерт, 1954 г. — П.И. Кузнецов, Р.Л. Стратонович и В.И. Тихонов, 1959 и 1962 гг. — Д. Слепьян, 1961 г. — Р.Л. Стратонович, 1968 г. — К.В. Хелстром, 1968 и 1987 гг. — Дж. Рейнал).
10. Метод анализа нелинейных преобразований случайных процессов, основанных на их представлении рядами Вольтерра (1953 г. — П.И. Кузнецов, Р.Л. Стратонович и В.И. Тихонов, 1958 г. — Н. Винер, 1955 г. — Р. Деч).
11. Разработка методов анализа искажений ЧМ-сигналов со случайной модуляцией в линейных цепях (фильтры, волноводы и т.п.) (1955 г. — С.О. Райс, 1956 г. — В.А. Смирнов, 1958 г. — Р.Г. Медхэрст, 1962 г. — С.В. Бородич).

12. Разработка метода определения статистических характеристик случайных процессов на выходе произвольного инерциального нелинейного устройства, исходя из их статистических характеристик случайного процесса (задаваемого кумулянтными и квазимоментными функциями), действующего на входе (1954 и 1960 гг. — П.И. Кузнецов, Р.Л. Стратонович и В.И. Тихонов).
13. Исследование проблем срыва слежения разных следящих устройств (в автогенераторах, синхронизируемых при воздействии помех: 1958 г. — Р.Л. Стратонович, в устройствах фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ): 1959 г. — В.И. Тихонов; в системах автоматического регулирования: 1959 г. — А.М. Васильев, И.А. Большаков).
14. Развитие методов исследования статистических характеристик системы ФАПЧ (1959—1965 гг. — В.И. Тихонов, 1961—1972 гг. — В.В. Шахгильдян, 1963 г. — Э.Д. Витерби, 1969 и 1972 гг. — Г.В. Обрезков и В.Д. Розевиг, В.К. Линдсей).
15. Развитие метода описания статистических характеристик случайных процессов, действующих на входе и выходе нелинейных устройств, с помощью кумулянтных и квазимоментных функций (1962 г. — Р. Кубо, 1965 и 1967 гг. — М.Л. Дашевский и Р.Ш. Липцер, 1973—1978 гг. — А.Н. Малахов, 1974 г. — Н.Г. Ван Кампен, Р.Ф. Фокс).
16. Развитие метода анализа нелинейных преобразований случайных процессов, основанных на их представлении рядами Вольтерра (1966 г. — А. Мирча, 1968 г. — Е. Бедросян и С.О. Райс, 1973 г. — М.А. Быховский, 1986 г. — Д. Миддлтон, 1988 г. — Е. Бедросян).
17. Разработка на основе методов анализа срыва слежения в системе ФАПЧ теоретических основ проектирования следящих демодуляторов ЧМ-сигналов с пониженным порогом (1970—1977 гг. — В.М. Дорофеев).

Литература к главе 1

1. *Schottky W.* Uber spontane Stromschwankungen in verschiedenen Elektizitatsleitern. Ann. Der Phys. 1918. V. 57. S. 541—567.
2. *Nyquist H.* Thermal agitation of electric charge in conductors // Phys. Rev. 1928. № 4.
3. *Быховский М.А.* Круги памяти // Сер. изданий «История электросвязи и радиотехники». — М.: Мобильные коммуникации. 2000. Вып. 1.
4. *Rice S.O.* Mathematical Analysis of Random Noise // BSTJ. July 1944. № 3; January 1945. № 1.
5. *Бунимович В.И.* Флуктуационные процессы в радиоприемных устройствах. — М.: Сов. радио, 1951.
6. *Middleton D.* An introduction to statistical communication theory. N.Y.: McGraw-Hill. 1960. Pt.1; 1961. Pt.2.
7. *Кузнецов П.И., Стратонович Р.Л., Тихонов В.И.* Квазимоментные функции в теории случайных процессов / Докл. АН СССР. 1954. № 4.
8. *Кузнецов П.И., Стратонович Р.Л., Тихонов В.И.* Корреляционные функции в теории броуновского движения. Обобщение уравнения Фоккера—Планка // ЖЭТФ. 1954. Т. 26. Вып. 2.
9. *Кузнецов П.И., Стратонович Р.Л., Тихонов В.И.* Квазимоментные функции в теории случайных процессов // Теория вероятностей и ее применение. 1960. № 1.
10. *Малахов А.Н.* Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований. — М.: Сов. радио, 1978.

11. *Бородич С.В.* Искажения и помехи в многоканальных системах радиосвязи с частотной модуляцией. — М.: Связь, 1976.
12. *Кузнецов П.И., Стратонович Р.Л., Тихонов В.И.* Прохождение случайных функций через нелинейные системы // Автоматика и телемеханика. 1953. № 2.
13. *Wiener N.* Response of nonlinear device to noise. MIT Radiation Lab. Rep. V-168. 4. 1942.
14. *Wiener N.* Nonlinear problems in random theory. N.Y.: MIT Press and Wiley. 1958.
15. *Deutsch R.* Nonlinear transformations of random processes. N.J.: Prentice-Hall. 1962.
16. *Mircea A.* Harmonic distortion and intermodulation noise in linear FM transmission systems. Rec. Electrotech. (Romania). 1967. V. 12. P. 2–13.
17. *Mircea A., Bedrosian E., Rice S.O.* Further comment on «Distortion and crosstalk of linearly filtered, angle — modulated signals» // Proc. IEEE (Lett.). 1969. № 5.
18. *Bedrosian E., Rice S.O.* Distortion and crosstalk of linearly filtered, angle — modulated signals // Proc. IEEE. 1968. № 1.
19. *Bedrosian E., Rice S.O.* The output properties of Volterra systems (nonlinear systems with memory) driven by harmonic and Gaussian inputs // Proc. IEEE. 1971. № 12.
20. *Быховский М.А.* Представление сигнала на выходе линейного фильтра при частотно-модулированном входном сигнале // Радиотехника и электроника. 1973. № 7.
21. *Быховский М.А.* Применение рядов Вольтерра для анализа нелинейных искажений в системах связи с частотной модуляцией // Труды НИИР. 1974. № 4.
22. *Быховский М.А.* Нелинейные искажения в следящих демодуляторах, обусловленные паразитной амплитудной модуляцией // Труды НИИР. 1976. № 1.
23. *Middleton D.* Effects of narrow-band filters on the output envelopes and phase of joint AM-FM inputs: An analysis extension of the Bedrosian-Rice formulation // IEEE Trans. COM-34. July 1986.
24. *Bedrosian E.* Amplitude demodulation of filtered AM/PM signals // IEEE Trans. on Inform. Theory. 1988. № 6.
25. *Narayanan S.* Transistors distortion analysis using Volterra series representation // BSTJ. May, June 1967.
26. *Rice S.O.* Volterra systems with more than one input port — distortion in a frequency converter // BSTJ. 1973. №8.
27. *Bussgang J.J., Erman L., Graham J.W.* Analysis of nonlinear systems with multiple inputs // Proc. IEEE. 1974. № 8.
28. *Богданович Б.М.* Нелинейные искажения в приемно-усилительных устройствах. — М.: Связь, 1980.
29. *Ланнэ А.А.* Нелинейные динамические системы: синтез, оптимизация, идентификация. — Л.: ВАС, 1985.
30. *Данилов Л.В.* Ряды Вольтерра—Пикара в теории нелинейных электрических цепей. — М.: Радио и связь, 1987.
31. Методы нелинейных функционалов в теории электрической связи / Под ред. Б.М. Богдановича. — М.: Радио и связь, 1990.
32. *Van Trees H. L.* Synthesis of optimum nonlinear control systems. Cambridge, Mass.: MIT Press. 1962.
33. *Schetzen M.* The Volterra and Wiener theories of nonlinear systems. N. Y.: Wiley. 1980.
34. *Бунимович В.И., Леонтович М.А.* О распределении числа больших отклонений при электрических флуктуациях / Докл. АН СССР. 1946. Т. 53. Вып. 1.
35. *Кузнецов П.И., Стратонович Р.Л., Тихонов В.И.* О длительности выбросов случайных процессов // ЖТФ. 1954. 24.
36. *Стратонович Р.Л.* Избранные вопросы теории флуктуаций в радиотехнике. — М.: Сов. радио, 1961.
37. *Тихонов В.И.* Выбросы случайных процессов. — М.: Наука, 1970.
38. *Тихонов В.И., Хименко В.И.* Выбросы траекторий случайных процессов. — М.: Наука, 1987.

39. *Левин Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике. — М.: Сов. радио, 1974.
40. *Понтрягин Л.С., Андронов А.А., Витт А.А.* О статистическом рассмотрении динамических систем // ЖЭСФ. 1933. Т. 3. Вып. 3.
41. *Колмогоров А.Н.* Об аналитических методах в теории вероятностей // Успехи математических наук. — 1938. — Вып. 5.
42. *Darling D.A., Siegert A.J.* Systematic approach to a class of problems in the theory of noise and other random phenomena // IRE Trans. 1957. V. IT-6. № 2. Pt. I.
43. *Тихонов В.И.* Влияние шумов на работу системы ФАПЧ // Автоматика и телемеханика. 1959. № 9.
44. *Васильев А.М.* Применение теории броуновского движения к исследованию помехоустойчивости импульсных радиотехнических следящих устройств / НДВШ // Радиотехника и электроника. 1959. № 1.
45. *Большаков И.А.* Анализ срыва слежения в системах автоматического регулирования под воздействием флуктуационных помех // Автоматика и телемеханика. — 1959. — № 12.
46. *Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А.* Системы фазовой автоподстройки частоты. — М.: Связь, 1966. 1-е изд.; 1972. 2-е изд.
47. *Обрезков Г.В., Розевиг В.Д.* Методы анализа срыва слежения. — М.: Сов. радио, 1972.
48. *Viterbi A.J.* Phase-lock loop dynamics in the presence of noise by Fokker — Planck techniques // Proc. IEEE. 1963. № 12.
49. *Lindsey W.C.* Synchronization systems in communication and control. — N. J.: Prentice-Hall. 1972.
50. *Кантор Л.Я., Дорофеев В.М.* Помехоустойчивость приема ЧМ-сигналов. — М.: Связь, 1977.
51. *Lawson I.L., Uhlenbeck G.E.* Threshold signals. — N.Y.: 1950.
52. *Левин Б.Р.* Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике. — М.: Сов. радио, 1957.
53. *Пугачев В.С.* Теория случайных функций и ее применение в задачах автоматического управления. — М.: Гостехиздат, 1957.
54. *Bendat J.S.* Principles and applications of random noise theory. — N.Y.: Wiley, 1958.
55. *Davenport W.B., Root W.L.* An introduction to the theory of random signals and noise. — N.Y.: McGraw-Hill. 1958.
56. *Тихонов В.И.* Статистическая радиотехника. — М.: Сов. радио, 1966 1-е изд.; 1982. 2-е изд.
57. *Тихонов В.И., Миронов М.А.* Марковские процессы. — М.: Сов. радио. 1977.
58. *Тихонов В.И.* Примеры и задачи по статистической радиотехнике. — М.: Сов. радио, 1970.

Глава 2. Теория оптимальной линейной фильтрации сигналов

Общие сведения

Фильтрация сигналов — фундаментальное понятие, связанное с представлениями об их спектре, т.е. разложении сигналов в ряд по тригонометрическим функциям. Такие разложения рассматривали великие математики прошлого И. Бернулли и Л. Эйлер. Ж. Фурье пользовался этими рядами для решения сложной задачи — интегрирования уравнения теплопроводности. Метод Фурье стал классическим приемом решения задач математической физики, и в его честь эти ряды назвали рядами Фурье. Долгое время ряды Фурье не связывались с какими-либо физическими представлениями. Даже после открытия электрических колебаний и волн многими учеными высказывались сомнения в адекватности разложений Фурье (спектров сигналов) происходящим физическим явлениям. Великий физик Г. Герц относился к спектральным представлениям отрицательно. Всемирно известный изобретатель вакуумного диода английский ученый А. Флеминг также не признавал существования спектра у сигналов и в 20-х гг. XX в. между учеными велась бурная дискуссия о реальности этого понятия. В этой дискуссии приняли активное участие крупные отечественные (Л.И. Мандельштам и С.М. Рытов) и зарубежные (Дж. Р. Карсон и др.) физики [1]. В результате спектральные представления утвердились в радиотехнике. С этого времени инженеры стали осознанно широко применять фильтры для разделения сигналов, передаваемых в разных частотных каналах.

Однако важность проблемы фильтрации сигналов для повышения чувствительности приемных устройств (что позволяет при наличии шумов принимать с высоким качеством сигналы, уровень которых на входе приемника минимален) была осознана только в начале 40-х гг., когда бурно стала развиваться теория, позволяющая синтезировать оптимальные фильтры и оценивать потенциальные возможности повышения чувствительности приемных устройств.

§ 1. Синтез согласованных фильтров

Одной из важнейших проблем является прием сигналов известной формы на фоне флуктуационных шумов. Она возникает в системах передачи дискретных сигналов, в системах радиолокации, радионавигации и т.п.

Повышение чувствительности приемников слабых сигналов стало особенно актуальным в период Второй мировой войны. В эти годы стали выпускать радиолокационную технику, работающую в метровом и дециметровом диапазонах частот. В этих диапазонах, в отличие от низкочастотных, в которых основным видом шумов являются атмосферные и промышленные помехи, имеющие импульсный характер, чувствительность приема ограничивается собственными флуктуационными шумами приемника.

Для повышения чувствительности радиолокаторов необходимо было в устройствах, обрабатывающих принимаемые импульсные сигналы, фильтры выбирать таким образом, чтобы на их выходе отношение пикового уровня сигнала к мощности шума имело максимально возможное значение. Синтез оптимальных фильтров приводит к вариационной задаче, в которой заданы спектр детерминированного полезного сигнала и энергетический спектр случайного шума, действующего на входе приемника, а частотная характеристика фильтра неизвестна. В такой постановке данная задача независимо рассматривалась в середине 40-х гг. американскими учеными Д.О. Нортон [2], а также **Д. Миддлтоном** и Дж. Г. Ван Флеком. Было показано, что тогда, когда случайный шум является белым, частотная характеристика оптимального фильтра является функцией, комплексно сопряженной спектру выделяемого импульса, а его переходная характеристика является функцией, инверсной во времени функции, описывающей выделяемый полезный сигнал. Такой фильтр стали называть согласованным. Данный результат имел важное практическое значение и был первым результатом по синтезу оптимальных фильтров, выделяющих полезный сигнал с минимальной погрешностью. Установлено, что при выделении сигнала, имеющего спектр $S(j\omega)$, принимаемого на фоне шумов с энергетическим спектром $S_n(j\omega)$, частотная характеристика согласованного фильтра определяется формулой:

$$K(j\omega) = c[S^*(j\omega) / S_n(j\omega)] \exp(-j\omega\tau),$$

где c — произвольная постоянная, а τ — момент времени, соответствующий наибольшему отношению пикового значения сигнала к мощности шума на выходе фильтра (ρ). При этом максимально возможное значение ρ следующее:

$$\rho = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [|S(j\omega)|^2 / S_n(j\omega)] d\omega.$$

Приведенные простые формулы относятся к числу ключевых соотношений в теории связи, которыми пользуются инженеры при конструировании систем связи и радиолокации.

Подобную же задачу рассмотрел в 1946 г. крупный отечественный ученый, член-корреспондент АН СССР **В.И. Сифоров** [3]. Его подход, который может быть назван параметрическим, носил более частный характер. Он рассматривал фильтры с определенной формой частотной характеристики, которые имели ряд параметров (полоса пропускания, крутизна спада частотной характеристики за пределами этой полосы и т.п.). Подбором этих параметров достигался максимум отношения сигнал/шум на выходе фильтров.

Данное направление теории согласованной фильтрации детерминированных сигналов развивалось и в последующие годы. В 1950 г. Б.М. Дворком [4] была выполнена обобщающая работа, касающаяся синтеза таких фильтров. Большое значение имела статья крупного американского ученого Дж. Л. Турина [5], в которой дан обширный аналитический обзор научных работ по согласованным фильтрам, опубликованных к 1960 г.

Важные исследования методов построения согласованных фильтров были выполнены в 1957–1966 гг. профессором Ю.С. Лезиным. В монографии [6] были систематически изложены свойства согласованных фильтров, предназначенных для обнаружения сигналов на фоне гауссовских шумов, исследованы методы их построения и

определена эффективность их применения. В частности, в ней рассмотрены вопросы построения гребенчатых фильтров, оптимальных для выделения из шумов последовательности импульсных сигналов, а также вопросы построения согласованных фильтров для импульсных широкополосных сигналов с большой базой и низким уровнем боковых лепестков в их корреляционной функции. К таким сигналам относятся, например, сигналы с линейной частотной модуляцией и радиосигналы, фаза которых манипулирована кодом Баркера.

Теория согласованных фильтров является важным разделом теории связи, так как такие фильтры — необходимые элементы оптимальных систем приема любых дискретных сигналов на фоне гауссовских шумов.

§ 2. Синтез оптимальных фильтров для выделения гауссовских случайных сигналов, принимаемых на фоне гауссовских шумов

Первую основополагающую работу по теории линейной фильтрации в дискретном времени опубликовал в 1939 г. академик **А.Н. Колмогоров** [7]. Следует отметить, что эта работа носила чисто математический характер.

Во время Второй мировой войны подобная же теория была независимо разработана крупным американским математиком **Н. Винером**. Он рассмотрел задачи линейной фильтрации сигналов, а также их экстраполяции и интерполяции для непрерывного времени и опубликовал свои результаты в книге [8], изданной в 1949 г., где указал на важность теории для специалистов в области радиотехники, решающих задачи, связанные с выделением сигналов на фоне шумов.

Основой теории Винера—Колмогорова была спектральная теория случайных процессов, развившаяся из фундаментальной работы **А.Я. Хинчина** [9], в которой было установлено, что корреляционная функция случайного процесса и его энергетический спектр мощности связаны преобразованием Фурье. Эта теория рассматривала оптимальный прием сигнала $s(t)$ на фоне гауссовского шума:

$$r(t) = s(t) + n(t),$$

где $s(t)$ и $n(t)$ — гауссовские случайные процессы с нулевым средним и известными корреляционными функциями $R_s(\tau)$ и $R_n(\tau)$. Сигнал $r(t)$ поступает на вход линейного фильтра с импульсной характеристикой $h(t)$. На выходе фильтра формируется сигнал

$$s^*(t) = \int_0^{\infty} h(\tau)r(t-\tau)d\tau.$$

Импульсная характеристика оптимального фильтра выбирается таким образом, чтобы сигнал $s^*(t)$ в минимальной степени (в смысле среднеквадратичной ошибки) отличался от $s(t + \tau)$. При $\tau = 0$ осуществляется оптимальная фильтрация (сглаживание), при $\tau > 0$ — его оптимальная экстраполяция (упреждающая фильтрация), при $\tau < 0$ — его оптимальная интерполяция (фильтрация с запаздыванием).

Согласно теории Винера—Колмогорова функция $h(t)$ определяется из интегрального уравнения Винера—Хопфа:

$$\int_0^{\infty} h(t)[R_s(\Delta-t) + R_n(\Delta-t)]dt = R_s(\Delta + \tau).$$

В общем случае произвольного значения τ определение $h(t)$ и ошибки оценки $s(t + \tau)$ являются сложными в математическом отношении задачами. Однако для случая, когда $\tau \ll 0$ (т.е. когда при оценке процесса $s(t)$ учитываются его значения как до, так и после момента времени t), задача существенно упрощается и частотная характеристика оптимального фильтра $K(j\omega)$ и ошибка фильтрации σ_0^2 определяются простыми формулами:

$$K(j\omega) = \frac{S(\omega) \exp(j\omega\tau)}{S(\omega) + S_n(\omega)};$$

$$\sigma_0^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{S(\omega)S_n(\omega)}{S(\omega) + S_n(\omega)} d\omega.$$

Теория, изложенная в книге Винера, была очень сложна для понимания инженерами, которые в те годы не имели для этого необходимой математической подготовки. Известные американские ученые Г.В. Боде и **К. Шеннон** в 1950 г., используя интуитивно понятные соображения, дали упрощенное изложение этой теории [10]. Они показали, что, применяя «обеляющий» минимально-фазовый фильтр (с импульсной характеристикой, равной нулю при отрицательных значениях t), модуль частотной характеристики которого равен $Y_1(j\omega) = [S(\omega) + S_n(\omega)]^{-1/2}$, процесс, действующий на входе приемника, превращается в «белый» шум — последовательность коротких независимых импульсов, имеющих равномерный спектр мощности. Вес, с которым должны учитываться отдельные составляющие этого спектра в сигнале, формируемом на выходе оптимального фильтра, равен $S(\omega)$. Если были бы известны значения функции $r(t)$ от $t = -\infty$ до $t = \infty$, то наилучшей операцией, примененной ко входу, была бы следующая:

$$Y_2(j\omega) = Y_1(j\omega) \cdot S(\omega).$$

Однако импульсная характеристика такого фильтра $h_2(t)$ физически нереализуема, так как содержит «хвосты», простирающиеся от $t = -\infty$ до $t = \infty$. Учитывая, что единственные имеющиеся у нас данные для предсказания значения $s(t + \tau)$ к моменту $\tau = 0$ — это импульсы, появившиеся в прошедшей истории процесса, то всем импульсам, которые появятся в будущем, следует приписать нулевой вес, а тем, которые уже появились на входе приемника, — вес $h_2(t)$. Таким образом, после «обеляющего» минимально-фазового фильтра должен быть включен фильтр с импульсной характеристикой

$$h_3(t) = \begin{cases} h_2(t + \tau) & \text{при } t \geq 0 \\ 0 & \text{при } t \leq 0 \end{cases}.$$

Функции $h_3(t)$ соответствует частотная характеристика $Y_3(j\omega)$. Поэтому частотная характеристика оптимального сглаживающего и предсказывающего фильтра $Y_{\text{опт}}(j\omega) = Y_1(j\omega) \cdot Y_3(j\omega)$.

В 1952 г. профессор А.М. Яглом — ученик А.Н. Колмогорова опубликовал обширную статью [11], в которой было впервые дано простое и в то же время математически строгое изложение теории экстраполяции и фильтрации стационарных случайных последовательностей и процессов.

Американские ученые Л. Заде и Дж. Рагазини [12] сделали существенное обобщение теории Винера на случай, когда сигнал помимо случайной содержит еще и регулярную составляющую, а время наблюдения ограничено.

Для решения практических задач, связанных с конструированием оптимальных систем связи и управления, большое значение имела формула, определяющая точность оценки процесса $s(t)$ для случая, когда шум $n(t)$ является «белым» и имеет спектральную плотность мощности N_0 :

$$\sigma_0^2 = \frac{N_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \log\left[1 + \frac{S(\omega)}{N_0/2}\right] d\omega.$$

Эта формула была установлена в 1955–1965 гг. разными методами американскими учеными М.К. Йовитсом и Дж. Л. Джексоном [13], К.В. Хелстромом [14], Э.Д. Витерби [15] и Д. Снайдером [16].

Теория оптимальной линейной фильтрации была обобщена на случай многомерных случайных процессов Н. Винером [17], Е. Вонгом и Дж. Томасом [18] и другими учеными. Эти результаты могут быть применены, в частности, к системам передачи телевидения со строчной разверткой, в которых имеется высокая корреляция между сигналами различных строк и кадров.

С 50-х гг. теорию Винера–Колмогорова начали излагать в доступном виде для инженеров, в монографиях и учебниках. Одними из первых книг, в которых она нашла отражение, были книги отечественного ученого В.В. Солодовникова [19] (1952 г.) и ученика Винера Ю.В. Ли [20] (1960 г.).

Позже во всех монографиях по статистической радиотехнике, написанных отечественными (Б.Р. Левин и В.И. Тихонов [21, 22]) и зарубежными (Д. Миддлтон, Э. Витерби, Г. Ван Трис [23–25] и др.) учеными, один из разделов был посвящен этой теории.

Совершенно другой подход к проблемам выделения сигнала на фоне шума, который применим и к проблемам оптимальной линейной фильтрации сигналов, был предложен Р.Л. Стратоновичем в 1959 г. [26]. Теория Р.Л. Стратоновича основывалась на представлении случайных процессов, моделирующих как полезный сигнал, так и шум с помощью дифференциальных уравнений (уравнений состояния). Независимо от Р.Л. Стратоновича законченные результаты оптимальной линейной фильтрации как в дискретном, так и в непрерывном времени получили в 1961 г. американские ученые Р.Е. Калман и Р.С. Бьюси [27, 28].

Для гауссовских и марковских случайных процессов Р.Л. Стратоновичем, Р.Е. Калманом и Р.С. Бьюси были выведены дифференциальные уравнения, определяющие структуру оптимального фильтра, на вход которого поступает принимаемый сигнал, и матричное уравнение Риккати, определяющее точность его оценки. Наличие дифференциальных уравнений оценки вместо интегрального представляет определенные практические преимущества, так как дифференциальные уравнения решаются намного легче с помощью аналоговой или цифровой техники, чем интегральное уравнение.

В 70-х гг. появляются монографии, в которых излагается новая теория оптимальной линейной фильтрации, и она применяется к решению ряда технических проблем.

Теория оптимальной линейной фильтрации сигналов применима к широкому классу задач, возникающих при конструировании систем связи и управления. Ее значение для теории связи и в том, что она позволяет в ряде случаев установить предельную точность σ_0^2 оценки полезного сообщения, передаваемого по каналу связи. В реальных системах стремятся применить достаточно простые фильтры, параметры которых выбирают так, чтобы в данной системе точность σ_1^2 оценки полезного сообщения была максимальной. Рациональность применения выбранного фильтра с заданными параметрами можно оценить, сравнивая σ_0^2 и σ_1^2 . Если эти величины отличаются незначительно, то выбор фильтра следует считать удачным. Кроме того, важно и то, что более общая теория нелинейной фильтрации, связанная с созданием оптимальных демодуляторов сигналов с фазовой, частотной и другими видами нелинейной модуляции, также приводит к необходимости синтеза оптимальных линейных фильтров, входящих в состав этих демодуляторов.

§ 3. Хронология развития теории оптимальной линейной фильтрации сигналов

1. Создание теории оптимальной линейной фильтрации, экстраполяции и интерполяции гауссовских случайных сигналов, принимаемых на фоне гауссовского шума (1939 г. — А.Н. Колмогоров, 1949 г. — Н. Винер).
2. Синтез оптимальных фильтров, согласованных со спектром детерминированного полезного сигнала, принимаемого на фоне случайного шума с известным спектром мощности (1943 г. — Д.О. Норт, Д. Миддлтон и Дж. Г. Ван Флек, 1946 г. — В.И. Сифоров).
3. Развитие теории согласованной фильтрации детерминированных сигналов (1950 г. — Б.М. Дворк).
4. Развитие теории оптимальной линейной фильтрации Колмогорова–Винера (1952 г. — А.М. Яглом).
5. Обобщение теории Колмогорова–Винера в случае, когда сигнал помимо случайной содержит еще и регулярную составляющую, а время наблюдения ограничено (1952 г. — Л. Заде и Ж. Рагазини).
6. Вывод формулы, определяющей точность оценки сигнала для случая, когда шум является «белым» (1955 — 1965 гг. — М.К. Иовитс и Дж. Л. Джексон, К.В. Хелстром, Э.Д. Витерби, Д. Снайдер).
7. Разработка методов построения согласованных фильтров, в том числе гребенчатых фильтров, предназначенных для выделения на фоне шумов пачек радиолокационных импульсов (1957–1966 гг. — Ю.С. Лезин).
8. Обобщение теории оптимальной линейной фильтрации для случая выделения на фоне шумов многомерных случайных процессов (1958 г. — Н. Винер, 1961 г. — Е. Вонг и Дж. Томас).
9. Создание марковской теории оптимальной линейной фильтрации (1959 г. — Р.Л. Стратонович, 1961 г. — Р.Е. Калман и Р.С. Бьюси).

Литература к главе 2

1. Функ Л.М. Сигналы, помехи, ошибки... — М.: Связь, 1978.
2. North D.O. Analysis factors which determine signal-noise discrimination in pulsed carrier systems. RCA Tech. Rep. PTR-6C. June 1943 (Proc. IEEE. 1963. № 7).
3. Сифоров В.И. О влиянии помех на прием импульсных сигналов // Радиотехника. 1946. № 1.
4. Dwork B.M. Detection of pulse superimposed on fluctuation noise // Proc. IRE. 1950. P. 771.
5. Turin G.L. An introduction to marched filters // IRE Trans. on Information Theory. 1960. № 3.
6. Лезин Ю.С. Оптимальные фильтры и накопители импульсных сигналов. — М.: Сов. радио. 1969.
7. Колмогоров А.Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей // Изв. АН СССР. Сер. математическая. 1941. № 5.
8. Wiener N. The extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series. N.Y.: Wiley. 1949.
9. Хинчин А.Я. Теория корреляции стационарных стохастических процессов // Успехи мат. наук. 1938. Вып. 5.
10. Bode H.W., Shannon C.E. A simplified derivation of linear least-square smoothing and prediction theory // Proc. IRE. 1950. № 4.
11. Яглом А.М. Введение в теорию стационарных случайных функций // Успехи мат. наук. 1952. Т. 7. Вып. 5.
12. Zadeh L.A., Ragazzini J.R. Optimum filters for the detection of signals in noise // IRE Trans. 1952. V. IT-1. № 4.
13. Yovits M.C., Jackson J.L. Linear filter optimization with game theory consideration // IRE Nat. Conv. Record. March 1955.
14. Helstrom C.W. Topics in the transmission of continuous information. Westinghouse Res. Labs. Repr. 64-8C3-522-R1. August 1964.
15. Viterbi A.J. On the minimum mean square error resulting from linear filtering of stationary signals in white noise // IEEE Trans. on Information Theory. 1965. № 3.
16. Snyder D.L. Some useful expression for optimum filtering in white noise // Proc. IEEE. 1965. № 6.
17. Wiener N., Massani P. The prediction theory of multivariable stochastic processes. Acta Math. June 1958.
18. Wong E., Thomas J.B. On the multidimensional filtering and prediction problem and the factorization of spectral matrices // J. Franklin Inst. 1961. V. 8. P. 87–99.
19. Солодовников В.В. Введение в статистическую динамику систем автоматического регулирования. — М.; Л.: Гостехиздат, 1952.
20. Lee Y.W. Statistical theory of communication. N.Y.: Wiley. 1960.
21. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. — М.: Сов. радио, 1968. Т. 2.
22. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. — М.: Радио и связь, 1983.
23. Middleton D. An introduction to statistical communication theory. N.Y.: McGraw-Hill. 1961. Pt. 2.
24. Viterbi A.J. Principles of coherent communication. N. Y.: McGraw-Hill. 1966.
25. Van Trees H.L. Detection, Estimation and Modulation Theory. N. Y.: Wiley. 1971. Pt. 1.
26. Стратонович Р.Л. К теории оптимальной нелинейной фильтрации случайных функций // Теория вероятностей и ее применение. 1959, Т. 4, № 2.
27. Kalman R.E. New methods and results in linear prediction and filtering theory. Baltimore: RIAS Tech. Rep. 1961. P. 1–61.
28. Kalman R.E., Bucy R. New results in linear filtering and prediction theory // ASME J. Basis Eng. March 1961. V. 83.

Глава 3. Очерк истории создания и развития теории потенциальной помехоустойчивости

§ 1. Создание теории потенциальной помехоустойчивости

В первой части книги помещено эссе о жизни и научной деятельности выдающегося отечественного ученого академика **В.А. Котельникова**, который создал теорию потенциальной помехоустойчивости. В нем освещены история создания и основные положения этой теории. Докторская диссертация В.А. Котельникова «Теория потенциальной помехоустойчивости» была представлена ученому совету Московского энергетического института в конце 1946 г., а в январе 1947 г. — успешно защищена.

Ценность работы в том, что она давала инженерам инструмент, с помощью которого можно было синтезировать устройства приема сигналов, оптимальные для заданных условий.

К сожалению, теория Котельникова долгое время (до ее опубликования в 1956 г. в виде отдельной книги [1]) не пользовалась широкой известностью даже на родине. Мировая научная общественность также ничего не знала о ней до 1959 г., когда она была переведена [2] на английский язык. Поэтому многие ее положения через несколько лет были независимо открыты зарубежными учеными.

В те годы была актуальна проблема повышения чувствительности радиолокационных приемников, так как это приводило к увеличению дальности действия радиолокационных систем. В США и в Англии над такими вопросами работали большие коллективы ученых. Одним из первых, кто обратил внимание на то, что математическим фундаментом, на котором может быть построена теория оптимального приема сигналов на фоне шумов, является математическая теория статистических решений, был американский ученый А. Зигерт. В книге «Пороговые сигналы» [3], изданной в 1950 г., им был написан раздел, в котором эта теория применялась к задачам оптимальной обработки сигналов, принимаемых на фоне шумов.

В 1950–1952 гг. были выполнены весьма важные и интересные работы Ф. Вудворта и И. Дейвиса [4, 5], посвященные проблемам оптимального приема радиолокационных сигналов. Эти работы были переведены на русский язык и оказали заметное стимулирующее влияние на развитие в России интенсивных исследований в данном направлении.

Особую роль в развитии теории оптимального приема сигналов сыграли многочисленные и глубокие работы выдающегося американского ученого **Давида Миддлтона**. В 1953 г. им была опубликована одна из первых работ [6], в которой на основе статистической теории проверки гипотез была разработана теория обнаружения сигналов. В другой важной работе Д. Миддлтона и Д. Ван Метера [7], опубликованной в 1955 и 1956 гг., было показано применение строгих математических методов как для решения задач обнаружения сигналов, так и для оценки их параметров.

Созданная Д. Миддлтоном теория позволяла решать задачи обнаружения сигналов и оценки их параметров в более общей постановке, нежели теория Котельникова.

Д. Миддлтон, в частности, показал, что большинство ранее известных критериев оптимального приема сигналов: критерий идеального наблюдателя Котельникова, критерий Неймана—Пирсона, обеспечивающий минимальную вероятность ошибочного приема сигналов при заданной вероятности ложной тревоги — решения о наличии сигнала, когда на самом деле на входе приемника действует только шум (этот критерий применим к задачам радиолокации), и критерий минимальной среднеквадратичной ошибки при оценке параметров сигнала — можно рассматривать как частные случаи введенного А. Вальдом критерия Байеса, обеспечивающего минимальное значение среднего риска при принятии решения.

Нахождение правила решения, удовлетворяющего одному из названных критериев, равносильно синтезу оптимального алгоритма приема сигналов, который задает структурную схему оптимального приемника. Теория Миддлтона позволяла решать задачи обнаружения и оценки параметров сигналов не только при гауссовском, но и при произвольном законе распределения шума, действующего на входе приемника.

Основопологающие работы Д. Миддлтона, развивающие идеи теории обнаружения сигналов, были переведены на русский язык. Они, как и работы Ф. Вудворта, оказали существенное влияние на быстрое распространение среди специалистов идей синтеза оптимальных устройств обработки сигналов в присутствии шумов и определения их потенциальной помехоустойчивости.

В книге Д. Миддлтона «Введение в статистическую теорию связи» [8] систематически изложены важнейшие результаты в области теории связи. Заслуженой Д. Миддлтону является также применение и развитие в теории радиоприема математического метода последовательного анализа, предложенного Вальдом. Этот метод позволяет синтезировать оптимальные приемники в системах с обратной связью, когда по обратному каналу на передаче становится известно о надежном обнаружении принятого сигнала и передатчик начинает передачу следующего сигнала.

Арнольд ЗИГЕРТ

Арнольд Зигерт родился в 1911 г. в Германии. В 1934 г. получил докторскую степень в Лейпцигском университете. В качестве преподавателя и исследователя в области физики работал в 1934—1942 гг. в университетах Голландии и США. Во время Второй мировой войны принимал активное участие в оборонных исследованиях в Массачусетском технологическом институте. После войны работал в Принстонском институте перспективных исследований, сотрудниками которого были такие знаменитые ученые, как физик А. Эйнштейн, математик Вейль и др.



Он член Американских физического и геофизического обществ и Института математической статистики.

В 1950 г. он впервые дал формулировку задачи оптимального приема сигналов как задачи математической теории статистической проверки гипотез. В 1947—1958 гг. им были выполнены фундаментальные исследования весьма сложных вопросов, связанных с преобразованием случайных процессов в нелинейных устройствах.

ФИЛИПП ВУДВОРТ

Филипп Вудворт — английский математик. Закончил Оксфордский университет в 1941 г. Работал в области распространения радиоволн, теории антенн, автоматического программирования и компьютерной техники. Вместе с другим английским ученым И. Дейвисом в 1950 г. дал трактовку задачи обнаружения радиолокационных сигналов как задачи проверки гипотез в математической теории статистики. Он автор знаменитой книги «Теория вероятностей и теория информации с применениями в радиолокации», изданной в 1953 г. и сыгравшей значительную роль в развитии статистической теории оптимального приема сигналов.



§ 2. Развитие теории потенциальной помехоустойчивости приема дискретных сигналов

Введение

В данном параграфе излагается история развития теории потенциальной помехоустойчивости приема дискретных сигналов в каналах без замираний. Наиболее простым видом сигналов, приему которых уделялось наибольшее внимание первые годы после создания теории потенциальной помехоустойчивости, являются двухпозиционные сигналы. Несколько позже появились исследования помехоустойчивости приема M -позиционных сигналов, начало которым было положено работой **В.А. Котельникова**.

В диссертации В.А. Котельникова рассматривались задачи приема сигналов в канале с постоянными и точно известными параметрами. Котельников исследовал системы приема сигналов, в которых применяется синхронное детектирование. В последующие годы значительное внимание многих исследователей было привлечено к проблемам приема двух- и M -позиционных сигналов в каналах, в которых фаза принимаемого сигнала случайна и распределена в интервале 2π по определенному закону.

2.1. Прием двухпозиционных сигналов в каналах с постоянными параметрами и неопределенной фазой

Синхронный прием возможен лишь в том случае, когда система синхронизации точно отслеживает все изменения фазы принимаемого сигнала. На практике любой системе фазовой автоподстройки частоты свойственны флуктуации и скачки фазы формируемого на ее выходе опорного сигнала.

До середины 50-х гг. проблема реализации синхронного приема сигналов оставалась нерешенной. Для передачи дискретных сообщений на практике применялись сигналы с амплитудной и частотной манипуляциями (АМн и ЧМн), прием которых осуществлялся путем детектирования. И первое время исследования в области теории приема дискретных сообщений были направлены на определение оптимальных алгоритмов некогерентного приема этих сигналов и получение формул, позволяющих рассчитать вероятность их ошибочного приема.

Первой работой с результатами исследований приема сигналов в канале с неопределенной фазой явилась фундаментальная статья американских ученых У. Петерсона, Т. Бирдзолла и У. Фокса [1], в которой были получены структурные схемы оптимальных приемников и дана оценка помехоустойчивости некогерентного приема сигналов.

Отметим, что **В.А. Котельников**, переключившийся после создания своей теории в 1947 г. на другие научные проблемы и переставший работать в открытой им новой области, опубликовал в 1959 г. работу [2], в которой рассмотрел специфическую задачу некогерентного приема широкополосных сигналов и сопоставил помехоустойчивость когерентного и некогерентного приема таких сигналов.

Всестороннее исследование приема сигналов в канале связи с неопределенной фазой сигналов выполнил в середине 50-х гг. выдающийся российский ученый **Л.М. Финк**. Он нашел структуру оптимальных демодуляторов и получил формулы, определяющие их помехоустойчивость. Результаты этих исследований вошли в его монографию, получившую в нашей стране широкую известность (ее 1-е издание было опубликовано в 1963 г., а 2-е [3] — в 1970 г.).

Л.М. Финк рассмотрел не только вопросы некогерентного приема в оптимальных по Котельникову приемных устройствах, но и в других устройствах, применяемых на практике. Им, в частности, были исследованы вопросы помехоустойчивости приема сигналов с ЧМн с использованием частотного дискриминатора. Подобные исследования были выполнены также американскими учеными В. Беннетом и Дж. Зальтцем [4].

Возможность повышения помехоустойчивости приема сигналов за счет применения синхронного детектирования была осознана инженерами еще задолго до появления теории Котельникова.

В течение многих лет, начиная с 30-х гг. XX в., ученые и инженеры пытались реализовать принципы когерентного приема сигналов с фазовой манипуляцией (ФМн). В книге **Н.Т. Петровича** [5], посвященной проблемам передачи дискретной информации в каналах с ФМн, указано, что первые идеи по применению этих принципов встречаются в патентах начиная с 1917 г. В 1928 г. выдающимся американским ученым **Г. Найквистом** была опубликована первая теоретическая статья [6], посвященная вопросам фазовой селекции сигналов. Первую практическую схему синхронного приема осуществил в 1932 г. французский инженер О. Бельсиз [7].

Важные изобретения и исследования в области синхронного приема дискретных сигналов были сделаны советскими учеными А.А. Пистолькорсом, **В.И. Сифоровым**, Е.Г. Мамоном и **Д.В. Агеевым** в 1933–1935 гг. Однако реализовать синхронный прием сигналов с ФМн не удавалось, так как не были найдены способы устранения «обратной работы» при формировании опорного сигнала, необходимого для реализации когерентного детектирования.

Изобретение профессора **Н.Т. Петровича** в 1954 г. сделало возможным применение идей синхронного приема на практике [5]. Суть изобретения в том, что текущая цифровая информация о передаваемом сигнале изменяла фазу несущей частоты на противоположную по отношению к тому значению, которое она имела при передаче сигнала в предыдущий момент времени. Такой метод передачи позволял использовать колебание предшествующей посылки в качестве опорного для синхронного детектирования сигнала, принимаемого в данный момент. В литературе он получил название «относительно-фазовой манипуляции» (ОФМ).

Российский ученый из Ленинградского электротехнического института связи Ю.Б. Окунев в 1966 г. обобщил [8] относительный метод передачи дискретных сигналов для условий, когда после прохождения канала связи не только фаза, но и частота принимаемого сигнала становятся нестабильными. Такие условия возникают, например, когда сигналы передают с движущегося с большой скоростью объекта (с борта самолета или спутника) и возникает эффект Доплера. Им же была исследована помехоустойчивость приема таких сигналов.

В течение почти десяти лет многие ученые вели исследования помехоустойчивости приема сигналов с ОФМ. Были рассмотрены разные алгоритмы приема этих сигналов и получены формулы, определяющие вероятность ошибочного приема, изучено группирование ошибок, свойственное этому методу передачи сигналов, рассмотрены вопросы реализации устройств их приема. Исследовалась также двойная фазово-разностная модуляция (ДОФМ) — метод передачи, при котором фаза передаваемого сигнала от посылки к посылке изменяется на 45° .

Многие важные результаты, относящиеся к приему сигналов ОФМ и ДОФМ, были получены **Л.М. Финком** [3], **Н.П. Хворостенко** [9] и К. Каном [10]. Эти ученые исследовали помехоустойчивость разных методов приема сигналов с ОФМ и ДОФМ как в каналах с постоянными параметрами, так и в каналах с замираниями. В изданной в 1967 г. книге Л.М. Заездного, Ю.Б. Окунева и Л.М. Раховича [11] были обобщены основные полученные к тому времени теоретические и практические результаты, касающиеся систем передачи и приема сигналов с ОФМ.

Американские ученые К. Кан [10] и К. Хелстром [12] первые исследовали в середине 50-х гг. вопросы помехоустойчивости синхронного приема в условиях, когда фаза опорного сигнала, подаваемого на синхронный детектор, испытывает флуктуации из-за действия шумов. С. Штейн [13] предложил обобщенную методологию анализа помехоустойчивости приема сигналов в каналах с неопределенной фазой, которая применима как к сигналам с ЧМн, так и к сигналам с ОФМ. Методы передачи и приема дискретных сигналов с ОФМ и ДОФМ нашли весьма широкое применение во многих системах связи.

Значительным достижением в технике связи явилась разработка в 1954–1956 гг. американской фирмой Collins Radio синхронной системы связи, названной «Кинеплекс». В этой системе была применена ОФМ. В ней в полосе частот одного телефон-

ного канала формировался многочастотный сигнал, состоящий из двадцати несущих колебаний, расположенных с интервалом 110 Гц [14]. На всех несущих методом ДОФМ синхронно передавались потоки цифровых сигналов со скоростью 120 бит/с. Система имела весьма высокую спектральную эффективность, позволяя в полосе частот, равной одному герцу, передавать информацию со скоростью 0,6 бит/с. В работе Дж. Лаутона [15] была исследована помехоустойчивость приема сигналов в этой системе.

Системы, подобные «Кинеплекс», для передачи данных по коротковолновым линиям связи были разработаны также и в России [11, 16]. С конца 60-х гг. цифровые системы с ОФМ и ДОФМ начинают широко применяться в спутниковых и радиорелейных линиях связи.

Принципы, заложенные в систему «Кинеплекс», оказались весьма перспективными. В 80-х гг. Европейским институтом телекоммуникационных стандартов эти принципы были положены в основу разработки цифровых систем звукового и телевизионного вещания, которые XXI в. во всех странах Европы пришли на смену действующим и сегодня аналоговым системам. Многие современные системы абонентского радиодоступа также строятся на этих принципах.

В 60-х гг. в США был изобретен метод передачи сигналов, названный ЧМн с непрерывной фазой, который также называется манипуляцией минимального частотного сдвига (ММС). При этом методе (см. [17]) во время передачи одного бинарного символа осуществляется частотная модуляция несущей частоты с индексом модуляции, равным 0,5. Фаза такого сигнала за время передачи одного символа изменяется по линейному закону на $\pm 90^\circ$. Особенностью ЧМн с непрерывной фазой по сравнению с методами передачи, основанными на скачкообразном изменении фазы сигнала, является компактность спектра сигнала, передаваемого по каналу связи (низкий уровень его внеполосных излучений). Это облегчает решение проблем электромагнитной совместимости систем связи, работающих в соседних частотных каналах. Метод ЧМн с непрерывной фазой применяется для передачи сигналов, например, в системах спутниковой связи, а также в получивших глобальное распространение сотовых системах подвижной связи европейского стандарта GSM.

Николай Тимофеевич ПЕТРОВИЧ

Николай Тимофеевич Петрович родился 8 сентября 1915 г. в Таллине. В 1940 г. с отличием окончил Московский электротехнический институт связи. Участник Великой Отечественной войны. В 1948 г. защитил кандидатскую диссертацию и почти два десятилетия занимался разработкой систем управления ракетами и дальними бомбардировщиками в НИИ радиопромышленности. В 1954 г. изобрел метод ОФМ. Это изобре-



тение — одно из важнейших в области связи. Оно нашло широкое применение в системах различного назначения.

Описание ОФМ вошло во все современные учебные курсы по передаче сигналов. Исследования нового метода передачи стали содержанием докторской диссертации Н.Т. Петровича, защищенной в Институте радиотехники и электроники Академии наук СССР в 1960 г., и книги [5], опубликованной в 1965 г.

С 1960 по 1965 г. Н.Т. Петрович возглавлял разработку в диапазоне коротких волн аппаратуры ОФМ для подводных лодок и ее первые натурные испытания. С 1965 г. он более двадцати лет руководил кафедрой теории передачи сигналов и нелинейных электрических цепей во Всесоюзном заочном электротехническом институте связи в Москве. При активном участии профессора Н.Т. Петровича проводились многие семинары и конференции по пропаганде ОФМ. Под его руководством 28 ученых защитили кандидатские диссертации. Им опубликован ряд книг, охватывающих широкий круг вопросов. По его книгам многие тысячи советских специалистов знакомы с новейшими достижениями в области импульсной техники, космической радиосвязи, с системами связи с ОФМ и с шумоподобными сигналами.

Большой известностью пользовались научно-популярные книги Н.Т. Петровича, в которых рассказывалось о проблемах передачи информации в современном обществе, об изобретательстве, в котором наиболее полно проявляется созидательная сущность человека, о проблемах контакта с внеземными цивилизациями. Многие его статьи и книги переведены на иностранные языки.

Н.Т. Петрович был и остается активным изобретателем, автором и соавтором 28 изобретений, многие из которых посвящены развитию его идей, связанных с методом ОФМ. Со студенческих лет по сегодняшний день Н.Т. Петрович увлекается альпинизмом — одним из самых сложных и романтических видов спорта, в котором он является опытным профессионалом, имея звание мастера спорта.

В настоящее время Н.Т. Петрович участвует в разработке сети связи России для чрезвычайных ситуаций. В 2001 г. он опубликовал книгу о внеземных цивилизациях, а в 2003 г. вышла еще одна его книга «Относительные методы передачи информации».

Николай Петрович ХВОРОСТЕНКО

Николай Петрович Хворостенко родился 1 июля 1933 г. в Василькове Киевской области. В 1956 г. окончил Военную академию связи в Ленинграде по специальности «радиосвязь». В 1956—1959 гг. служил в батальоне связи в должности начальника мастерской связи в Сталинабаде Таджикской ССР. С 1959 г. по настоящее время работает в Центральном научно-исследовательском испытательном институте Министерства обороны Российской Федерации.



В 1962 г. защитил кандидатскую, а в 1971 г. — докторскую диссертации. С 1974 г. имеет звание профессора. Н.П. Хворостенко — крупный теоретик в области связи, сделавший значительный вклад в развитие теории потенциальной помехоустойчивости. В 1962—1967 гг. он принимал активное участие в разработках новой техники в институте под руководством известного российского специалиста в области связи В.С. Дулицкого. Им были получены важные результаты, относящиеся к приему сигналов с ФМн и ОФМ, рассмотрены вопросы приема в целом M -позиционных сигналов (ортогональных, симплексных, сигналов с избыточностью). В его работах была развита теория оптимального разнесенного приема сигналов с учетом корреляции замираний в ветвях разнесения, а также теория приема сигналов с избыточным кодированием. Основные результаты его исследований опубликованы в монографии [9], изданной в 1968 г.

Н.П. Хворостенко совместно с коллегами по работе сделал ряд интересных изобретений, имеющих важное практическое значение. В них предложены оригинальные методы оптимального когерентного сложения сигналов в системах разнесенного приема, методы компенсации межсимвольных помех в многолучевых каналах, методы подавления радиопомех за счет их оптимальной обработки и пространственной селекции сигналов.

2.2. Прием M -позиционных сигналов в каналах с постоянными параметрами и в каналах с неопределенной фазой

Оптимальные системы связи с M -позиционными сигналами (ортогональными и симплексными) впервые были предложены и исследованы **В.А. Котельниковым**. Значение теории приема M -позиционных сигналов (M -сигналов) состоит в том, что в системах связи, использующих такие сигналы, можно достичь тех предельных характеристик качества приема, на которые впервые в 1948 г. указал создатель теории информации [18], крупнейший ученый в области связи К. Шеннон.

Шенноном было показано, что в оптимально построенной системе связи возможна безошибочная передача информации в том случае, если выполняется условие

$$R = (\ln M)/T < C = F \ln(1 + P_s/P_n),$$

где F — полоса частот канала связи; R — скорость передачи M -сигнала; T — время передачи ($T \rightarrow \infty$); C — пропускная способность канала связи; P_s и P_n — мощности полезного сигнала и шума, действующего в канале связи. Доказательство этого положения в [18] не носило конструктивного характера, так как при этом не указывались способы передачи и приема сигналов в такой системе связи.

В 1950 г. знаменитый американский ученый **С.О. Райс** опубликовал работу [19], в которой рассмотрел оптимальный прием M -сигналов в N -мерном пространстве ($N = 2FT$). Поскольку методы построения оптимального ансамбля M -сигналов в те годы не были известны, он впервые выдвинул идею случайного кодирования и нашел формулу для средней вероятности ошибочного приема по случайно выбранным ансамблям таких сигналов. Эта сложная формула давала важную зависимость $P_{\text{ош}} = f(R, C, N)$. Райсом была установлена связь между теорией оптимального приема и теорией информации. Она сыграла важную роль в их дальнейшем развитии. По сути, работа Райса показывала, что теория потенциальной помехоустойчивости может служить базой для конструктивного доказательства положений тео-

рии информации, касающихся пропускной способности каналов связи. В дальнейшем полученные результаты были развиты рядом крупных ученых.

В 1955–1958 гг. известные отечественные ученые профессор Э. Л. Блох, академик А.А. Харкевич [20] и профессор Н.К. Игнатьев [21], используя математическую теорию плотнейшего заполнения N -мерного пространства равными шарами, нашли ряд оптимальных ансамблей M -сигналов, позволяющих передавать сообщения в каналах «белым» гауссовским шумом.

В 1959–1963 гг. К. Шеннон [22], А.В. Балакришнан [23] и Д. Слепян [24] опубликовали работы, в которых были развиты методы вычисления зависимости $P_{\text{ош}} = f(R, C, N)$ и сделаны важные выводы о потенциальной помехоустойчивости оптимального приема M -сигналов. Многочисленные результаты, связанные с проблемой передачи и приема M -сигналов, полученные до 1966 г., были отражены в книге известных отечественных специалистов К.А. Мешковского и Н.Е. Кириллова [25].

Проблема вычисления вероятности ошибочного приема для M -сигналов весьма сложна в математическом плане, и до 70-х гг. продолжают исследования, в которых развиваются методы получения достаточно точных оценок зависимости $P_{\text{ош}} = f(R, C, N)$ для таких сигналов. Наиболее важные результаты в этом направлении были получены американскими учеными А. Нутталлом [26], исследовавшим помехоустойчивость когерентного и некогерентного приема равнокоррелированных M -сигналов, и Р. Галлагером [27], разработавшим метод оценки сверху $P_{\text{ош}}$ при приеме M -сигналов.

Другой эффективный метод оценки сверху $P_{\text{ош}}$ при приеме произвольных M -сигналов отражен в работе [28], где рассмотрен ряд примеров его применения в конкретных системах связи, работающих в каналах с замираниями и без них.

В конце 50-х и в начале 60-х годов продолжались исследования помехоустойчивости приема ортогональных и биортогональных M -сигналов в N -мерном пространстве ($M = N$ и $M = 2N$ соответственно) и M -сигналов в двухмерном пространстве. Применение M -сигналов при $M > N$ позволяет в заданной полосе частот передавать сообщения с большей скоростью, т.е. более эффективно использовать полосу частот канала связи. Это особенно актуально в радиосвязи.

В.С. Котовым и Л.М. Финком [29] были получены результаты, определяющие потенциальную помехоустойчивость приема четырех позиционных сигналов с ЧМ (сигналов ДЧТ-двухканального частотного телеграфирования) в каналах с неопределенной фазой при произвольном законе флуктуаций уровня принимаемого сигнала. Идея системы ДЧТ, в которой передача сигналов происходит на четырех различных частотах, была предложена еще в 1923 г. известным специалистом в области распространения коротких волн, академиком А.Н. Щукиным. В 1946 г. инженером И.Ф. Агаповым [30] эта система была реализована и широко применялась в течение многих лет на линиях коротковолновой связи.

Следует особо выделить работы К. Кана [31], К. Компопиана и Б. Глазера [32], а также Дж. Смита [33]. В 60-х гг. эти авторы исследовали важный класс двухмерных M -сигналов с фазово-амплитудной (ФАМ-сигналы) и квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ-сигналы). Такие сигналы при выполнении условия $M \gg N$ позволяют намного эффективнее использовать полосу частот канала связи, отведенную для их передачи, по сравнению с сигналами с ЧМн и ФМн.

Сигналы с КАМ просты в реализации и при $M = 16 \cdot 256$ они нашли широкое применение в современных цифровых системах связи и, в частности, в радиорелейной связи.

В это же время ведутся обширные исследования, направленные на синтез N -мерных M -сигналов, позволяющих с высокой эффективностью использовать полосу частот канала связи и имеющих высокую помехоустойчивость приема. По существу происходит синтез идей теорий модуляции и кодирования.

Американский ученый **Д. Слепян** [34] был одним из первых, кто предложил метод построения ансамбля сигналов для случая, когда N и M имеют произвольные значения и $M \gg N$. Все сигналы этого ансамбля получаются из одного в результате перестановок его символов. Этот метод он назвал перестановочной модуляцией. Слепян показал возможность достижения высокой помехоустойчивости приема сигналов при их передаче этим методом. В США И. Ридом и Шольцем [35], В. Линдсеем и М. Симоном [36] исследована помехоустойчивость приема «в целом» ансамбля M -сигналов, в которых отдельные сигналы содержат L ортогональных компонент, каждая из которых может иметь K -кратную ФМн ($M = LK$).

В.В. Гинзбургом [37] были предложены новые сигнально-кодовые конструкции M -сигналов (СКК), в которых применялись многократная ФМ и различные виды корректирующих кодов.

Г. Унгербоеком [38] был предложен новый подход к созданию СКК, основанный на использовании определенного правила двоичного представления сигнальных точек при разбиении используемого ансамбля сигналов на вложенные под ансамбли с увеличивающимся минимальным расстоянием.

Интенсивные теоретические исследования СКК были проведены в 80-х гг. отечественными учеными В.Л. Банкетом и С.Л. Портным. Ими были рассмотрены вопросы помехоустойчивого кодирования в спутниковых каналах с многопозиционной ФМ, разработаны методы синтеза СКК на основе каскадных кодов, выполнен анализ возможностей применения сверточных кодов для синтеза СКК. Результаты этих исследований отражены в литературе [39, 40].

§ 3. Прием дискретных сигналов в многолучевых каналах

Важным направлением теории потенциальной помехоустойчивости является теория передачи и приема дискретных сигналов в каналах с многолучевым распространением радиоволн. Рассмотрим историю развития этого направления в данном параграфе.

Долгое время передача сообщений на большие расстояния с помощью радиоволн была возможна только по коротковолновым, ионосферным и тропосферным радиоканалам, для которых характерно многолучевое распространение радиоволн. Физические явления, связанные с таким распространением, весьма сложны. Понимание сути этих явлений и разработка адекватного математического аппарата для их описания и исследования, а также методов повышения помехоустойчивости приема сигналов в таких каналах потребовали от международного сообщества ученых огромной соизводительной работы и заняли много времени.

В результате усилий детально исследованы и сегодня находят применение следующие методы приема сигналов в каналах с многолучевостью:

- разнесенный прием;
- разделение отдельных лучей в месте приема за счет использования широкополосных сигналов;
- прием с использованием компенсаторов межсимвольной интерференции.

В науке и технике примечательно то, что отсутствие теоретического осмысления тех либо иных явлений часто не является препятствием для инженеров, которые находят новые технические решения, опираясь на данный им дар интуиции и нечеткие, а порой даже ложные представления о сущности этих явлений. Действительно, удивление и восхищение вызывают замечательные достижения инженеров древности, построивших грандиозные египетские пирамиды и создавших сложнейшие механизмы, не обладая теоретическими знаниями о законах механики, которые человечество получило только спустя почти тысячу лет благодаря работам Галилея, Ньютона и других ученых. Подобное положение вещей можно видеть и в той области, которая будет рассмотрена далее.

Еще задолго до появления теории потенциальной помехоустойчивости инженерами были найдены некоторые важные принципы повышения помехоустойчивости приема в каналах с многолучевостью. Эти принципы иногда забывались. Но ничто не уходит безвозвратно, и эти принципы затем вновь переоткрывались. Иногда к одним и тем же техническим решениям приходили независимо примерно в одно и то же время разные разработчики. Сегодня можно считать, что благодаря исследованиям, выполненным в 50–80-е гг., основные принципы построения эффективных систем приема сигналов в каналах связи с многолучевостью установлены и твердо обоснованы.

Алгоритмы обработки сигналов и помехоустойчивость приема исследовались для разных каналов связи: с общими и селективными замираниями сигналов, с разнесенным приемом сигналов и с многолучевостью. Каналы с общими замираниями характеризуются тем, что их частотная характеристика равномерна в пределах полосы частот, занимаемой спектром передаваемого сигнала, и замирания всех составляющих этого спектра происходят полностью коррелированно. При селективных замираниях частотная характеристика канала неравномерна и корреляция замираний отдельных частотных составляющих сигнала может иметь незначительную корреляцию.

Исследования в области потенциальной помехоустойчивости были наиболее широко развернуты в нашей стране и в США. Ряд важных работ был выполнен в Великобритании и Японии.

3.1. Модели многолучевых каналов связи

В теории потенциальной помехоустойчивости **В.А. Котельникова** рассматривались задачи приема сигналов в канале с постоянными и точно известными параметрами. Однако параметры реальных каналов связи, в первую очередь радиоканалов, в большинстве случаев непрерывно изменяются.

В каналах связи с многолучевым распространением радиоволн в место приема сигнал приходит несколькими путями (лучами). Лучи могут отличаться своими параметрами: временем и направлением прихода, а также поляризацией. Они могут иметь и несколько отличающиеся частоты.

Интерференция лучей вызывает флуктуации амплитуды и фазы принимаемого суммарного сигнала, в результате чего снижается помехоустойчивость приема. Для разных механизмов распространения радиоволн характерна разная степень многолучевости. В коротковолновом канале возможен приход в место приема всего нескольких лучей. Такой канал называется каналом с дискретной многолучевостью. Для тропосферного канала свойственна непрерывная многолучевость, когда в место приема приходит бесконечно много лучей, переотраженных областью тропосферы, облучаемой передающей антенной.

Интерференция лучей в месте приема приводит к следующим явлениям:

- значительным пространственным интерференционным колебаниям уровня электромагнитного поля сигнала в месте приема, обусловленным отличиями направлений прихода лучей;
- значительным отличиям между уровнями напряженности компонентов суммарного электромагнитного поля разной поляризации в одном месте приема, возникающим из-за интерференции приходящих лучей;
- неравномерности частотной характеристики канала связи, в результате которой некоторые частотные компоненты передаваемого сигнала в месте приема имеют высокий уровень, а некоторые подавляются в результате интерференции приходящих лучей с разным запаздыванием;
- непрерывным изменениям во времени уровней принимаемого сигнала в пространственной, поляризационной и частотной областях из-за отличий частот сигналов, приходящих в место приема разными путями.

Эти особенности многолучевого распространения радиоволн позволяют, применяя несколько приемных антенн, разнесенных в пространстве или имеющих разную поляризацию, или же передавая одни и те же сигналы, разнесенные по частоте либо по времени, существенно повысить надежность связи за счет того, что уровень хотя бы одного из принимаемых сигналов будет значительным.

Указанные особенности еще в 30-х гг. натолкнули инженеров на идею использования разнесенного приема сигналов для повышения помехоустойчивости. Разные виды систем разнесенного приема были изобретены инженерами еще до возникновения четких представлений о природе замираний и задолго до создания теории потенциальной помехоустойчивости. Однако только теория дала основу для сравнения по помехоустойчивости и по сложности реализации разных систем разнесенного приема.

Впервые идея разнесенного приема была предложена и реализована голландским инженером А. де Хаасом в 1927 г. при организации радиотелефонной коротковолновой линии между островом Ява и Голландией [1]. Известные американские инженеры Г. Беверейдж и Г. Петерсон применили разнесенный прием в 1931 г. в радиотелеграфной связи [2], а в 1937 г. для коротковолновой линии связи между США и Англией американскими инженерами Г.Т. Фрисом и Г.Б. Фельдманом была создана многолучевая антенная система [3], позволяющая на приеме разделять приходящие лучи по углу прихода в вертикальной плоскости (углу места) и осуществлять их сложение, устраняя тем самым замирания принимаемого сигнала.

Начало теоретических исследований эффективности систем разнесенного приема, основанных на применении методов теории вероятностей, относится к 30-м гг. Пер-

вые работы в этом направлении были выполнены известными учеными — англичанином Т.Л. Эжерслеем [4] и отечественными специалистами **В.И. Сифоровым** [5], **В.А. Котельниковым** [6], Н.И. Шумской [7] и А.Н. Щукиным [8].

Однако всесторонние исследования вопросов, связанных с помехоустойчивостью систем разнесенного приема, были выполнены лишь после создания теории потенциальной помехоустойчивости и базировались на ее идеях.

3.2. Прием сигналов в каналах с общими замираниями в ветвях разнесения

Одинарный прием сигналов в условиях замираний уровня принимаемых сигналов требует строительства радиолиний со значительным энергетическим потенциалом, перекрывающим необходимый для обеспечения надежной связи запас на замирания. Применяя разнесенный прием, можно существенно уменьшить энергетику линий радиосвязи и повысить помехоустойчивость их приема.

При проектировании систем разнесенного приема перед инженером возникает ряд проблем, связанных с обработкой сигналов, принимаемых в ветвях разнесения и имеющих, как правило, различные уровни и фазы. Можно измерять уровни и фазы принимаемых сигналов и использовать результаты измерений для их когерентного сложения с соответствующими весами (системы когерентного сложения сигналов); можно измерять только уровни принимаемых сигналов и осуществлять прием сигналов той ветви разнесения, где этот уровень максимальный (системы автовыбора); можно обойтись без всяких измерений и в каждой ветви разнесения осуществлять демодуляцию сигналов и складывать сигналы, полученные на выходах демодуляторов (системы некогерентного сложения сигналов). Для инженера, проектирующего такие системы, важно знать, какой выигрыш в помехоустойчивости могут дать разные методы обработки принимаемых сигналов и как растёт этот выигрыш с увеличением числа ветвей разнесения. Следует отметить, что эффективность систем разнесенного приема зависит также от степени корреляции замираний сигналов в ветвях разнесения.

Независимые замирания сигналов в ветвях разнесения. Одно из первых исследований помехоустойчивости систем разнесенного приема сигналов выполнил еще в 1947 г. видный советский ученый **В.С. Мельников** [9]. Позже (с 1958 г.) в его работах теория В. А. Котельникова была развита применительно ко многим реальным проблемам приема сигналов в многолучевом канале связи.

К одной из первых теоретических работ, в которых были рассмотрены разные методы разнесенного приема в коротковолновой связи и определена их помехоустойчивость, следует отнести диссертацию отечественного ученого Е.А. Хмельницкого (1954 г., Московский электротехнический институт связи), результаты которой [10] были опубликованы только в 1960 г. Помимо оценки эффективности разных систем разнесенного приема, в работе указаны принципы построения аппаратуры для этих систем и рассмотрены особенности замираний сигналов на коротких волнах.

Фундаментальные теоретические исследования в этом направлении были выполнены в 1955–1958 гг. выдающимся советским ученым профессором **Л.М. Финком**. Эти результаты вошли в первую его книгу [11].

Л.М. Финком были всесторонне рассмотрены многие вопросы теории приема сигналов в каналах со случайными параметрами. Для каналов с неопределенной фазой сигналов он исследовал прием M -позиционных ортогональных сигналов, рассмотрел прием таких сигналов в каналах с гладкими рэлеевскими замираниями с использованием разнесенного и одинарного приема. Для систем двухкратного разнесенного приема он исследовал влияние корреляции замираний в ветвях разнесения на помехоустойчивость приема и показал, что это влияние незначительно.

Ученики **Л.М. Финка** также провели исследования в области разнесенного приема сигналов. Один из них, И.С. Андронов, в 1964–1966 гг. исследовал помехоустойчивость разнесенного приема различных сигналов при когерентном и некогерентном сложении. Им впервые были выполнены исследования помехоустойчивости систем разнесенного приема сигналов в случае, когда замирания в ветвях разнесения происходят по закону Райса, а также когда в каждой ветви разнесения с определенной точностью осуществляются измерения интенсивности и фазы принимаемых сигналов. И.С. Андроновым и Л.М. Финком совместно была написана одна из наиболее полных в мировой технической литературе книг по теории систем разнесенного приема [12], в которой представлены результаты исследований в этой области, полученные до 1969 г.

Ряд важных результатов в теории приема сигналов в системах разнесенного приема были получены крупным советским ученым и педагогом, профессором Поволжской государственной академии телекоммуникаций и информатики (ПГАТИ) в Самаре **Д.Д. Кловским**. Он исследовал помехоустойчивость приема M -сигналов, когда замирания в ветвях разнесения подчиняются законам Райса или Накагами. Впервые в его работах был дан анализ помехоустойчивости приема сигналов при действии флуктуационной и сосредоточенной помех [13].

Многие значительные результаты теории разнесенного приема были получены профессором **Н.П. Хворостенко** — ведущим научным сотрудником одного из военных исследовательских институтов. Им были проведены обстоятельные исследования помехоустойчивости широко применяемых на практике систем оптимального разнесенного приема сигналов с амплитудной, фазовой и частотной манипуляциями, результаты которых вошли в его книгу [14].

Основополагающие исследования помехоустойчивости систем разнесенного приема были выполнены американскими учеными Дж. Л. Туриним, И.Н. Пирсом и В.К. Линдсеем. В 1958–1963 гг. **Дж. Л. Турин** разработал статистическую теорию разнесенного приема сигналов в каналах с многолучевостью и определил помехоустойчивость оптимальных систем [15–17].

Исследованию помехоустойчивости систем разнесенного приема были посвящены многочисленные работы. Одна из первых подобных работ была выполнена американским ученым И.Н. Пирсом [18], рассмотревшим систему приема сигналов с ЧМн.

Точные формулы для вероятности ошибочного приема сигналов в системах с различной модуляцией и с разными алгоритмами обработки и сложения принимаемых сигналов очень сложны, как правило, для расчетов. В работах В.К. Линдсея [19, 20] и М.А. Быховского [21] были разработаны эффективные методы приближенной оценки вероятности ошибочного приема ($P_{\text{ош}}$) и получены простые в расчетном отношении формулы для $P_{\text{ош}}$.

Коррелированные замирания. В реальных системах N -кратного разнесенного приема сигналы, принимаемые в различных ветвях, замирают и корреляция этих замираний может быть задана матрицей размерности $N \times N$.

Вычисление $P_{\text{ош}}$ для системы когерентного приема разнесенных сигналов с коррелированными замираниями — сложная математическая задача, которая впервые была решена в 1961 г. американскими учеными И.Н. Пирсом и С. Штейном [22]. Впоследствии эти результаты были обобщены советским ученым **Н.П. Хворостенко**, который рассмотрел помехоустойчивость систем разнесенного приема для разных видов корреляционных матриц. В его книге [14] рассмотрены также несколько частных случаев, характерных для каналов связи с дискретной многолучевостью. Для таких каналов математический аппарат, основанный на применении корреляционных матриц, не позволяет в общем виде исследовать помехоустойчивость систем разнесенного приема с разнесением сигналов по частоте, пространству и поляризации.

Теория разнесенного приема сигналов для каналов с дискретной многолучевостью была развита М.А. Быховским [23]. Эта теория основана на физической модели канала связи. Ее важная особенность в том, что она позволяла определить зависимость помехоустойчивости как от физических параметров лучей, приходящих в место приема (их направления прихода, поляризации и относительного запаздывания), так и от величины разноса между сигналами, разнесенными по частоте, и от параметров приемной антенной системы (расположения антенн на антенном поле и их поляризации). Было показано, что выбор кратности разнесенного приема большей, чем количество лучей, приходящих в место приема, не может повысить помехоустойчивость приема сигналов. Полученные результаты давали основу для проектирования систем разнесенного приема.

Даниил Давыдович КЛОВСКИЙ

Даниил Давыдович Кловский родился 16 августа 1929 г. в Гродно в рабочей семье. Во время Великой Отечественной войны, пройдя через гетто и концлагеря, в которых погибли его близкие, он вместе с отцом чудом остался в живых. В лагере он принимал участие в движении Сопротивления. Закончив с отличием в 1953 г. Ленинградский электротехнический институт связи им. проф. А.М. Бонч-Бруевича, с 1953 по 1957 г. Кловский работал в гродненской и могилевской дирекциях радиоретрансляционной сети. После защиты кандидатской диссертации в



1960 г. он преподавал в Поволжской государственной академии телекоммуникаций и информатики (ПГАТИ), где в 1964 г. создал кафедру теоретических основ радиотехники и связи. В 1965 г. Д.Д. Кловскому было присвоено звание доктора технических наук, а в 1971 г. он был награжден орденом Знак Почета. Кловский — заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, действительный член Академии инженерных наук и Академии телекоммуникаций и информатики.

Профессором Д.Д. Кловским сделан значительный вклад в теорию приема дискретных сообщений в многолучевых каналах связи при действии гауссовских, гармонических и импульсных помех. Он был одним из первых ученых, предложивших и детально исследовавших еще в конце 50-х годов метод последовательной скоростной передачи дискретных сообщений по каналам с межсимвольной интерференцией (МСИ), который в последующие годы получил значительное развитие в работах отечественных и зарубежных ученых и инженеров. Под руководством Д.Д. Кловского его сотрудниками была разработана и успешно испытана система коротковолновой связи. В работах Д.Д. Кловского и его учеников в последние годы отражены разработанные эффективные субоптимальные алгоритмы поэлементного приема в каналах с МСИ, использующие периодическое зондирование канала и обратную связь по решению, а также алгоритмы приема сигналов «в целом» в таких каналах.

Д.Д. Кловский опубликовал более 150 научных статей и восемь книг (шесть в соавторстве) по разным вопросам теории передачи и приема сигналов в каналах связи с многолучевостью, он имеет 15 патентов и авторских свидетельств на изобретения. Д.Д. Кловский — один из крупнейших отечественных педагогов и создателей нескольких современных учебников по теории передачи сигналов и электрической связи. По его книгам готовят специалистов в области связи. Многие из его учеников стали кандидатами и докторами наук.

Даниил Давыдович Кловский скончался 15 мая 2004 г. в Самаре.

Джордж ТУРИН

Джордж Л. Турин родился в Нью-Йорке 27 января 1930 г. В 1952 г. он закончил знаменитый Массачусетский технологический институт (МТИ) и в этом же году был направлен на стажировку в Англию в компанию Маркони. С 1952 по 1956 г. Дж. Турин состоял в штате лаборатории им. Линкольна в МТИ, где занимался основополагающими исследованиями в области статистической теории связи, составившие основу его докторской диссертации.

В течение ряда лет он работал научным консультантом многих известных американских фирм. В интересах фирмы Хьюза он вел важные исследования в области радиолокации. Дж. Турин является профес-



сором Южнокалифорнийского университета. Он опубликовал книгу по теории передачи цифровых сигналов, в том числе и в системах с информационной обратной связью [16]. В 70-х гг. после определенных исследований была разработана важная для проектирования систем сухопутной подвижной связи статистическая модель многолучевого распространения радиоволн в городских условиях [17].

§ 4. Оптимальный прием сигналов в многолучевых каналах

В многолучевом канале принимаемый сигнал становится гауссовским из-за того, что образуется путем суммирования значительного числа эхосигналов, приходящих с разным запаздыванием. Ряд крупных американских ученых (**Д. Миддлтон**, **Р. Прайс**, **Дж. Турин**, Р. Кеннеди [1]) исследовали вопросы приема сигналов в многолучевом канале, рассматривая задачу оптимального приема гауссовских сигналов на фоне помех.

Однако далеко не всегда количество приходящих в место приема лучей значительно. В диапазоне коротких волн их может быть 2–4, в диапазоне сантиметровых волн на трассах прямой видимости радиорелейных линий связи число лучей составляет 2–3.

Крупным достижением теории потенциальной помехоустойчивости явился синтез принципиально новой системы связи «*Rake*». Эта система, открытая «на кончике пера», в противоречии с существовавшими ранее представлениями, показала возможность существенного повышения помехоустойчивости приема в многолучевом канале связи без снижения скорости передачи за счет применения широкополосных сигналов. Теоретические исследования и работы по практической реализации данной системы проводились в США в 1956–1958 гг. В 1958 г. американскими учеными Р. Прайсом и П.Е. Грином была опубликована знаменитая статья [2] с подробным изложением этих исследований.

Интересно отметить, что независимо к подобным же идеям в 1957 г. пришел видный отечественный ученый академик **А.А. Харкевич** [3]. Он теоретически доказал эффективность применения широкополосных сигналов для повышения помехоустойчивости приема в многолучевых каналах связи. Однако до практической реализации этих идей в нашей стране в те годы дело не дошло.

Р. Прайс и П.Е. Грин показали, что передача широкополосных сигналов по многолучевому каналу связи дает возможность путем корреляционной обработки сигнала на приеме разделить отдельные лучи и, выравняв их задержки, когерентно сложить, устранив тем самым замирания принятого сигнала.

Исследования зависимости помехоустойчивости приема в системе «*Rake*» от уровня боковых лепестков автокорреляционных функций применяемых широкополосных сигналов были проведены М.А. Быховским [4]. Результаты этих исследований давали возможность обоснованно выбирать для системы «*Rake*» сигналы, занимающие ограниченную полосу частот.

Роберт ПРАЙС

Один из крупнейших американских ученых в области теории связи Роберт Прайс родился 7 июля 1929 г. в г. Западный Честер (США). В 1950 г. он окончил физический факультет Принстонского университета, а в 1953 г. в Массачусетском технологическом институте (МТИ) защитил докторскую диссертацию в области электротехники.

В его диссертации впервые была развита статистическая теория связи в многолучевых каналах, результаты которой были опубликованы в 1954–1957 гг.

Совместно с другим американским ученым П.Е. Грином им была опубликована в 1958 г. знаменитая статья «Метод передачи сигналов в многолучевых каналах связи» (*Proc. IRE*, v. 45, March), в которой были приведены результаты исследований системы «Rake». Описание этой системы ранее (в 1956 г.) появилось в одном из отчетов Массачусетского технологического института. Система, разработанная Р. Прайсом и П.Е. Грином, предназначалась для работы в коротковолновом канале связи. В ней для разделения отдельных лучей и повышения помехоустойчивости приема были применены широкополосные сигналы. В 1961 г. они получили патент на эту систему.

Система «Rake» исследовалась многими учеными, и ее описание вошло в книги и учебники по теории связи. Подобные системы в последующие годы разрабатывались рядом фирм. Они предназначались для передачи сигналов в тропосферных каналах связи, в каналах, использующих Луну в качестве пассивного ретранслятора, и т.п. Такие системы, в частности, нашли применение и в широко распространенных сегодня в мире системах сотовой подвижной связи с широкополосными сигналами.

Р. Прайс внес значительный вклад в несколько разделов теории связи. В 1958 г. он установил важную теорему, которая в книгах по статистической радиотехнике носит название теоремы Прайса (*IRE Trans. IT-4*, June). Эта теорема позволила определять корреляционную функцию процесса на выходе нелинейного устройства, когда на его входе действует гауссовский случайный процесс. В 1988 г. им было получено разложение по ортогональным полиномам Лаггера плотности распределения огибающей суммы двух гармонических колебаний и гауссовского шума (*IEEE Trans. IT-34*, November).

В 1992 г. Р. Прайс, используя быстрое преобразование Фурье, разработал оригинальный метод формирования широкополосных сигналов радиолокационных систем на основе нелинейной частотной модуляции несущей частоты, а также метод их сжатия. Применение таких сигналов в авиационных системах было одобрено Международной организацией управления воздушным движением.

Одно из изобретений Прайса касается способа быстрого ввода в синхронизм систем, использующих широкополосные сигналы с заранее неизвестным алгоритмом формирования. Им были разработаны принципы создания секретных систем с низкой вероятностью



перехвата и методы цифровой записи информации в устройствах памяти, позволяющие в четыре раза увеличить плотность записи на носителях.

Р. Прайс внес важный научный вклад в радиоастрономию, создав метод цифровой обработки сигналов для планетарного радиолокатора. Этот метод был использован при локации планеты Венера, а также в экспериментах, подтвердивших общую теорию относительности Эйнштейна. Р. Прайс участвовал в экспериментах по определению интенсивности спектрального резонанса на частоте 327 МГц дейтерия в нашей Галактике, в которых был установлен весьма важный для космологии факт — чрезвычайно малая интенсивность.

Р. Прайс опубликовал несколько ярких статей исторического характера. В двух из них отражено развитие научных исследований в области теории информации в США в 1961 и 1963 гг. (IEEE Trans. IT-7, July, в 1961 г. — совместно с Н. Абрамсоном и IEEE Trans. IT-9, October, в 1963 г. — совместно с Дж. Л. Туриным). Одна из статей Р. Прайса была посвящена истории развития систем, использующих широкополосные сигналы (IEEE Trans. COM-31, January, 1983). Он автор более 50 научных работ, и ему принадлежит десять патентов на изобретения.

Р. Прайс является авторитетным ученым и получил мировое признание. С 1953 г. он является почетным членом Австралийского научного общества им. Фулбрайта. В 1962 г. стал почетным членом Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) и членом Национального комитета США Международного научного союза (УРСИ). В 1981 г. он стал лауреатом премии IEEE им. Эдвина Армстронга, а в 1985 г. был избран членом Национальной инженерной академии.

4.1. Разнесенный прием сигналов с измерением их параметров в ветвях разнесения

В рассматриваемых ранее исследованиях помехоустойчивость оптимальных систем приема оценивалась в предположении, что параметры лучей в многолучевом канале или амплитуды и фазы сигналов в ветвях разнесения известны абсолютно точно. На самом деле на приеме необходимо измерить эти параметры на фоне действующих шумов. Возникает сложная теоретическая проблема выбора как структуры трактов измерения этих параметров, так и оценки влияния точности измерений на помехоустойчивость приема.

В простейшем виде проблема возникает при разнесенном приеме сигналов с ОФМ. В этом случае возможно измерение параметров сигналов в каждой ветви разнесения за время, равное длительности передаваемого двоичного знака. Однако точность измерений может быть существенно повышена за счет увеличения продолжительности измерений (уменьшения ширины полосы пропускания фильтров, стоящих в измерительных трактах). Следует отметить, что ширина полосы пропускания этих фильтров не может быть выбрана сколь угодно узкой, так как должна быть согласована со скоростью изменений измеряемых параметров.

Например, в ряде работ американских ученых **Ф. Белло** и Б.Д. Нелина [5] исследованы системы частотно-разнесенного приема, где на частотах, близких к используемым для передачи информации, передаются пилот-сигналы, выделяемые на приеме узкополосными фильтрами. Действующие на выходе фильтров очищенные от шумов сигналы применяются в качестве опорных для когерентного детектирования информационных

сигналов в ветвях разнесения. Ими была рассмотрена помехоустойчивость систем разнесенного приема в каналах, где в каждой ветви разнесения имеются частотно-селективные замирания и временные изменения коэффициента передачи канала связи.

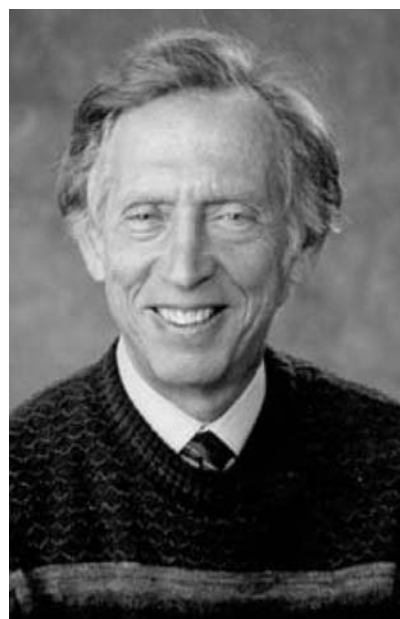
Идеи использования обратной связи по решению для измерения параметров канала связи появились еще в 50-х гг. Адаптивные системы разнесенного приема, в которых применялась обратная связь по решению, были исследованы в работах Дж. К. Хэнкока и В.К. Линдсея [6] и Дж. Г. Проакиса, П.Р. Дроуилхела и **Р. Прайса** [7].

ФИЛИПП БЕЛЛО

Филипп Белло родился 22 октября 1929 г. в Лунне, штат Массачусетс. Он получил степень бакалавра в Северо-восточном университете в 1953 г. и, продолжив свое образование в Массачусетском технологическом институте (МТИ), получил магистерскую и докторскую степени в области электротехники соответственно в 1955 и 1959 гг. В 1957–1959 гг. Ф. Белло вел преподавательскую работу в качестве доцента в Северо-восточном университете. Однако его дальнейшая карьера связана с работами в области цифровой связи, выполняемыми по заказам Министерства обороны США. Он участвовал в разработках систем секретной связи, предназначенных для передачи голосовых сообщений, адаптивных систем и систем с обратной связью.

В 1965 г. Ф. Белло стал вице-президентом компании «Singatron», в которой велись разработки радио- и гидроакустических систем. Доктором Ф. Белло написано более 60 научных статей. Некоторые из них вошли в сборники выдающихся работ в области связи, опубликованные издательством IEEE Press в 1975 г. (Kenneth Brayer, Ed., *Data Communication via Fading Channels*) и 1976 г. (Bernard Goldberg, Ed., *Communication Channels: Characterization and Behavior*). Им были выполнены важные работы, в которых он предложил математические модели каналов связи с частотно-селективными и быстрыми замираниями. Эти модели он использовал и в своих исследованиях помехоустойчивости систем передачи данных по коротковолновым и тропосферным каналам связи. Ф. Белло принадлежат не только важные теоретические работы, но и крупные разработки и экспериментальные исследования. К их числу относятся: создание широкополосного имитатора многолучевого канала связи, разработка модемов, в которых использовались коды, корректирующие ошибки. Он был первым, кто на основе алгоритма Витерби создал адаптивный эквалайзер, корректирующий частотную характеристику многолучевого канала связи.

В компании «Mitre Corp» Ф. Белло руководил разработкой широкополосного модема типа «Rake» для КВ-канала. В этой же компании им было создано программное обеспечение имитации радиоканалов связи.



4.2. Компенсация межсимвольной интерференции

Многолучевость в радиоканале вызывает временное рассеяние сигналов и межсимвольные искажения (МСИ), ограничивая тем самым скорость передачи цифровых сигналов. Следует отметить, что, разложив частотную характеристику любого канала связи с ограниченной полосой частот (например, узкополосного телефонного канала связи) в ряд Фурье, можно получить его модель в виде линии задержки с отводами, т.е. такой канал можно рассматривать как канал с многолучевостью.

Первые важные результаты передачи сигналов по каналу с МСИ были получены в 1928 г. в классической работе **Г. Найквиста** [8], где были определены ограничения на скорость передачи сообщений в канале с ограниченной полосой частот.

С начала 60-х гг. в связи с широким внедрением цифровых систем передачи проблема оптимального приема сигналов в условиях МСИ приобрела актуальность. В этой области были проведены плодотворные исследования, которые касались как синтеза оптимальных корректоров частотных характеристик канала связи, так и исследования помехоустойчивости приема сигналов в системах, в которых эти корректоры применялись.

Методы борьбы с МСИ можно разделить на два принципиально отличающихся класса. К первому из них относятся методы, основанные на использовании традиционных способов передачи сигналов по каналам связи без МСИ и применении специальных алгоритмов приема сигналов, повышающих помехоустойчивость их приема при наличии МСИ. В этом классе методов можно выделить методы линейной коррекции канала связи, восстанавливающие форму передаваемого сигнала и тем самым уменьшающие влияние МСИ на помехоустойчивость приема, и нелинейные методы оптимального приема сигналов в каналах с МСИ. Ко второму классу относятся методы, включающие синтез оптимальных сигналов, которые передаются по каналу с МСИ, и оптимального приемника таких сигналов.

Профессор ПГАТИ **Д.Д. Кловский** был одним из первых ученых, выполнивших в 1958 г. исследования оптимальных методов приема в каналах с МСИ [9]. Для борьбы с межсимвольной интерференцией он предложил систему передачи с испытательным импульсом (СИИП). В этой системе сигнал передавался не непрерывным потоком, а блоками конечной длины, содержащими N символов. Блоки отделялись один от другого L защитными интервалами ($L \ll N$), гарантирующими отсутствие МСИ между ними на выходе канала. Эта идея сегодня является общепринятым положением при создании систем передачи сообщений по каналам с МСИ. Кроме того, в системе СИИП перед передачей информационного пакета цифровых сигналов по каналу периодически передавался испытательный импульс. На приеме измерялась переходная характеристика канала связи, и на основе результатов этих измерений и решений, принятых по ранее пришедшим в место приема сигналам, осуществлялась компенсация межсимвольных искажений в принимаемом пакете информационных сигналов.

Система СИИП представляла собой первую субоптимальную систему посимвольного приема сигналов с обратной связью по решению (ОСР) в канале с МСИ. В лаборатории ПГАТИ Д.Д. Кловским [9] и Б.И. Николаевым [10] было разработано и успешно испытано на коротковолновой линии связи устройство, работающее на описанном принципе. В 1960–1988 гг. Д.Д. Кловским совместно со своими ученика-

ми были проведены теоретические исследования возможностей компенсации межсимвольных искажений в каналах связи, позволившие определить оптимальные алгоритмы обработки сигналов в каналах связи с МСИ и оценить их помехоустойчивость.

В США идея использования ранее принятых решений (ОСР) для борьбы с МСИ была предложена в 1967 г. М. Остиным [11]. В дальнейшем она развивалась многими исследователями (*Р. Прайсом* [12], К. Бельфиоре и Дж. Парком [13] и др.), рассмотревшими вопросы синтеза линейного фильтра в цепи обратной связи, назначением которого является минимизация величины МСИ на входе решающего устройства.

В каналах с МСИ задача оптимального приема сигналов сводится к приему в целом совокупности сигналов, образованных при передаче блоков из N информационных символов. Обычные алгоритмы оптимального приема весьма сложны, и для них количество требуемых операций растет с увеличением N по экспоненциальному закону — как $\exp(\beta N)$. Важное исследование оптимального приема сигналов в каналах связи с конечным временем рассеяния сигналов было опубликовано в 1966 г. Р. Чангом и Дж. Хэнкоком [14]. Авторы показали, что проблема оптимального приема сводится к определению наиболее вероятных состояний цепи Маркова. При этом сложность обработки сигналов оценивается как $\exp(\beta L)$, что существенно ниже сложности обычных алгоритмов оптимального приема сигналов в каналах с МСИ.

Значительную роль в создании устройств для оптимального приема сигналов в условиях МСИ сыграл алгоритм Витерби, предложенный им в 1967 г. для декодирования сверточных кодов. В 1972 г. американский ученый Г. Форни [15] и японские ученые Г. Кабаяши [16] и Дж. Омуре [17] указали на возможность его применения для оптимального приема сигналов в каналах с МСИ и выполнили первые исследования в этом направлении. Сложность этого алгоритма также оценивается как $\exp(\beta L)$.

Дальнейшее развитие в технике связи получили линейные методы борьбы с МСИ. Первые работы по адаптивной компенсации МСИ были выполнены в 1961 г. немецким исследователем Е. Кетелем [18].

В США Д.В. Тафтсом [19], М. Дж. ди Торо [20], *Р.В. Лакки* [21] и рядом других ученых в середине 60-х гг. были исследованы возможности применения линейных адаптивных корректоров переходной характеристики каналов связи с ограниченной полосой частот. Первый из упомянутых ученых рассмотрел проблему выбора оптимальной формы сигналов, позволяющих минимизировать уровень МСИ на входе решающего устройства в приемнике. Адаптивные корректоры МСИ были выполнены в виде линий задержки с отводами, соединенными через управляемые аттенюаторы с общим сумматором.

Корректор очищает принимаемый сигнал от МСИ. Аттенюаторами автоматически управляют таким образом, чтобы остаточная величина МСИ на выходе сумматора была минимальна. Подобные корректоры стали широко применять в сети коммутируемых телефонных каналов связи, что позволило существенно (с 2,4 до 100 Кбит/с) повысить скорость передачи сообщений. Их используют также в высокоскоростных цифровых радиорелейных системах, в распространенных сотовых системах стандарта GSM и других системах связи.

Методы борьбы с МСИ, относящиеся ко второму классу, основаны на оптимизации как приемника, так и передатчика сигналов. Они существенно уменьшают сложность приемника по сравнению с наилучшими образцами и позволяют приблизиться

к потенциальным возможностям передачи цифровых сигналов в каналах с МСИ. Эти методы основаны на теореме эквивалентности гауссовского канала связи с МСИ, обладающего известной переходной характеристикой, N -независимым каналам без МСИ. Такая эквивалентность вытекает из теории интегральных уравнений. Эта теория устанавливает возможность разложения переходной характеристики канала связи в ряд Карунена—Лоэва по соответствующим ортогональным функциям. Эти функции могут служить переносчиками информационных сигналов в таком канале. Американский ученый Р.С. Кеннеди был, по-видимому, первым [1], кто использовал в конце 60-х гг. эту теорию для синтеза оптимальных сигналов, предназначенных для передачи сообщений в каналах с временным рассеянием.

Многие оригинальные и важные в прикладном отношении результаты в данном направлении были получены в начале 80-х гг. российским ученым Д.Л. Коробковым. В работе [22] приведены исследования вопросов выбора оптимальных сигналов для каналов с МСИ на основе применения в каждом из N -независимых каналов многопозиционных сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ), определены потенциальные возможности передачи цифровых сигналов по каналам с МСИ (скорость передачи и помехоустойчивость приема) и рассмотрены возможности создания адаптивных систем передачи сигналов по реальным каналам с МСИ с изменяющимися во времени параметрами.

Разработки всех современных систем передачи сигналов по каналам с МСИ основаны на результатах научных исследований за последние 40 лет. В том случае, когда уровень МСИ в канале незначителен и охватывает небольшое число символов, наиболее простым и эффективным является применение адаптивных корректоров переходной характеристики канала связи либо систем с ОСР. Когда этот уровень значителен, при разработке устройств, предназначенных для борьбы с МСИ, целесообразно использовать оптимальные или субоптимальные методы приема сигналов, а также проводить совместную оптимизацию как приемника, так и передатчика.

Роберт ЛАККИ

Известный американский ученый Роберт Лакки родился 9 января 1936 г. в г. Питсбурге (США). В 1957 г. он окончил университет в г. Пурдю и получил степень бакалавра в области электротехники. В этом же университете он получил магистерскую и докторскую степень в 1959 и 1961 гг. После завершения своего образования он стал работать в Белл-лаборатории, занимаясь проблемами передачи цифровых сигналов по телефонным линиям связи. Доктор Р. Лакки в 1965—1966 гг., работая в Белл-лаборатории, предложил и теоретически обосновал алгоритм работы адаптивного корректора линейных искажений,



возникающих в телефонных каналах связи и вызывающих межсимвольную интерференцию. Такие корректоры стали применяться во всех модемах, работающих в каналах, в которых имеет место межсимвольная интерференция. Эти разработки принесли ему мировую известность.

Когда Р. Лакки в 1961 г. начал работать в Белл-лаборатории, существующие модемы позволяли по телефонным каналам связи передавать сообщения со скоростью, не превышающей 2400 бит/с. Адаптивный корректор Р. Лакки, созданный в 1965 г., сделал возможным повысить эту скорость до 9600 бит/с. Сегодня во всех высокоскоростных модемах, предназначенных для работы по телефонным каналам связи, применяются адаптивные корректоры. Это позволяет передавать данные со скоростями до 112 Кбит/с.

В 1982 г. Р. Лакки стал исполнительным директором отдела, занимавшегося научными исследованиями в области связи в Белл-лаборатории. В этом отделе велись разработки новых методов и технологий для будущих телекоммуникационных систем. В 1992 г. он оставил Белл-лабораторию, став вице-президентом компании Беллкор, в которой он руководил проводимыми в ней прикладными исследованиями.

Доктор Р. Лакки является активным членом Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) и членом Национальной инженерной академии. Он входил в совет директоров и был вице-президентом IEEE. Он входит в состав многих советов университетов и правительственных организаций. В 1986–1989 гг. он был председателем Правительственного консультативного научного комитета военно-воздушных сил США.

Р. Лакки имеет 11 патентов и является автором учебника «Принципы цифровой связи», научно-популярной книги «Силиконовые сны», в которой обсуждаются технические и философские аспекты проблемы обработки информации человеком и компьютером, а также книги «Лакки снова бастует. Последняя книга представляет собой сборник его статей, регулярно публиковавшихся начиная с 1982 г., в журнале «Spectrum Magazine», в которых в юмористической форме излагались философские взгляды автора на профессию инженера в области телекоммуникации и на развитие технологии. Он является почетным доктором нескольких университетов. В 1987 г. он стал лауреатом престижной международной премии Маркони, которая была ему присуждена за изобретение автоматических корректоров, создавших необходимые предпосылки для развития цифровой связи во всем мире. Он награжден медалью Эдисона, присужденной IEEE, а также медалью отличия военно-воздушных сил США.

§ 5. Оценка параметров сигналов

5.1. Основы теории оценки параметров сигналов

В 1947 г. **В.А. Котельниковым** была разработана теория потенциальной помехоустойчивости, одним из разделов которой явилась теория оптимальной оценки параметров передаваемых сигналов.

Задача оптимальной оценки параметров сигналов, принимаемых на фоне случайного гауссовского шума, была сформулирована В.А. Котельниковым следующим образом. Необходимо определить алгоритм обработки принимаемого сигнала

$$r(t) = s(t, A) + n(t), \quad 0 < t < T, \quad (1)$$

который позволял бы с наивысшей точностью измерять информационный параметр A . Эта точность определяется средним значением квадрата ошибки измерения. Теория должна давать также инструмент для количественного определения потенциально достижимой точности измерения параметра A .

В формуле (1) $s(t, A)$ — полезный сигнал (вид которого известен), зависящий от параметра A , T — его длительность, а $n(t)$ — «белый» гауссовский шум со спектральной плотностью N_0 (в общем случае шум может иметь неравномерный энергетический спектр). Для случая амплитудной модуляции сигнал $s(t, A)$ имеет вид $s(t, A) = A \sin(\omega t + \varphi)$, при частотной модуляции $s(t, A) = E_0 \sin(\omega + \beta A)t$, для случая времяимпульсной (фазиоимпульсной) модуляции $s(t, A) = E_0 F(t - A) \sin(\omega t + \varphi)$. Здесь E_0 — амплитуда принимаемого сигнала, b — индекс частотной модуляции, $F(t)$ — функция, описывающая форму принимаемого импульса (например, $F(t) = \exp[-(t - A)^2/T_0]$, где A — временное положение принимаемого импульса, а $T_0 < T$ — параметр, определяющий его длительность).

В знаменитой работе **В.А. Котельникова** [1] рассмотрены задачи, связанные с системами передачи отдельных значений информационных параметров сигналов по каналам связи, и получены оценки параметров сигналов в случаях, когда эти параметры передаются методами модуляций амплитудной (АМ), частотной (ЧМ), фазовой (ФМ), амплитудно-импульсной (АИМ) и времяимпульсной (ВИМ). Была показана принципиальная возможность повышения помехоустойчивости приема сигналов без увеличения их энергии, длительности и ширины спектра.

В.А. Котельников дал геометрическое толкование полученных им результатов и сделал важный в теоретическом и практическом отношении вывод, что при любых видах модуляции «...чрезмерное увеличение помехоустойчивости для малых помех без увеличения удельной энергии сигнала, ширины его спектра и длительности должно обязательно сопровождаться увеличением вероятности аномальных ошибок...». Трактовка процесса модуляции как отображения значений информационного параметра на точки сложной линии передаваемого сигнала в многомерном пространстве, предложенная В.А. Котельниковым, давала ясное объяснение явлению наступления порога при приеме сигналов со сложными видами модуляции (например, ЧМ). Суть этого важного для техники связи явления заключается в том, что при больших отношениях сигнал/шум на входе приемника точность измерения информационного параметра изменяется пропорционально уровню принимаемого сигнала. Если же этот уровень становится ниже порогового, то при его дальнейшем снижении эта точность начинает уменьшаться весьма быстро. В последующие десятилетия исследованию пороговых явлений при приеме сигналов с разными видами модуляции были посвящены многие работы. Ряд таких работ основывался на идеях, выдвинутых В.А. Котельниковым.

Теория В.А. Котельникова была опубликована и получила широкую известность только в 1956 г. Эта работа оказала в дальнейшем сильное влияние на развитие оптимальных методов приема сигналов. Однако интенсивные научные исследования в данном направлении начались в 1950—1952 гг. после публикации работ английского ученого Ф. Вудворта [2]. Он рассмотрел типичные для радиолокации задачи измерения параметров сигналов, по которым можно определить дальность до лоцируемого объекта, скорость его передвижения и т.п.

В.А. Котельниковым и Ф. Вудвортом было показано, что оптимальный алгоритм обработки принимаемого сигнала состоит в следующем. В приемнике должен вычисляться логарифм правдоподобия $\Lambda(A)$ (логарифм условной вероятности того, что было передано значение информационного параметра A):

$$\Lambda(A) = \int_0^T r(t)s(t, A)dt - (1/N_0) \int_0^T s^2(t, A)dt. \quad (2)$$

Оптимальный алгоритм оценки параметра A представляет собой процедуру определения такого значения A^* , при котором функция $\Lambda(A)$ принимает максимальное значение.

Один из возможных способов определения A^* состоит в том, что эта функция вычисляется для многих значений A , взятых во всей области возможных изменений информационного параметра. То значение A^* , которое обеспечивает максимум $\Lambda(A)$, и является оптимальной оценкой A . На рис. 3.1 показана схема устройства, реализующего данный метод определения A^* .

Такой подход был впервые разработан В.А. Котельниковым для приема сигналов АМ, ЧМ, ВИМ и других, а для задачи радиолокационного измерения дальности он независимо был разработан Ф. Вудвортом.

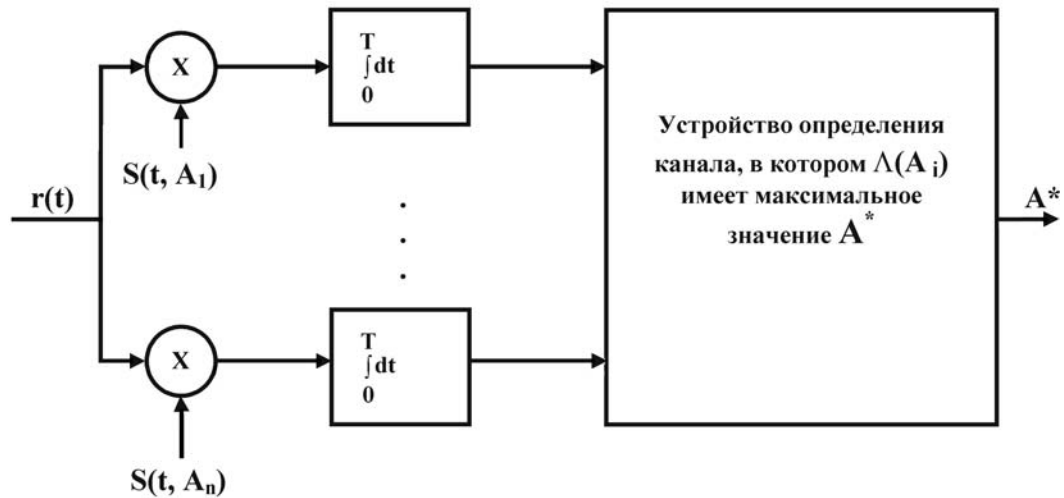


Рис. 3.1

Другой подход состоит в том, что для нахождения значения A^* , дающего максимум $\Lambda(A)$, используется уравнение:

$$\frac{d\Lambda(A)}{dA} = 0. \quad (3)$$

На рис. 3.2 показана схема оптимального устройства, реализующего данный метод определения A^* .

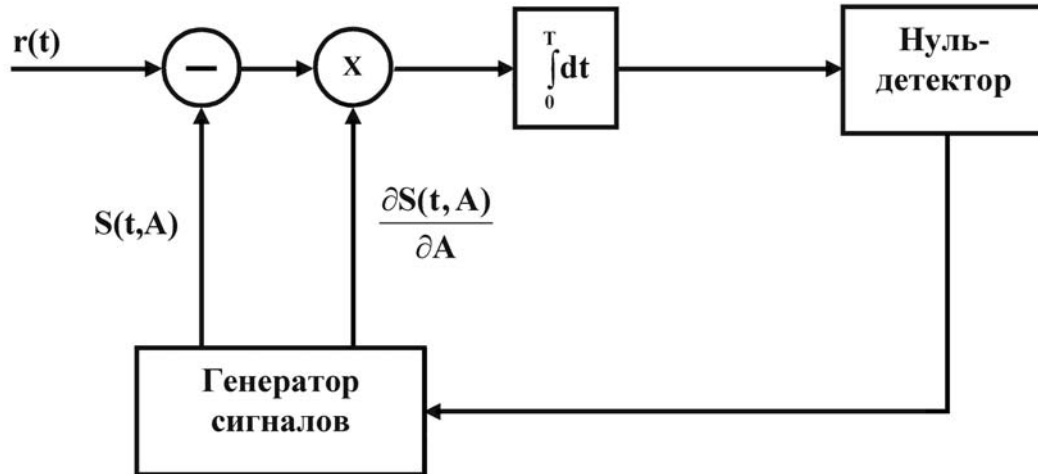


Рис. 3.2

Схемы оптимальных устройств оценки параметра A сложны в реализации. Однако на основании уравнения (2) можно найти более простой алгоритм оценки параметра A , который приводит к схеме дискриминатора. При оценке параметра сигнала с помощью дискриминатора он сравнивается с некоторым фиксированным значением A_f . В результате такого сравнения вырабатывается сигнал рассогласования, пропорциональный отклонению оцениваемого параметра от фиксированного. Если функцию $\frac{d\Lambda(A)}{dA}$ представить рядом Тейлора, то приближенно (3) можно записать так:

$$\frac{d\Lambda(A)}{dA} \cong \frac{d\Lambda(A_f)}{dA} + (A^* - A_f) \frac{d^2\Lambda(A_f)}{d^2A} = 0.$$

Отсюда следует, что

$$A^* = A_f - \frac{d\Lambda(A_f)}{dA} / \frac{d^2\Lambda(A_f)}{d^2A}.$$

В ряде случаев синтез дискриминатора, предназначенного для оценки параметра, приводит к устройствам, которые были хорошо известны еще до появления теории потенциальной помехоустойчивости. Например, синтезированная схема дискриминатора для оценки частоты принимаемого сигнала практически не отличается от частотных дискриминаторов, известных инженерам еще с 30-х гг. XX в.

В.А. Котельников и Ф. Вудворт установили общую формулу, которая при большом уровне полезного сигнала определяет точность оценки параметра A :

$$\sigma_A^2 \approx N_0 / 2 \int_0^T \left[\frac{\partial S(t, A)}{\partial A} \right]^2 dt.$$

Важным вкладом в теорию оценок параметров сигналов явились статьи **Д. Миддлтона** и **Д. Ван Метера** [3], в которых эта теория строилась на строгом фундаменте статистических методов, созданных крупными математиками в XX в. Эти методы были развиты **Р.А. Фишером**, предложившим еще в 1921 г. для оценки параметров законов распределения вероятностей по эмпирическим наблюдениям метод максимального правдоподобия, и математиками **Г.А. Крамером**, **К.Р. Рао**, **У. Гренандером** и **А. Вальдом**, развивавшими эти методы в 1945–1950 гг.

В книге **Д. Миддлтона** [4] упомянутые методы изложены применительно к задачам теории связи. На этой основе были разработаны методы совместной оценки нескольких параметров, от которых зависит принимаемый сигнал, рассмотрены задачи оценки амплитуды принимаемого сигнала как при когерентном, так и при некогерентном (когда фаза принимаемого сигнала случайна) методах приема. В книге [4] показана возможность применения неравенства Крамера–Рао для получения нижней границы среднеквадратической ошибки оценки параметров сигнала. В области высоких отношений сигнал/шум такая оценка оказывается достаточно точной. **Д. Миддлтон** предложил методы получения оценок параметров сигналов, оптимальных по разным критериям: максимального правдоподобия, максимальной апостериорной вероятности и байесовскому при различных функциях стоимости.

Все основные результаты теории оценки параметров сигналов систематически изложены в фундаментальной монографии **Г. Ван Триса** [5] и в книге **В.И. Тихонова** [6].

5.2. Применение теории для решения практических задач

Теория оценки параметров сигналов получила широкую популярность и была применена в последующие годы многими крупными учеными для решения практических задач.

Задачи оценки параметров сигнала в системах с одним каналом приема. К таким задачам относятся задачи, связанные с приемом информационных сообщений, передаваемых разными методами по каналам связи. Ряд подобных задач был рассмотрен самим **В.А. Котельниковым**. Начатые им исследования были продолжены многими учеными. Профессор **А.Ф. Фомин** рассмотрел [7] широкий класс систем передачи информационных параметров с помощью аналоговых и импульсных методов модуляции и определил достижимую точность оценки этих параметров с учетом аномальных ошибок.

К этому же кругу задач относятся радиолокационные задачи, связанные с определением дальности лоцируемого объекта, его скорости, ускорения и угловых координат (азимута и угла места) при использовании одной приемной антенны. Американский ученый **Д. Слепян** [8] применил эту теорию к задаче совместной оценки времени прихода и частоты принимаемого сигнала (измерение времени прихода позволяет определить дальность от радиолокатора до объекта, а измерения частоты — доплеровский сдвиг частоты, который определяется его скоростью). Он же дал обобщение данной теории на случай, когда шум, воздействующий на прием сигналов, не является «белым». Другой ученый **Ф. Белло** рассмотрел задачу [9] совместной оценки времени прихода, частоты и скорости изменения частоты (которая определяет ускорение лоцируемого объекта) принимаемого сигнала. **П. Сверлинг** был первым, кто исследовал максимальную точность определения угловых координат объекта импульсной радиолокационной станцией [10].

Важные исследования возможностей измерения угловых координат объектов по методу сканирования диаграммы направленности антенны радиолокатора были выполнены профессором **С.Е. Фальковичем** [11]. Метод сканирования состоит в том, что для повышения угловой разрешающей способности радиолокатора обзор пространства ведется за счет перемещения антенны в пространстве. Если антенна находится на земле, то сканирование осуществляется вращением антенны вокруг некоторой оси, жестко связанной с конструкцией антенны. Если же она установлена на борту самолета или искусственного спутника Земли, то ее сканирование проводится за счет движения летательного аппарата. Амплитудная диаграмма направленности (ДН) сканирующей антенны может быть достаточно широкой, однако ее фазовая диаграмма должна иметь существенную нелинейность. Из-за сканирования антенны, обладающей нелинейной фазовой ДН, законы изменения частоты сигналов, отраженных от каждого из лоцируемых объектов, угловые координаты которых различны, существенно отличаются. Это позволяет повысить разрешающую способность радиолокатора и разделить разные объекты даже в том случае, если все они находятся в основном лепестке ДН антенны и их угловые координаты отличаются незначительно.

Отечественными учеными Е.И. Куликовым и А.П. Трифоновым [12] был рассмотрен широкий круг задач, связанных с отдельной и совместной оценкой как энергетических, так и неэнергетических параметров сигналов для различных априорных данных о принимаемом сигнале. Ими были исследованы различные (оптимальные и субоптимальные) методы оценки параметров, получены структуры соответствующих устройств, рассмотрены конкретные примеры отдельных и совместных оценок длительности, амплитуды, временного положения, частоты, фазы и других параметров сигналов.

Широкую известность среди специалистов получила монография **Л.А. Вайнштейна** и В.Д. Зубакова [13], вышедшая в 1960 г. в нашей стране и позже опубликованная в переводе на английский язык в США. В этой монографии, в частности, впервые была рассмотрена задача совместного обнаружения сигнала и оценки его параметров. Подобная же задача была исследована позже **Д. Миддлтоном** и Р. Эспозито [14].

Важнейшая проблема радиосвязи — обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) радиосредств (РЭС), работающих в общих полосах частот, за счет применения компенсаторов помех (КП). Другая важная проблема связана с повышением эффективности использования радиочастотного спектра. Для ее решения необходимо найти такие способы передачи сигналов, которые позволяли бы в одном частотном канале передавать с высокой помехоустойчивостью несколько информационных сообщений. Теория оценок параметров сигналов дает подход к решению и этих проблем.

В работе М.А. Быховского [15] показана возможность разделения двух ЧМ-сигналов, занимающих общую полосу частот. Показано, что если оба сигнала формируются на передающем конце одной линии связи и они синхронизированы, то их разделение возможно даже в том случае, если оба они имеют одинаковые амплитуды. Эта позволяет увеличить пропускную способность систем связи с ЧМ.

Лев Альбертович ВАЙНШТЕЙН

Выдающийся отечественный ученый Лев Альбертович Вайнштейн родился 6 декабря 1920 г. в Москве. Его отец Альберт Львович Вайнштейн — экономист, мать Мария Андреевна Балашова — служащая. Отец в 1941 г. был репрессирован и восемь лет находился в Карагандинском лагере. Среднюю школу Л.А. Вайнштейн окончил в 1938 г. и тогда же поступил на физический факультет Московского государственного университета, после окончания которого в 1943 г. был оставлен в аспирантуре. Его научным руководителем был академик М.А. Леонтович. В 1947 г. Л.А. Вайнштейн защитил диссертацию на тему «Теория дробового эффекта при наличии пространственного заряда» и ему была присвоена ученая степень кандидата физико-математических наук. По окончании аспирантуры в 1946 г. он работал в одном из московских НИИ до 1957 г., сначала в должности ведущего инженера, затем — старшего научного сотрудника, а с 1953 г. — начальника лаборатории.

Докторскую диссертацию на тему «Дифракция электромагнитных и звуковых волн на открытом конце волновода» Л.А. Вайнштейн защитил в марте 1952 г. В 1957 г. он по рекомендации академика А.В. Фока перешел на работу в Институт физических проблем АН СССР, где и работал в должности ведущего научного сотрудника. В это время на его научные интересы большое влияние оказал директор института — нобелевский лауреат академик П.Л. Капица. В 1966 г. Л.А. Вайнштейн был избран членом-корреспондентом АН СССР.

Круг научных проблем, которыми занимался и успешно решал Л.А. Вайнштейн, весьма широк. Основное направление его научной деятельности было связано с электродинамикой и электроникой. Однако в конце 50-х гг. он выполнил весьма важные исследования в области статистической теории связи. Результаты этих исследований вошли в монографию «Выделение сигнала на фоне случайных помех», написанную им совместно с В.Д. Зубаковым и изданную в 1960 г. В этой книге были рассмотрены и последовательно изложены теория оптимальной линейной фильтрации сигналов Винера—Колмогорова и теория согласованных фильтров. В основной части книги приведена теория оптимального обнаружения сигнала на фоне помехи гауссовского стационарного случайного процесса. Рассмотрен ряд задач, представляющих интерес для радиолокации, таких как обнаружение сигнала с неизвестной амплитудой и фазой, обнаружение когерентной и некогерентной пачки импульсов с учетом скорости движения лоцируемого объекта, рассмотрена проблема радиолокационного обнаружения «мерцающей» цели, а также проблема измерения параметров сигнала (времени прихода и частоты), определяющих расстояние до



объекта и его скорость. Данная монография содержала ряд новых, важных для проектирования радиолокационных систем результатов. Она получила широкую известность и была издана в США.

Другой цикл работ Л.А. Вайнштейна связан с теорией передачи сигналов и некоторыми смежными вопросами, базирующимися на концепции аналитического сигнала. Их результаты изложены в монографии «Разделение частот в теории колебаний и волн», написанной им совместно с Д.Е. Вакманом и изданной в 1983 г. В ней представлены новые результаты, касающиеся математического описания колебательных процессов с помощью аналитического сигнала, применения концепции аналитического сигнала для решения некоторых задач радиофизики, связанных с нелинейными и параметрическими колебаниями в различных системах, исследования движения заряженных частиц в сильном магнитном поле, нелинейных волн в различных средах. В книге также развита квантовая теория фотодетектирования оптического излучения и исследованы задачи, связанные с воздействием шумов на генератор электрических колебаний.

В самом начале научной деятельности Л.А. Вайнштейн методом факторизации (метод Винера—Хопфа) решил труднейшую задачу, важную для последующего развития теории дифракции, — задачу об излучении из открытого конца волновода. По своей значимости эта работа сопоставима лишь с другой классической ключевой задачей — о дифракции волны на клине, решение которой было получено пятьюдесятью годами ранее знаменитым немецким физиком А. Зоммерфельдом. Постановлением Президиума АН СССР в 1948 г. Л.А. Вайнштейну была присуждена премия им. Мандельштама за лучшую работу в области радио. Решение этой проблемы оказалось особенно важным в связи с бурным развитием в 40-х гг. радиотехники сверхвысоких частот.

Большая часть указанных результатов Л.А. Вайнштейна изложена в двух его монографиях: «Дифракция электромагнитных и звуковых волн на открытом конце волновода» (1953 г.) и «Теория дифракции и метод факторизации» (1966 г.). Эти работы были высоко оценены специалистами многих стран.

Л.А. Вайнштейном было написано более 160 научных работ и 9 монографий, получивших мировое признание. Многие его результаты считаются классическими.

Помимо чисто научной, Л.А. Вайнштейн вел большую педагогическую и организационную деятельность. С 1954 г. в течение ряда лет он читал в МФТИ лекции по электродинамике СВЧ и на этой основе написал монографию «Электромагнитные волны» (1957 г.), которая стала настольной книгой специалистов по радиофизике. У него было много учеников, целая научная школа. В 1957 г. ему присвоено звание профессора.

Научные заслуги Л.А. Вайнштейна были отмечены двумя орденами «Знак почета» и медалями, а в 1990 г. ему посмертно была присуждена Государственная премия.

Лев Альбертович Вайнштейн скончался 8 сентября 1989 г.

Задачи оценки параметров сигнала в системах с несколькими независимыми каналами приема. К данному классу задач относятся радиолокационные задачи, связанные с оптимальной пространственно-временной обработкой сигналов, а также с созданием многоканальных КП для обеспечения ЭМС различных систем связи, работающих в одном и том же частотном канале.

В начале 60-х гг. ученые стали применять теорию статистических решений к проблемам приема пространственно-временных сигналов. Такие проблемы возникают, например, в радио- и гидролокации. При пространственно-временной обработке сиг-

налов используют линейные, двухмерные или трехмерные антенные решетки. При этом временная обработка сигналов в каналах, подсоединенных к элементам решетки, расположенным в различных точках пространства, получается различной. Поэтому для реализации оптимального приема сигналов требуется их совместная пространственно-временная обработка.

В работах Ф. Бруна [16], Д. Миддлтона, Г. Грогински [17] и Г. Янга [18] были получены структуры приемников, осуществляющих оптимальную обработку пространственно-временных сигналов, рассмотрены задачи обнаружения одной или нескольких целей в среде с помехами реверберационного типа, рассмотрены задачи оценки амплитуды сигнала, отраженного от цели, ее дальности и угловых координат. Кроме того, Г. Ван Трисом [19] был разработан метод синтеза сигналов, оптимальных для таких условий приема. В статьях Д. Миддлтона [20], Г. Янга и Дж. Ховарда [21] представлены результаты, полученные до 1970 г. американскими учеными.

В данном направлении активно вели исследования и отечественные ученые. Важных результатов добились профессора **С.Е. Фалькович** [11] и И.Н. Амиантов [22]. В [11] были получены структуры оптимальных устройств обработки сигналов, исследованы проблемы пеленгации неподвижных и подвижных целей и рассмотрены вопросы влияния на оптимальный прием сигналов мультипликативных и аддитивных помех. В [22] был выполнен синтез оптимальных четырехканальных моноимпульсных измерителей угловых координат (система Пэйджа) источников гармонического и шумоподобного излучения. Данная система имеет четыре парциальных антенны, выходы которых связаны с отдельными каналами приема. Центры ДН этих антенн (направления максимального излучения и приема) расположены на биссектрисах координатных углов.

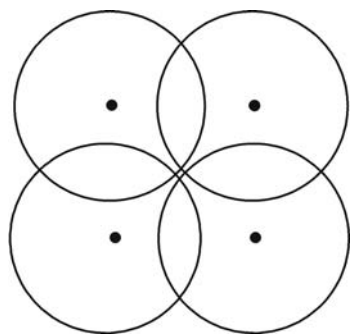


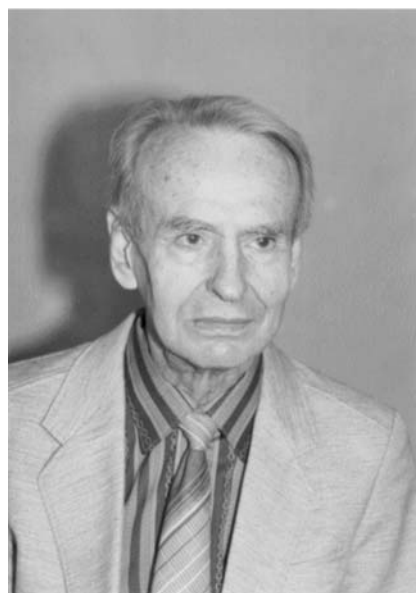
Рис. 3.3

Началом координат является точка пересечения всех четырех парциальных диаграмм, которая определяет равносигнальное направление, как показано на рис. 3.3. Изменение положения цели относительно равносигнального направления приводит к изменениям амплитуды и фазы сигналов в парциальных каналах приема. Амиантовым были получены оптимальные алгоритмы обработки сигналов в данной системе при их когерентном и некогерентном приемах и определена достижимая точность измерения угловых координат целей [22]. Кроме того, им было выполнено обстоятельное исследование фазовых методов измерения угловых координат целей, основанных на сравнении фаз колебаний, принятых несколькими элементами, образующими двухмерную антенную решетку.

Проблема синтеза оптимальных многоканальных КП, позволяющих обеспечить ЭМС систем приема информационных сообщений при радиопомехах, приводит к задачам, относящимся к классу тех, которые рассматриваются в данном разделе. Эта проблема важна для радиорелейных и спутниковых линий связи, в которых на ограниченной территории в одном и том же частотном канале работают несколько радиостанций. Для часто встречающегося на практике случая, когда для передачи информа-

ционных сообщений используется ЧМ и прием сигналов, приходящих с разных направлений, осуществляется с помощью двух приемных антенн, синтез и анализ оптимальных и субоптимальных КП был выполнен М.А. Быховским [23]. Исследование показало, что применение КП является весьма эффективным средством борьбы с радиопомехами в системах связи.

Савелий Еремеевич Фалькович



Савелий Еремеевич Фалькович — крупный отечественный ученый в области статистической теории связи. Он родился 13 февраля 1920 г. в г. Краснодаре. После окончания школы в 1937 г. он поступил в Московский энергетический институт (МЭИ), однако окончить МЭИ не смог в связи с началом Великой Отечественной войны. В самом ее начале — 22 июня 1941 г. он записывается добровольцем в армию, однако по приказу министра обороны его вместе с группой студентов МЭИ направляют на учебу в Ленинградскую военно-воздушную академию (ЛВВА) им. Можайского. С 1943 г. С.Е. Фалькович находится в действующей армии в качестве заместителя штурмана полка по радионавигации.

После окончания войны С.Е. Фалькович поступает в адъюнктуру ЛВВА. Успешно окончив ее в 1949 г. и защитив кандидатскую диссертацию, он направляется в Харьковское высшее военное инженерное училище, в котором возглавляет кафедру приемных устройств и телеметрии. Докторскую диссертацию он защитил в 1961 г. Демобилизовавшись в 1968 г. из армии, С.Е. Фалькович становится заведующим кафедрой радиотехнических систем Харьковского авиационного института, в котором работает в должности профессора и в настоящее время.

В середине 50-х гг. XX в. С.Е. Фалькович приступает к созданию статистической теории пространственно-временной обработки сигналов и разработке ее приложений к синтезу измерительных радиотехнических систем. К таким системам прежде всего относятся системы радиолокации, радионавигации, дистанционного зондирования, траекторных измерений, радиотеплолокации, радиоастрономии и радиотелеметрии. Под его руководством в Харькове формируется научная школа пространственно-временной обработки сигналов.

В его собственных работах и в работах его учеников были получены фундаментальные результаты в области статистической теории решений, оценивания и фильтрации электромагнитных полей функций времени и пространственных координат. На основе системного подхода ими были синтезированы структурные схемы формирования и обработки сигналов в оптимальных радиотехнических системах.

С.Е. Фалькович является автором научных монографий, в которых созданная В.А. Котельниковым теория потенциальной помехоустойчивости получила дальнейшее развитие. В 1961 г. вышла его книга «Прием радиолокационных сигналов на фоне флуктуационных помех», в 1970 г. — «Оценка параметров сигналов», в 1981 г. — «Статистическая теория измерительных систем», а в 1989 г. — «Оптимальный прием пространственно-временных сигналов в радиоканалах с рассеянием».

Помимо книг он опубликовал более 150 научных работ. С.Е. Фалькович является не только крупным ученым, но и замечательным педагогом, подготовившим более 50 кандидатов и 10 докторов технических наук. Научные достижения С.Е. Фальковича отмечены присуждением ему Государственной премии СССР «За цикл работ по статистической теории радиоэлектронных систем».

5.3. Методы определения потенциальной точности оценки параметров сигналов

При высоком уровне принимаемого сигнала точность оценки его параметров (среднеквадратичная величина погрешности оценки) близка к границе, даваемой неравенством Крамера—Рао. Однако при его уменьшении ниже определенного порогового уровня наступает резкое ухудшение помехоустойчивости, т.е. снижение точности оценки параметров сигнала. На практике представляет интерес определение этого порогового уровня и зависимость точности оценки параметров сигналов от уровня принимаемого сигнала при его значениях, лежащих как выше, так и ниже порогового.

Неравенство Крамера—Рао для оценки точности определения параметров разных сигналов применялось в очень многих работах [8–13, 15, 22]. Пороговый уровень и зависимость точности оценки параметров сигналов при уровнях принимаемого сигнала, лежащих ниже порогового, может быть определена, если, следуя **В.А. Котельникову**, рассматривать оптимальный многоканальный приемник (см. рис. 3.1). Подобная трактовка задачи оптимальной оценки информационных параметров сигнала позволяет определить соответствующие зависимости по результатам теории оптимального приема M -позиционных дискретных сообщений [1]. Впоследствии с различными модификациями такой подход развивался начиная с 1964 г. С. Дарлингтоном [24], Г. Акима [25], Дж. Возенкрафтом и И. Джекобсом [26], В. Зивом и М. Закаи [27], Л. Зейдманом [28], Л.А. Вайнштейном и В.Д. Зубаковым [13] и А.Ф. Фоминым [7].

В 1970 г. в обзорной работе Л. Зейдмана [28] было дано сопоставление разных методов определения точности оценок параметров сигналов, включая методы, основанные на результатах, полученных ранее математиками А. Баттачариа (1946–1948 гг.) и Е.В. Баранкиным (1949 г.). Критерий Баттачариа был применен для этой цели в 1966 г. **Г. Ван Трисом** [5], а критерий Баранкина — Л. Зейдманом и Р. Маколеем [29]. В [28] также была отмечена возможность определения точности оценок параметров сигналов на основе результатов теории информации К. Шеннона. Кроме того, в [28] было показано, что наиболее точные результаты могут быть получены при использовании границ Крамера—Рао и тех, которые следуют из теории оптимального приема M -позиционных дискретных сообщений.

§ 6. Оптимальный прием аналоговых сигналов

Введение

Вплоть до 70-х гг. XX в. аналоговые системы передачи сообщений были доминирующим видом систем, используемых для передачи сообщений по каналам связи. В системах, работающих в диапазонах низких, средних или высоких частот, применялись, как правило, амплитудная модуляция (АМ) с передачей двух боковых полос частот или одной боковой полосы (ОБП). Амплитудная модуляция с ОБП является линейной, так как амплитуда передаваемого сигнала линейно зависит от уровня модулирующего сообщения. Она широко применяется в технике связи, в частности в телевизионном вещании. В системах звукового вещания, работающих в более высокочастотных диапазонах, в подвижной связи, в радиорелейных и спутниковых системах передачи многоканальной телефонии наиболее часто использовалась частотная модуляция (ЧМ). Этот вид модуляции является нелинейным. Он применялся не только в системах связи, но и во многих других системах: звукозаписи сигналов на магнитный носитель, системах передачи на поднесущей сигналов цветности в телевидении и т.п.

В [1] рассмотрена история развития систем радиосвязи и вещания, а также методов модуляции и приема сигналов. Уже в 30-х гг. инженеры, основываясь на интуиции и здравом смысле, изобрели методы приема сигналов с АМ, ОБП и ЧМ. В случае АМ повсеместное распространение получили приемники, в которых в качестве демодулятора использовался линейный детектор для приема сигналов с ОБП — синхронный детектор, на который в качестве опорного сигнала подавалось гармоническое колебание, сформированное из остатка несущей, содержащейся в составе сигнала с ОБП. Наиболее распространенным демодулятором ЧМ-сигналов был частотный дискриминатор — пара расстроенных контуров, в которых осуществлялось преобразование принимаемых сигналов так, чтобы на их выходе амплитуда сигнала изменялась пропорционально его мгновенной частоте. Тогда на выходе амплитудного детектора, установленного на выходе расстроенных контуров, можно было выделить полезное сообщение. В эти же годы были изобретены фазовая автоподстройка частоты (ФАПЧ) и следящие демодуляторы ЧМ-сигнала.

Исследования академика **В.А. Котельникова** показали, что при высоком отношении сигнал/шум на входе приемника существующие методы приема сигналов с АМ и ЧМ обеспечивают потенциальную помехоустойчивость. Поэтому на первый взгляд трудно было ожидать от созданной теории оптимального приема сигналов новых результатов, представляющих практический интерес.

Следует отметить, что одна из целей, которые преследуют инженеры при конструировании систем связи, заключается в том, чтобы эта система функционировала с заданным качеством приема сообщений при минимальном уровне сигнала, поступающего на вход приемника. Поэтому в ряде случаев очень важно построить систему так, чтобы для ее нормальной работы требовался минимальный энергетический потенциал радиолинии. При низких уровнях принимаемого сигнала начинают проявляться нелинейные (пороговые) эффекты в демодуляторах, поэтому определение структуры оптимальных демодуляторов и выбор их параметров, при которых может быть достигнута высокая помехоустойчивость приема, требуют учета тонких физических яв-

лений. В этих случаях весьма сложно основываться лишь на интуиции и становится необходимой обоснованная теория, которая дает инженеру научный инструмент для создания эффективных систем связи. Такая теория была создана и активно развивалась в период 50–70 гг. XX столетия.

В настоящее время разработаны две теории оптимального приема сигналов — гауссовская (ГТОП) и марковская (МТОП). Первой была создана ГТОП, а затем — МТОП. Обе они нашли применение для решения широкого круга задач теории связи и радиолокации. Следует отметить, что их применение к задачам, связанным с приемом сигналов с разными видами модуляции, приводило практически к одним и тем же решениям. Поэтому во многих случаях выбор того или иного варианта теории для решения конкретной задачи определяется личными предпочтениями исследователя. По-видимому, для решения вопросов оптимального приема сигналов в том случае, когда передаваемые сообщения являются гауссовскими случайными процессами, ГТОП позволяет получить результаты наиболее простым способом. Если же полезное сообщение или воздействующие на прием сигналов шумы не являются гауссовскими процессами, то адекватный теоретический инструмент для решения подобных задач дает МТОП.

6.1. Гауссовская теория оптимального приема сигналов

Первые работы, в которых был дан строгий статистический подход к проблемам оптимальной демодуляции аналоговых сигналов (иначе эти проблемы называют проблемами оптимальной нелинейной фильтрации), были выполнены в середине 50-х гг. американскими учеными Ф. Леганом и Р. Парксом [2] и Д. Йоулой [3]. Постановка задачи синтеза оптимального демодулятора в этих работах выглядела следующим образом. На вход приемника поступал сигнал

$$r(t) = S[t, a(t)] + n(t),$$

где $S[t, a(t)]$ — сигнал, передаваемый по линии связи; $a(t)$ и $n(t)$ — полезное сообщение и гауссовский шум, представляющие собой гауссовские случайные процессы с известными корреляционными функциями $R_a(\tau)$ и $R_n(\tau)$.

Например,

$$S[t, a(t)] = A[1 + m a(t)] \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad \text{для случая АМ;}$$

$$S[t, a(t)] = A \sin(\omega_0 t + \beta \int_{-\infty}^t a(t) dt + \varphi_0) \quad \text{для случая ЧМ.}$$

Здесь ω_0 и φ_0 — частота и фаза принимаемого сигнала; m и β — индексы амплитудной и частотной модуляций.

В рассматриваемых работах использовалось представление процесса $a(t)$ рядом Карунена—Лоэва $a(t) = \sum x_i \Phi_i(t)$, важная особенность которого в том, что x_i являются независимыми случайными величинами, а функции $\Phi_i(t)$ — собственными функциями интегрального уравнения:

$$\lambda_i \Phi_i(t) = \int_0^T R_a(t-\tau) \Phi_i(\tau) d\tau,$$

где T — интервал наблюдения принимаемого сигнала. Таким образом, задача оценки процесса $a(t)$ сводится к задаче получения оптимальных оценок параметров x_i , остающихся постоянными на интервале наблюдения методом максимума апостериорной вероятности. Процедура синтеза для случая, когда шум $n(t)$ является «белым» и имеет спектральную плотность N_0 , приводила к следующему уравнению работы оптимального демодулятора:

$$a^*(t) = \frac{2}{N_0} \int_0^T R_a(t-\tau) \frac{\partial S(\tau, a^*(\tau))}{\partial a^*(\tau)} [r(\tau) - S(\tau, a^*(\tau))] d\tau \quad \text{при } 0 < t < T.$$

Здесь $a^*(t)$ — оптимальная оценка полезного сообщения.

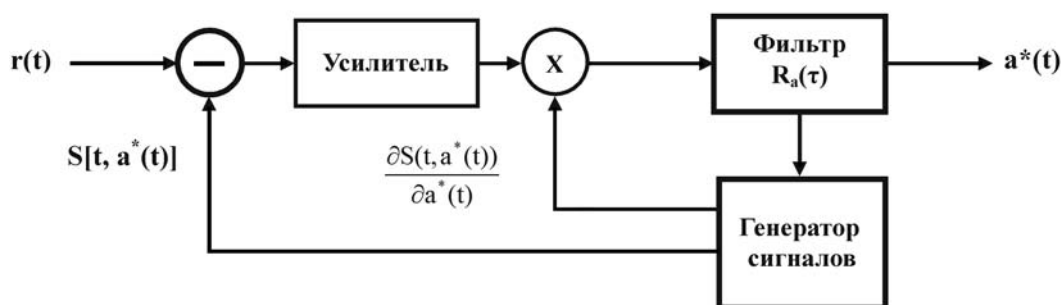


Рис. 3.4

На рис. 3.4 показана блок-схема следящего устройства, в котором реализуется оптимальный алгоритм демодуляции полезного сообщения. Следует отметить, что в цепи обратной связи этого устройства после вычитателя стоит усилитель с коэффициентом усиления, равным $2/N_0$, и фильтр с импульсной реакцией $R_a(\tau)$. Этот фильтр не является физически реализуемым, так как $R_a(\tau) \neq 0$ при $\tau < 0$.

Приведенная схема не дает практического решения, поскольку физически нереализуемый фильтр построить нельзя. Однако она дает представление о структуре оптимального демодулятора. **Г. Ван Трис** предложил его реализацию путем использования в цепи обратной связи оптимального физически реализуемого фильтра, минимизирующего ошибку слежения в цепи обратной связи демодулятора, и установки на его выходе дополнительного фильтра с большим запаздыванием [4]. При этом сквозная частотная характеристика соответствует нереализуемому фильтру, на выходе которого формируется оптимальная оценка полезного сообщения. Забегая вперед, отметим, что развитые позже строгие методы синтеза оптимального демодулятора, основанные на использовании уравнений состояния, приводят к тому же решению, которое предложил Г. Ван Трис.

Весьма важным практическим вопросом теории оптимального приема сигналов является определение среднеквадратической ошибки оценки полезного сообщения, формируемой на выходе оптимального демодулятора. Точное вычисление этой ошибки весьма сложно, однако теория позволяет найти для нее границы. Г. Ван Трис в

1966 году удалось получить нижнюю границу ошибки оценки. Он установил интегральное уравнение [4], определяющее функцию $J^{-1}(t-u)$, которое для случая, когда прием сигналов ведется на фоне «белого» шума, имеет вид:

$$J^{-1}(t-u) + R_a(0) (2 | N_0) \int_0^T J^{-1}(t-x) R_a(x-u) dx = R_a(t-u),$$

где $R_a(0) = E \left[\frac{\partial S(\tau, a(\tau))}{\partial a(\tau)} \right]^2$, а знак E означает математическое ожидание по случайной величине $a(\tau)$.

$$\sigma_0^2 = E [a(t) - a^*(t)]^2 \geq J^{-1}(0).$$

Теория, развитая Ф. Леганом, Р. Парксом и Д. Йоулой, была в 1960 г. распространена Дж. Б. Томасом и Е. Вонгом [5] для оценки многомерных сигналов. Основные теоретические результаты ГТОП, полученные американскими учеными, представлены в получивших мировую известность книгах **Г. Ван Триса** [4] и **Э. Витерби** [6].

Другой плодотворный подход к синтезу оптимальных демодуляторов был предложен в 1961 г. отечественными учеными И.А. Большаковым и В.Г. Репиным [7, 8], а также в книге, изданной коллективом авторов под ред. Г.П. Тартаковского [9]. Все они сводили задачу оптимальной оценки случайного сообщения к задаче оценки параметров сигнала. В отличие от подхода американских ученых, применявших для этого разложение случайных процессов в ряды Карунена–Лоэва, наши ученые использовали представление непрерывных процессов $r(t)$, $a(t)$ и $n(t)$ своими временными отсчетами. Они рассматривали задачу синтеза демодуляторов, оптимальных в байесовском смысле, т.е. обеспечивающих минимум потерь. В качестве функции потерь ими была выбрана наиболее употребительная квадратичная функция. В этом случае для определения оптимальной оценки необходимо найти среднее значение многомерного апостериорного распределения вероятностей параметров, описывающих оцениваемый процесс. При нелинейных видах модуляции это распределение является весьма сложной функцией и точное вычисление его среднего значения затруднительно. Существенным вкладом И.А. Большакова и В.Г. Репина в теорию синтеза оптимальных демодуляторов явился предложенный ими эффективный метод аппроксимации этого распределения многомерным гауссовским распределением [7]. Такая аппроксимация является достаточно точной при сравнительно низком уровне шумов, когда «ширина» апостериорного распределения мала по сравнению с «шириной» априорного. Это позволило построить общую теорию синтеза оптимальных следящих демодуляторов, позволяющую решать задачи когерентного и некогерентного приема сигналов. Развитая теория могла быть применена и в случае, когда сообщение может быть описано линейной комбинацией известных функций со случайными коэффициентами, к которой добавлен случайный процесс, а также когда принимаемый сигнал испытывает случайные флуктуации по амплитуде и фазе. Было показано, что любой оптимальный следящий демодулятор должен содержать дискриминаторы, блоки точности и линейные сглаживающие цепи. Обобщение данной теории на многомерный случай [8] давало возможность рассматривать задачи, связанные с передачей нескольких независимых сообщений сразу по нескольким каналам связи. В таком виде данная теория позволяла

решать чрезвычайно широкий круг задач теории связи и радиолокации. К их числу относились задачи, связанные с многоканальной передачей сообщений по каналам связи, задачи разнесенного приема сигналов и т.п.

Применения ГТОП. Значительное число применений теории оптимальной демодуляции сигналов относится к задачам, связанным с приемом ЧМ-сигналов и фазовой синхронизацией, а также к радиолокационным задачам.

Прием сигналов с АМ, ОБП и ЧМ рассматривался еще в середине 60-х гг. в работах американских ученых **Г. Ван Триса** [4], **Э. Витерби** [6] и **В. Линдсея** [10]. Ими была разработана общая методика определения зависимости отношения сигнал/шум на выходе оптимального демодулятора от отношения сигнал/шум на входе в широком диапазоне уровней принимаемого сигнала, лежащих как выше, так и ниже порогового. Такие зависимости были получены для разных классов энергетических спектров информационных (модулирующих) сообщений, в том числе для спектров типа Баттерворта, которые асимптотически могут приближаться по форме к полосовому спектру прямоугольной формы.

Теория оптимальной демодуляции многомерных сигналов, развитая **Дж. Б. Томасом** и **Е. Вонгом** [5], была применена к системам, в которых по одному каналу связи передаются несколько независимых сообщений, при этом модуляция осуществляется в два этапа. В таких системах каждое сообщение сначала модулирует с помощью АМ, ОБП или ЧМ соответствующую поднесущую, а затем эти поднесущие суммируются и результирующий сигнал модулирует основную несущую. В радиорелейных многоканальных системах связи типичной комбинацией используемых видов модуляции является ОБП — ЧМ. **Г. Ван Трис** рассмотрел [4] также применяя иногда комбинацию ЧМ — ЧМ. Важные исследования различных типов следящих и неследящих демодуляторов ЧМ-сигналов, обеспечивающих снижение порога при их приеме, были проведены отечественными учеными **Л.Я. Кантором** и **В.М. Дорофеевым** [11].

К упомянутому случаю относятся также и системы разнесенного приема сигналов в каналах, в которых из-за многолучевости при распространении радиоволн возникают флуктуации уровней этих сигналов. Такие системы широко применяются на практике для повышения помехоустойчивости приема сигналов при передаче сообщений в коротковолновых и тропосферных каналах. Их можно рассматривать как многоканальные системы, в которых в каждом канале происходят с определенной скоростью изменения амплитуды и фазы несущей, причем во всех каналах несущая модулирована одним и тем же сообщением и действуют независимые шумы. Оптимальная структура системы разнесенного приема была получена **Г. Ван Трисом** [4] и оказалась точно такой, как и устройства когерентного сложения разнесенных сигналов, изобретенные ранее инженерами на основе интуиции и здравого смысла [1].

В работе **М.А. Быховского** [12] с помощью этих методов рассмотрена представляющая практический интерес задача разделения двух ЧМ-сигналов, передаваемых в одном и том же частотном канале и модулируемых независимыми сообщениями $a_1(t)$ и $a_2(t)$. С одной стороны, эта задача связана с важной проблемой повышения эффективности использования радиочастотного спектра, когда в одном и том же частотном канале осуществляется передача большого числа информационных сообщений, нежели в традиционных системах. С другой стороны, она связана с проблемами обеспечения ЭМС в системах связи с ЧМ и использованием компенсаторов помех (КП).

На основе результатов **Г. Ван Триса** определена ошибка оценки этих сообщений в оптимальной системе разделения двух ЧМ-сигналов [12]. Возможность создания итерационных КП, которые не являются следящими, но позволяют за счет применения фильтров с частотной характеристикой, близкой к прямоугольной, достичь высокой степени подавления мешающего сигнала, применяя всего несколько ступеней итерации, показана в работе [13]. Синтез и анализ двухканальных КП, которые можно с высокой эффективностью использовать для подавления помех в системах радиорелейной и спутниковой связи, выполнен в [14].

Методы, развитые в [7, 8], были с успехом применены к большому числу проблем, связанных с радиолокацией. Авторским коллективом под редакцией профессора Г.В. Тартаковского была написана фундаментальная монография «Вопросы статистической теории радиолокации» [9]. По широте охвата проблем оптимального приема сигналов в радиолокации и глубине рассмотрения связанных с этим вопросов монография стоит в одном ряду с фундаментальными монографиями **Д. Миддлтона** [15] и **Г. Ван Триса** [4]. В ней дан анализ большого комплекса проблем, связанных с обнаружением сигналов и измерением дальности, скорости и угловых координат лоцируемых объектов, как при импульсном, так и при непрерывном излучении сигналов. В ней исследованы когерентные и некогерентные методы приема сигналов. Проведено исследование методов пеленгации объектов с использованием антенн типа фазируемых антенных решеток и антенн со сканированием диаграммы направленности. Дан анализ многомерных следящих измерителей сразу нескольких параметров сигналов. Рассмотрены методы оценки точности измерения параметров при большом уровне принимаемых сигналов и весьма важные вопросы срыва слежения в радиолокационных следящих измерителях.

6.2. Марковская теория оптимального приема сигналов

Заслуга в создании этого направления теории оптимального приема сигналов принадлежит одному из крупнейших отечественных ученых профессору **Р.Л. Стратоновичу**. В 1959 г. он опубликовал свою первую теоретическую работу [16], в которой рассмотрел задачу нелинейной фильтрации случайной функции на основе теории марковских случайных процессов.

В простейшем виде постановка задачи нелинейной фильтрации Р.Л. Стратоновичем формулируется следующим образом: полезное сообщение, представляющее случайный процесс $a(t)$, передаваемый по каналу связи, задается дифференциальным уравнением:

$$\frac{da(t)}{dt} = F[a(t), t] + n_0(t).$$

Сигнал, поступающий после прохождения канала связи на вход приемника, имеет вид:

$$r(t) = S[t, a(t)] + n(t).$$

Здесь $n_0(t)$ и $n(t)$ — «белые» независимые гауссовские шумы с двухсторонней спектральной плотностью мощности N_0 и N , $F[a(t), t]$ и $S[t, a(t)]$ — в общем случае нелинейные функции, $a(t)$ и $r(t)$ — скалярные процессы, однако в более общей постановке эти процессы, а также шумы $n_0(t)$ и $n(t)$ могут быть векторными. На основе анализа принятой до момента времени t реализации сигнала $r(t)$ необходимо определить оценку $a^*(t)$

информационного сообщения. Если функции $F[a(t), t]$ и $S[t, a(t)]$ являются линейными, данная задача приводит к альтернативному подходу к проблеме оптимальной линейной фильтрации сообщения $a(t)$, который был предложен в 1960 г. Р. Калманом и Р. Бьюси.

Р.Л. Стратонович установил, что апостериорная плотность распределения вероятности $p(a^*(t), t)$ может быть определена из следующего уравнения в частных производных:

$$\frac{\partial p(a^*, t)}{\partial t} = - \frac{\partial \{F[a^*, t] p(a^*(t), t)\}}{\partial a^*} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \{N_0 p(a^*, t)\}}{\partial^2 a^*} + \{\Phi[a^*, t] - E\{\Phi[a^*, t]\} p(a^*, t)\}.$$

Здесь $\Phi[a^*, t] = \frac{\{r(t) - S[t, a^*(t)]\}^2}{2N_0}$, $E\{\Phi[a^*, t]\} = \int \Phi[a^*, t] p(a^*, t) da^*$ — среднее значение функции $\Phi[a^*, t]$. Строгое решение приведенного уравнения является весьма сложной и не решенной до сего времени математической задачей. Р.Л. Стратонович предложил определять $p(a^*, t)$ приближенно в виде гауссовского распределения. Такое приближение соответствует условию, что отношение сигнал/шум на входе приемника велико. Это условие эквивалентно тому, что нелинейный оптимальный демодулятор работает в линейном режиме, т.е. в надпороговой области. При этом из приведенного уравнения в частных производных следуют два (в общем случае векторных) дифференциальных уравнения, одно из которых описывает поведение оптимальной оценки $a^*(t)$, а другое — ковариационной матрицы ошибок оценок, которые дает реализуемый демодулятор. Последнее уравнение представляет собой матричное уравнение Риккати, решение которого в общем случае является непростой задачей.

Общая марковская теория оптимального приема сигналов была разработана Р.Л. Стратоновичем в его докторской диссертации, опубликованной в 1966 г. [17]. Достоинство МТОП в том, что она всегда приводит к демодулятору, у которого в петле обратной связи стоит физически реализуемый фильтр.

Независимо от работ отечественных ученых МТОП с середины 60-х гг. интенсивно разрабатывалась и американскими учеными. Г. Кушнером было получено [18] уравнение для апостериорной вероятности $p(a^*, t)$, подобное приведенному выше уравнению Р.Л. Стратоновича. Большой вклад в данную теорию внес американский ученый А.Б. Баггероэр [19]. Результаты, полученные американскими учеными, представлены в фундаментальной монографии **Г. Ван Триса** [4].

Применения МТОП. В публикациях 1960–1966 гг. Р.Л. Стратонович самостоятельно и вместе со своими учениками Н.К. Кульманом и Ю.Г. Сосулиным рассмотрел применение новой теории к решению ряда практических задач: для приема узкополосного сигнала с неизвестной частотой, для оптимальной фильтрации телеграфного сигнала, приема сигналов на фоне негауссовского шума и т.п. В последующие годы марковская теория оптимального приема развивалась Н.К. Кульманом и Ю.Г. Сосулиным самостоятельно.

Значительный вклад в развитие этой теории в нашей стране был сделан отечественными учеными, работающими в Военно-воздушной академии им. проф. Н.Е. Жуковского. В этой Академии профессором **В.И. Тихоновым** была создана научная школа, в которой велись исследования по использованию МТОП для разнообразных задач приема сигналов в системах связи, радиолокации и радионавигации.

Н.К. Кульманом, В.И. Тихоновым и Ю.В. Саютиным в 1964–1974 гг. были исследованы многочисленные задачи применения МТОП к аналоговым системам связи с

разными методами модуляции — фазовой, частотной, амплитудной и различными их комбинациями. Синтез оптимальных систем и анализ их помехоустойчивости был выполнен в предположении, что передаваемые сообщения представляют собой гауссовский и одновременно марковский случайный процессы, а сигналы принимаются на фоне гауссовского в общем случае коррелированного шума. Профессор **В.И. Тихонов** провел исследование помехоустойчивости оптимальной системы разнесенного приема сигналов. Результаты данных исследований представлены в монографии [20].

Для передачи аналоговых сигналов в системах связи в ряде случаев применяют импульсные методы модуляции, такие как амплитудно-импульсная, частотно-импульсная, фазово-импульсная, широтно-импульсная и т.п. На основе МТОП Н.К. Кульман совместно с В.И. Тихоновым синтезировали оптимальные приемники сигналов в таких системах (1966 г.), предполагая, что скорость изменения передаваемых сообщений существенно ниже тактовой частоты следования модулируемых импульсов. Эти результаты вошли в монографию [20]. Позже, в начале 70-х гг., **М.С. Ярлыков** выполнил обстоятельные исследования систем связи с импульсными видами модуляции, результаты которых он представил в книге [21], опубликованной в 1980 г.

Важным направлением развития МТОП явилось ее применение к комплексным задачам синтеза оптимальных систем синхронизации и приема дискретных сообщений. Это направление развивалось в конце 60-х и начале 80-х гг. XX в. в работах **В.И. Тихонова**, В.Н. Харисова, А.Н. Дединова и В.П. Дмитриева [22–25]. Ряд примеров применения МТОП к задачам синтеза многомерных дискретных систем связи, синтеза многомерных измерителей негауссовских марковских процессов и к задачам совместной фильтрации непрерывных и дискретных параметров были рассмотрены в книге И.Н. Амиантова [26].

Многочисленные применения МТОП для синтеза оптимальных демодуляторов в системах связи с разными видами модуляции даны в книгах **Д. Снайдера** [27] и **Г. Ван Триса** [4]. В этих книгах широко представлены также и результаты анализа помехоустойчивости оптимальных демодуляторов для сигналов с АМ и ЧМ, полученные американскими учеными.

Михаил Семенович ЯРЛЫКОВ

Михаил Семенович Ярлыков родился 31 июля 1934 г. В 1957 г. окончил радиотехнический факультет Харьковского высшего авиационно-инженерного военного училища, а в 1967 г. — механико-математический факультет Московского государственного университета. В 1964 г. он защитил кандидатскую, а в 1973 г. — докторскую диссертации. С 1957 г. М.С. Ярлыков занимается научной и педагогической деятельностью. Им была развита



марковская теория оценивания случайных процессов, базирующаяся на единой методологической основе марковских и условных марковских процессов.

В 1968—1980 гг. на базе этой теории он разработал структурные схемы оптимальных устройств приема и обработки сигналов в системах авиационной радиосвязи, а в 1980—1988 гг. — статистическую теорию радионавигации, что позволило существенно расширить возможности синтеза, расчета и конструирования помехоустойчивых систем радионавигации и пилотажно-навигационных комплексов. В 1988—1994 гг. им были проведены теоретические исследования, на основе которых были созданы методики проектирования и комплексирования авиационных и спутниковых систем радионавигации.

М.С. Ярлыков — автор более 200 научных трудов, в их числе пять монографий, шесть учебников и 53 изобретения по радионавигации и связи. С 1976 г. он руководит одной из ведущих кафедр Военно-воздушной инженерной академии им. проф. Н.Е. Жуковского, является заместителем главного редактора журнала «Радиотехника». Михаил Семенович — заслуженный деятель науки и техники РФ, имеет звание генерал-майора авиации, с 1992 г. — член-корреспондент Академии инженерных наук РФ.

Дональд СНАЙДЕР

Дональд Л. Снайдер в 1961 г. закончил Южнокалифорнийский университет и получил степень бакалавра. Свое образование он продолжил в Массачусетском технологическом институте (МТИ), в котором в 1963 г. получил магистерскую степень, а в 1966 г. защитил докторскую диссертацию. Его докторская диссертация [27] была издана МТИ и в 1973 г. вышла в переводе на русский язык в издательстве «Энергия». В период подготовки диссертации он провел ряд первоклассных исследований в области теории связи. Им были опубликованы работы, в которых определена точность оценок гауссовских сигналов, принимаемых на фоне случайного гауссовского шума, определены структуры оптимальных демодуляторов для сигналов с амплитудной, частотной и фазовой модуляциями.

Несколько лет Д.Л. Снайдер преподавал в МТИ, а с 1969 г. стал профессором на факультете электроники в Вашингтонском университете. После перехода на работу в Вашингтонский университет он стал заниматься широким кругом проблем, связанных с обработкой изображений, получаемых с помощью различных устройств в медицине и астрономии. В настоящее время он является также профессором радиологии в медицинском колледже этого университета. С 1976 по 1986 г. он возглавлял в университете отдел электроники, а в 1986 г. организовал в университете исследовательскую лабораторию электронных систем и сигналов и был ее директором вплоть до 1997 г. В лаборатории его исследования касались фундаментальных проблем обработки изображений с приложениями к медицине и астрономии.



Исследовательские и преподавательские интересы профессора Д.Л. Снайдера лежат в области обработки изображений и методологии статистических оценок сигналов с приложением к проблемам радиологии, локации в диапазоне радио- и инфракрасных волн.

В настоящее время в сотрудничестве с исследователями отдела радиологии Вашингтонского университета он работает над совершенствованием томографов, используемых для получения изображений человеческого тела с целью диагностирования раковых опухолей. Кроме того, в сотрудничестве с учеными отдела наук о Земле и планетах он участвует в совершенствовании методов получения изображений от телескопов, расположенных на Земле и космических аппаратах, а также микроскопов.

В сотрудничестве с астрономами, работающими в Институте космических исследований в Балтиморе, он разработал с учетом турбулентности атмосферы новый метод обработки изображений на телескопе Хаббла.

Профессор Д.Л. Снайдер — почетный член Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE). В 1981 г. был президентом секции теории информации IEEE.

§ 7. Хронология развития теории потенциальной помехоустойчивости

1. Создание теории потенциальной помехоустойчивости (1947 г. — В.А. Котельников).
2. Применение математической теории статистических решений к задачам оптимальной обработки сигналов, принимаемых на фоне шумов (1950 г. — А. Зигерт).
3. Развитие теории оптимального приема радиолокационных сигналов (1950—1953 гг. — Ф. Вудворт и И. Дейвис).
4. Создание на основе строгих математических методов теории оптимального обнаружения сигналов и оценки их параметров (1953 г. — Д. Миддлтон; 1955 и 1956 гг. — Д. Миддлтон и Д. Ван Метер).

7.1. Прием дискретных сигналов

7.2.1. Прием двухпозиционных сигналов

1. Определение структуры оптимальных демодуляторов и анализ их помехоустойчивости для канала связи с неопределенной фазой сигналов (1954 г. — В. Петерсон, Т. Бирдзолл и У. Фокс; 1955 г. — Л.М. Финк).
2. Изобретение метода относительно-фазовой модуляции (1954 г. — Н.Т. Петрович).
3. Разработка системы связи «Кинеплекс», в которой для передачи использовались 20 синхронных несущих, на каждой из которых передавались сигналы с ОФМ и достигалась высокая эффективность использования полосы частот (1954—1956 гг. — фирма Collins Radio).
4. Развитие теории приема сигналов с ФМн, ОФМ и ДОФМ (1959 г. — К. Кан, Дж. Лаутон; 1963 г. — Л.М. Финк; 1964 г. — Н.П. Хворостенко).
5. Исследование помехоустойчивости приема сигналов с ЧМн с использованием частотного дискриминатора (1963 г. — Л.М. Финк, В. Беннет и Дж. Зальтц).
6. Разработка обобщенной методологии анализа помехоустойчивости приема сигналов в каналах с неопределенной фазой, которая применима как к сигналам с ЧМн, так и с ОФМ (1964 г. — С. Штейн).

7. Обобщение относительного метода передачи дискретных сигналов для условий, когда после прохождения канала связи не только фаза, но и частота принимаемого сигнала становятся нестабильными (1966 г. — Ю.Б. Окунев).
8. Изобретение метода передачи сигналов, названного ЧМн с непрерывной фазой (манипуляции минимального частотного сдвига — ММС) (1972 г. — Р. де Буда).

7.1.2. Прием многопозиционных сигналов

1. Исследование оптимального приема M -сигналов в N -мерном пространстве, перекинувшее мост между теориями информации и потенциальной помехоустойчивости (1950 г. — С.О. Райс).
2. Синтез оптимальных ансамблей M -сигналов, позволяющих передавать сообщения в каналах с «белым» гауссовским шумом, на основе математической теории плотнейшего заполнения N -мерного пространства равными шарами (1955–1958 гг. — Э.Л. Блох, А.А. Харкевич, Н.К. Игнатъев).
3. Разработка методов вычисления зависимости $P_{\text{ош}} = f(R, C, N)$ для оценки потенциальной помехоустойчивости оптимального приема M -сигналов (1959–1965 гг. — К. Шеннон, А. В. Балакришнан, Д. Слепьян, Р. Галлагер).
4. Изобретение и исследование двумерных M -сигналов с ФАМ и КАМ (1960 г. — К. Кан; 1962 г. — К. Компопиан и Б. Глазер; 1975 г. — Дж. Смит).
5. Анализ потенциальной помехоустойчивости приема четырехпозиционных сигналов ДЧТ (1964 г. — Л.М. Финк и В.С. Котов).
6. Разработка перестановочной модуляцией — метода построения ансамбля M -сигналов для случая, когда N (размерность пространства сигналов) и M имеют произвольные значения и $M \gg N$ (1965 г. — Д. Слепьян).
7. Исследование помехоустойчивости приема «в целом» ансамбля M -сигналов, в которых отдельные сигналы содержат L ортогональных компонент, каждая из которых может иметь K -кратную ФМн ($M = LK$) (1966 г. — И. Рид и Шольц; 1972 г. — В. Линдсей и М. Симон).
8. Метод построения сигнально-кодовых конструкций, основанный на определенном правиле двоичного представления сигнальных точек при разбиении ансамбля сигналов на вложенные подансамбли с увеличивающимся минимальным расстоянием (1981 г. — Г. Унгербокк).
9. Разработка метода построения сигнально-кодовых конструкций M -сигналов, в которых применяется многократная ФМ и различные виды корректирующих кодов (1984 г. — В. Гинзбург).

7.1.3. Прием дискретных сигналов в многолучевых каналах

1. Изобретение и реализация метода разнесенного приема сигналов на линии КВ-связи между островом Ява и Голландией (1927 г. — А. Де Хаас).
2. Начало теоретических исследований эффективности систем разнесенного приема, основанных на применении методов теории вероятностей (1928 г. — Т.Л. Экерслей; 1930 г. — В.И. Сифоров; 1936 г. — В.А. Котельников и Н.И. Шумская; 1937 г. — А.Н. Щукин).
3. Создание линии КВ-связи между США и Англией с разнесенным приемом сигналов (1931 г. — Г. Беверейдж и Г. Петерсон).

4. Создание линии КВ-связи между США и Англией с использованием многолучевой антенной системы, позволяющей на приеме разделять приходящие лучи по углу прихода в вертикальной плоскости и осуществлять их сложение (1937 г. — Г.Т. Фрис и Г.Б. Фельдман).
5. Исследование оригинальной системы двукратного разнесенного приема сигналов частотной телеграфии путем их сложения на общем амплитудном ограничителе (1947 г. — В.С. Мельников).
6. Создание теоретических основ теории разнесенного приема и анализ помехоустойчивости разных методов разнесенного приема (1954 г. — Е.А. Хмельницкий).
7. Фундаментальные теоретические исследования помехоустойчивости систем разнесенного приема (1955–1958 гг. — Л.М. Финк).
8. Синтез и практическая реализация системы связи «Rake», использующей широкополосные сигналы для разделения и когерентного сложения отдельных лучей в месте приема (1956–1958 гг. — Р. Прайс и П.Е. Грин).
9. Теоретическое доказательство эффективности применения широкополосных сигналов для повышения помехоустойчивости приема в многолучевых каналах связи (1957 г. — А.А. Харкевич).
10. Синтез оптимальных систем разнесенного приема и исследования их помехоустойчивости (1958 г. — И.Н. Пирс; 1959 г. — Дж. Л. Турин; 1964 и 1965 гг. — В.К. Линдсей).
11. Создание метода анализа помехоустойчивости систем N -кратного разнесенного приема с учетом корреляции замираний сигналов в ветвях разнесения (1960 г. — И.Н. Пирс и С. Штейн).
12. Исследования помехоустойчивости оптимальных систем разнесенного приема с учетом реальной структуры трактов измерения параметров сигналов в ветвях разнесения (амплитуды и фазы) и точности оценки выполняемых измерений (1962 г. — Ф. Белло и Б.Д. Нелин).
13. Исследования адаптивных систем разнесенного приема, в которых применялась обратная связь по решению (1963 г. — Дж. К. Хэнкок и В.К. Линдсей; 1964 г. — Р. Прайс, И.Г. Проакис и П.Р. Дроуилхел).
14. Исследования помехоустойчивости разнесенного приема различных сигналов при когерентном и некогерентном сложении (1964–1966 гг. — И.С. Андронов).
15. Исследования помехоустойчивости приема M -позиционных сигналов для случаев, когда замирания в ветвях разнесения подчиняются законам Райса или Накагами (1964 г. — Д.Д. Кловский).
16. Исследования помехоустойчивости широко применяемых на практике систем оптимального разнесенного приема сигналов с амплитудной, фазовой и частотной манипуляциями (1964 г. — Н.П. Хворостенко).
17. Развитие теории разнесенного приема с учетом корреляции замираний сигналов в ветвях разнесения (1964 г. — Н.П. Хворостенко).
18. Исследования зависимости помехоустойчивости приема в системе «Rake» от уровня боковых лепестков автокорреляционных функций применяемых широкополосных сигналов (1966 г. — М.А. Быховский).
19. Создание теории разнесенного приема сигналов для каналов с дискретной многолучевостью (1967 г. — М.А. Быховский).

7.1.4. Компенсация межсимвольной интерференции

1. Первые результаты теории передачи сигналов по каналу с МСИ (1928 г. — Г. Найквист).
2. Изобретение и исследования системы с испытательным импульсом для передачи и приема в каналах с МСИ (1958 г. — Д.Д. Кловский).
3. Теоретические исследования возможностей компенсации межсимвольных искажений в каналах связи, позволившие определить оптимальные алгоритмы обработки сигналов в каналах связи с МСИ и оценить их помехоустойчивость (1960–1988 гг. — Д.Д. Кловский, Б.И. Николаев).
4. Первые исследования линейных методов адаптивной компенсации МСИ (1961 г. — Е. Кетель).
5. Исследования возможностей применения линейных адаптивных корректоров переходной характеристики каналов связи с ограниченной полосой частот и проблем выбора оптимальной формы передаваемых сигналов (1965 г. — Д.В. Тафтс; 1968 г. — М. Дж. ди Торо).
6. Изобретение и теоретическое обоснование принципа работы нашедшего широкое применение адаптивного корректора линейных искажений, возникающих в телефонных каналах связи и вызывающих МСИ (1965–1966 гг. — Р. Лакки).
7. Исследование системы оптимального приема сигналов в каналах связи с конечным временем рассеяния (1966 г. — Р. Чанг и Дж. Хэнкок).
8. Использование обратной связи по решению (ОСР) в каналах с МСИ (1967 г. — М. Остин).
9. Первые исследования возможности применения алгоритма Э. Витерби для оптимального приема сигналов в каналах с МСИ (1971 г. — Г. Кабаяши и Дж. Омура; 1972 г. — Г. Форни).
10. Исследования систем приема с ОСР для борьбы с МСИ (1972 г. — Р. Прайс; 1979 г. — К. Бельфиоре и Дж. Парк).
11. Доказательство теоремы эквивалентности гауссовского канала связи с МСИ, обладающего известной переходной характеристикой, N -независимым каналам без МСИ, которая дает основу для синтеза оптимальных сигналов, предназначенных для передачи сообщений в каналах с временным рассеянием (1973 г. — Р.С. Кеннеди).
12. Создание адаптивных систем передачи сигналов по реальным каналам с МСИ и изменяющимися во времени параметрами, в которых используются оптимальные сигналы, и определение потенциальных возможностей передачи цифровых сигналов по каналам с МСИ (1989–1991 гг. — Д.Л. Коробков).

7.2. Оценка параметров сигнала

7.2.1 Оценка параметров сигнала в системах с одним каналом приема

1. Исследования задач совместной оценки времени прихода и частоты принимаемого сигнала (измерение времени прихода позволяет определить дальность от радиолокатора до объекта, а измерения частоты — доплеровский сдвиг частоты, который определяется его скоростью) и обобщение теории оптимальной оценки параметров сигналов на случай, когда шум, воздействующий на прием сигналов, не является «белым» (1954 г. — Д. Слепьян).

2. Оценка потенциальной точности определения угловых координат объекта импульсной радиолокационной станцией (1956 г. — П. Сверлинг).
3. Исследования задачи совместной оценки времени прихода, частоты и скорости изменения частоты (которая определяет ускорение лоцируемого объекта) принимаемого сигнала (1960 г. — Ф. Белло).
4. Исследования возможностей измерения угловых координат объектов с помощью сканирования диаграммы направленности антенны, повышающей угловую разрешающую способность радиолокатора (1960–1970 гг. — С.Е. Фалькович).
5. Исследования задач оптимального обнаружения пачек импульсов, а также задач совместного обнаружения сигнала и оценки его параметров (1960 г. — Л.А. Вайнштейн и В.Д. Зубаков; 1968 г. — Д. Миддлтон и Р. Эспозито).
6. Исследования методами теории потенциальной помехоустойчивости большого класса систем передачи информационных параметров с помощью аналоговых и импульсных методов модуляции и определение достижимой точности оценки этих параметров с учетом аномальных ошибок (1970–1975 гг. — А.Ф. Фомин).
7. Исследования оптимальных и субоптимальных алгоритмов отдельной и совместной оценки произвольных (энергетических и неэнергетических) параметров сигналов для различных априорных данных о принимаемом сигнале. (1978 г. — Е.И. Куликов и А.П. Трифонов).
8. Исследование на основе теории оценок параметров сигналов задачи разделения двух ЧМ-сигналов, занимающих общую полосу частот (1979 г. — М.А. Быховский).

7.2.2. Оценки параметров сигнала в системах с несколькими каналами приема

1. Синтез структуры приемников, осуществляющих оптимальную обработку пространственно-временных сигналов, исследования задач обнаружения одной или нескольких целей в среде с помехами реверберационного типа и задач оценки амплитуды сигнала, отраженного от цели, ее дальности и угловых координат (1962 г. — Ф. Брун; 1965 г. — Д. Миддлтон и Г. Грогински; 1968 г. — Г. Янг).
2. Разработка метода синтеза оптимальных сигналов для обнаружения сигналов и измерения их параметров при действии помех реверберационного типа (1965 г. — Г. Ван Трис; 1970 г. — Д. Миддлтон, Г. Янг и Дж. Ховард).
3. Синтез структур оптимальных многоканальных устройств обработки сигналов и исследование проблем пеленгации неподвижных и подвижных целей с учетом мультипликативных и аддитивных помех (1970 г. — С.Е. Фалькович; 1971 г. — И.Н. Амиантов).

7.2.3. Методы определения потенциальной точности оценки параметров сигналов

1. Определение на основе метода, предложенного В.А. Котельниковым, точности оценки параметров сигналов для случая, когда их уровень лежит ниже порогового значения (1960 г. — Л.А. Вайнштейн и В.Д. Зубаков; 1963 г. — Г. Акима; 1964 г. — С. Дарлингтон; 1969 г. — Дж. Возенкрафт и И. Джекобс, В. Зив и М. Закаи; 1970 г. — Ф. Зейдман, А.Ф. Фомин).

1. Применение для определения точности оценок параметров сигналов критерия А. Батгачария (1966 г. — Г. Ван Трис), Е.В. Баранкина (1969 г. — Л. Зейдман и К. Маколей) и результатов теории информации К. Шеннона (1969 г. — Л. Зейдман).

7.3. Оптимальный прием аналоговых сигналов

7.3.1. Гауссовская теория оптимального приема сигналов

1. Разработка строгого статистического подхода к проблемам оптимальной демодуляции аналоговых сигналов (1953 г. — Ф. Леган и Р. Паркс; 1954 г. — Д. Йоула).
2. Развитие теории оптимальной демодуляции для многомерных сигналов (1960 г. — Дж. Б. Томас и Е. Вонг).
3. Разработка метода синтеза оптимальных демодуляторов аналоговых сигналов путем представления аналоговых процессов, моделирующих полезные сообщения и шумы своими отсчетами (1961–1964 гг. — И.А. Большаков и В.Г. Репин).
4. Применение ГТОП к решению большого числа проблем, связанных с радиолокацией (1961–1964 гг. — П.А. Бакут, И.А. Большаков, Б.М. Герасимов, А.А. Курикса, В.Г. Репин, Г.В. Тартаковский и В.В. Широков).
5. Анализ помехоустойчивости оптимальных демодуляторов сигналов с АМ, ОБП и ЧМ (1962 г. — Э. Витерби; 1964 г. — Г. Ван Трис и В. Линдсей).
6. Синтез оптимальной структуры системы разнесенного приема (1964 г. — Г. Ван Трис).
7. Разработка метода определения нижней границы ошибки при оценке полезного сообщения, выделяемого на выходе оптимального демодулятора (1965 г. — Г. Ван Трис).
8. Разработка эвристического подхода к синтезу оптимального следящего демодулятора с реализуемым фильтром в цепи обратной связи (1968 г. — Г. Ван Трис).
9. Исследования различных типов следящих и неследящих демодуляторов, обеспечивающих снижение порога при приеме ЧМ-сигналов (1967–1977 гг. — В.М. Дорофеев и Л.Я. Кантор).
10. Синтез оптимальных одноканальных компенсаторов помех для систем связи, использующих ЧМ-сигналы, и исследования их помехоустойчивости (1978 г. — М.А. Быховский и В.М. Дорофеев).
11. Синтез и анализ двухканальных КП, которые могут с высокой эффективностью применяться для подавления помех в системах радиорелейной и спутниковой связи (1980 г. — М.А. Быховский).

7.3.2 Марковская теория оптимального приема сигналов

1. Создание МТОП (1959 г. — Р.Л. Стратонович).
2. Применение МТОП к решению ряда задач, связанных с приемом узкополосного сигнала с неизвестной частотой, оптимальной фильтрацией телеграфного сигнала, приемом сигналов на фоне негауссовского шума и т.п. (1960–1966 гг. — Р.Л. Стратонович, Н.К. Кульман, Ю.Г. Сосулин).
3. Разработка и развитие МТОП американскими учеными (1964 г. — Г. Кушнер; 1969 г. — Д.Л. Снайдер; 1970 г. — А.Б. Баггероэр).

4. Применения МТОП к аналоговым системам связи с различными методами модуляции — фазовой, частотной, амплитудной и различными их комбинациями (1964—1974 гг. — Н.К. Кульман, В.И. Тихонов, Ю.В. Саютин).
5. Применения МТОП к системам связи, в которых используют импульсные методы модуляции, такие как амплитудно-импульсная, частотно-импульсная, фазово-импульсная, широтно-импульсная и т.п. (1966 г. — Н.К. Кульман; 70-е гг. — М.С. Ярлыков).
6. Применение МТОП к комплексным задачам синтеза оптимальных систем приема сигналов и оптимальных систем синхронизации (1968 г. — В. П. Дмитриев; 1980 г. — В.И. Тихонов, В.Н. Харисов; 1982 г. — В.Н. Харисов).

Литература к главе 3

В приведенном списке литературы для книг, переведенных на русский язык, в скобках указан год их первоначального издания.

§ 1

1. *Котельников В.А.* Теория потенциальной помехоустойчивости. — М.: Госэнергоиздат, 1956.
2. *Kotelnikov V.A.* The Theory of Optimum Noise Immunity. — N.Y.: McGraw-Hill. 1959.
3. *Siebert A.J.F.* Preface and § 7.5 in Lawson J.L., Uhlenbeck G.E. Threshold Signals. N.Y.: 1950.
4. *Woodward M., Davies I.L.* Theory of Radar Information. Philips. Mag. October 1950. № 321.
5. *Woodward M.* Probability and Information Theory with Application to Radar. London: Pergamon Press. 1953.
6. *Middleton D.* Statistical Criteria for the Detection of Pulsed Carriers in Noise // J. Appl. Phys. 1953. V.24. N 4.
7. *Middleton D., Van Meter D.* Detection and extraction of signals in noise from the point of view statistical decision theory // J. Soc. Ind. Appl. Math. 1955. V. 3. № 4; 1956. V. 4. № 2.
8. *Миддлтон Д.* Введение в статистическую теорию связи. — М.: Сов. радио, 1962. Т. 2. С. 830.

§ 2

1. *Peterson W.W., Birdsall T.G., Fox W.C.* The Theory of Signal Detectability // IRE Trans. on Information Theory. 1954. V. PGIT-4. № 4.
2. *Котельников В.А.* Сигналы с максимальной и минимальной вероятностями обнаружения // Радиотехника и электроника. 1959. № 3.
3. *Финк Л.М.* Теория передачи дискретных сообщений. — М.: Сов. радио, 1970.
4. *Bennet W.R., Salz J.A.* Binary Data Transmission by FM over a Real Channel // BSTJ. September 1963.
5. *Петрович Н.Т.* Передача дискретной информации в каналах с фазовой манипуляцией. — М.: Сов. радио, 1965.
6. *Nyquist H.* Certain Topics in Telegraph Transmission Theory // Trans. AIEE (Electr. Eng.). April 1928.
7. *De Bellsiz H.* La Reseption Synchrone. Onde Electr. June 1932. V. 11. P. 230—240.
8. *Окунев Ю.Б.* Теория фазоразностной модуляции. — М.: Связь, 1979.
9. *Хворостенко Н.П.* Статистическая теория демодуляции дискретных сигналов. — М.: Связь, 1968.
10. *Sahn C.R.* Performance of Digital Phase-modulation communication System // IRE Trans. May 1959. V. CS-7.
11. *Заездный Л.М., Окунев Ю.Б., Рахович Л.М.* Фазоразностная модуляция. — М.: Связь, 1967.

12. *Helstrom C.W.* Resolution of Signals in White Gaussian Noise // Proc. IRE. September 1955. V. 43.
13. *Stein S.* Unified Analysis of Binary Communications Systems // IEEE Trans. IT-10. 1964. № 1.
14. *Doelz M., Heald E., Martin D.* Binary Data Transmission Techniques for Linear Systems // Proc. IRE. May 1957. V. 45.
15. *Lawton J.G.* Theoretical Error Rates of Differentially Coherent Binary and «Kineplex» Data Transmission Systems // Proc. IRE. September 1959. V. 47.
16. История и современность (1923–1998 гг.) / Институт военной связи. — Мытищи: 16 ЦНИЦИ МО. 1998.
17. *De Buda R.* Coherent Demodulation of Frequency-Shift Keying with Low Deviation Ratio // IEEE Trans. COM-20. 1972. № 6.
18. *Shannon C.* Mathematical Theory of Communication // BSTJ. 1948. V. 27. № 3.
19. *Rice S.O.* Communication in the Presence of Noise-probability of Error for Two Encoding Schemes // BSTJ. January 1950.
20. *Блох Э.Л., Харкевич А.А.* Геометрические представления в теории связи // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. 1955. № 6.
21. *Игнатьев Н.К.* Геометрические основания оптимального кодирования // Сб. Гос. НИИ МС. 1958. Вып. 8.
22. *Shannon C.* Probability of Error for Optimal Codes in a Gaussian Channel // BSTJ. May 1959.
23. *Balakrishnan A.V.* A Contribution to the Sphere-packing Problem of Communication Theory // J. Math. Analysis and Appls. 1961. № 3.
24. *Slepian D.* Bounds on Communication // BSTJ. May 1963. V. 42.
25. *Мешковский К.А., Кириллов Н.Е.* Кодирование в технике связи. М.: Связь, 1966.
26. *Nuttall A.H.* Error Probabilities for Equicorrelated M-ary Signals Under Phase-coherent and Phase-incoherent Reception // IRE Trans. IT-9. July 1962.
27. *Gallager R.G.* A Simple Derivation of the Coding Theorem and Some Applications // IEEE Trans. IT-11. January 1965.
28. *Быховский М.А.* Оценка вероятности ошибочного приема в многопозиционных системах связи // Труды НИИР. 1973. № 4.
29. *Котов В.С., Функ Л.М.* О двух методах приема сигналов ДЧТ // Радиотехника. 1964. № 2.
30. *Агапов И.Ф.* Двухканальное частотное радиотелеграфирование (ДЧТ) // Радиотехника. 1954. № 3.
31. *Cahn C.R.* Combined Digital Phase and Amplitude Modulation Communication Systems // IRE Trans. CS-8. September 1960.
32. *Campopiano C.N., Glazer B.G.* A Coherent Digital Amplitude and Phase Modulation Scheme // IRE Trans. Commun. Syst. CS-10. March 1962.
33. *Smith J.G.* Odd-Bit Quadrature Amplitude Shift Keying // IEEE Trans. COM-23. March 1975.
34. *Slepian D.* Permutation Modulation // Proc IEEE. 1965. № 3.
35. *Reed I.S., Scholtz.* N-Orthogonal Phase-Modulated Codes // IEEE Trans. IT-12. July 1966.
36. *Lindsey W.C., Simon M.K.* L-Orthogonal Signal Transmission and Detection // IEEE Trans. COM-20. October 1972.
37. *Гинзбург В.В.* Многомерные сигналы для непрерывного канала // Проблемы передачи информации. 1984. № 1.
38. *Ungerboeck G.* Channel Coding with Multilevel Phase Signal // IEEE Trans. on Information Theory. 1981. № 1.
39. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / А.Г. Зюко, А.И. Фалько, И.П. Панфилов и др. М.: Радио и связь, 1985.
40. *Зяблов В.В., Коробков Д.Л., Портной С.Л.* Высокоскоростная передача сообщений в реальных каналах. М.: Радио и связь, 1991.

§ 3

1. *Barrow B.B.* Translation of historic paper on diversity reseption // Proc. IRE. 1960. № 1.
2. *Beverage H., Peterson H.* Diversity Receiving System of RCA Communication for Radiotelegraphy // Proc. IRE. 1931. № 4.
3. *Fries H.T., Feldman G.B.* A Multiple Unit Steerable Antenna for Short Wave // Proc. IRE. 1937. V.16. № 7.
4. *Eckersley T.L.* A discussion on short wave fading. Marconi Review. 1928. № 1.
5. *Сифоров В.И.* Отчет ЦРЛ за 1930 г. (неопубликованная работа)
6. *Котельников В.А.* Количественная оценка различных методов борьбы с замираниями // Научно-техн. сб. Института связи. 1936. Вып. 11.
7. *Шумская Н.И.* // Научно-техн. сб. Института связи. 1936.
8. *Шукин А.Н.* Применение теории вероятностей к явлению замирания (федингу) // ЖТФ. — 1937. Т. VII. Вып. 2.
9. *Мельников В.С.* Сложение приемников при приеме на разнесенные антенны / Докл. на Всесоюзной конференции Научно-технического общества им. А.С. Попова. 1947.
10. *Хмельницкий Е.А.* Разнесенный прием и оценка его эффективности. — М.: Связьиздат, 1960.
11. *Финк Л.М.* Теория передачи дискретных сообщений. — М.: Сов. радио, 1963.
12. *Андронов И.С., Финк Л.М.* Передача дискретных сообщений по параллельным каналам. — М.: Сов. радио, 1971.
13. *Кловский Д.Д.* Передача дискретных сообщений по радиоканалам. — М.: Связь, 1969.
14. *Хворостенко Н.П.* Статистическая теория демодуляции дискретных сигналов. — М.: Связь, 1968.
15. *Turin G.L.* On Optimal Diversity Reception // Trans. IT-7. 1960. №3. Pt.1-IRE; Trans. CS-10. 1962. № 1 Pt.2-IRE.
16. *Турин Дж.* Лекции о цифровой связи. М.: Мир, 1972.
17. *Turin G.L.* A Statistical Model for Urban Maltipath Propagation // IEEE Trans. Veh. Tech. 1972. V. 21. № 2.
18. *Pierce I.N.* Theoretical Diversity Improvement in Frequency-Shift Keying // Proc.IRE. May 1958.
19. *Lindsey W.C.* Asymptotic Performance Characteristics for the Adaptive Coherent Multireceiver and Noncoherent Multireceiver Operating Through the Rician Fading Multichannel // IEEE Trans. on Com. and Electr. January 1964.
20. *Lindsey W.C.* Error Probability for Incoherent Diversity Reception // IEEE Trans. IT-11. 1965. № 4.
21. *Быховский М.А.* Способы оценки вероятности ошибочного приема в теории передачи дискретных сообщений. // Радиотехника. Ч.1. Двухпозиционные системы разнесенного приема. 1971. № 12; Ч.2. Системы с многопозиционными сигналами. 1972. № 1.
22. *Pierce I.N., Stein S.* Multiple Diversity with Nonindependent Fading // Proc. IRE. 1960. № 1.
23. *Быховский М.А.* Анализ помехоустойчивости приема на основе модели КВ-канала, учитывающей особенности распространения радиоволн // Труды НИИР. 1972. № 1, 2.

§ 4

1. *Кеннеди Р.* Каналы связи с замираниями и рассеянием. М.: Сов. радио, 1973.
2. *Price R., Gren P.E.* A Communication Technique for Multipath Channels // Proc. IRE. 1958. № 3.
3. *Харкевич А.А.* Передача сигналов модулированным шумом // Электросвязь. 1957. № 11.
4. *Быховский М.А.* Помехоустойчивость метода когерентного сложения сигналов в многолучевом сигнале при неполном разделении лучей // Проблемы передачи информации. 1969. Вып. 1.

5. *Bello P., Nelin B.D.* Predetection Diversity Combining with Selectively-Fading Channels // Trans. IRE CS-10. March 1962.
6. *Hancock J.C., Lindsey W.C.* Optimum Performance of Self-Adaptive Systems Operating Through a Rayleigh –Fading Medium // IRE Trans. CS-11. 1963. № 4.
7. *Proakis J.G., Drouilhel P.R., Price R.* Performance of coherent detection systems using decision-directed channel measurement // IEEE Trans. March 1964. V. CS-12.
8. *Nyquist H.* Certain topics in telegraph transmission theory // Trans. AIEE. 1928. V.47.
9. *Клюевский Д.Д.* Передача дискретных сообщений по радиоканалам. М.: Радио и связь, 1984. 2-е изд.
10. *Николаев Б.И.* Последовательная передача дискретных сообщений по непрерывным каналам с памятью. М.: Радио и связь, 1988.
11. *Austin M.E.* Decision-feedback equalization for digital communication over dispersive channel / Rept. 437. Lexington, Mass.: MIT Lincoln Lab. Tech. August 1967.
12. *Price R.* Nonlinearly feedback-equalized PAM vs capacity for noisy filter channels // Rec. Int. Conf. Com. ICC-1972.
13. *Belfiore C.A., Park J.N.* Decision feedback equalization // Proc. IEEE. 1979. V. 67. № 8.
14. *Chang R.W., Hancock J.C.* On receiver structures for channel having memory // IEEE Trans. IT-12. October 1966.
15. *Forney G.D.* Maximum-likelihood sequence estimation of digital sequences in the presence of intersymbol interference // IEEE Trans. IT-18. May 1972.
16. *Kobayashi H.* Correlative level coding and maximum-likelihood decoding // IEEE Trans. IT-17. September 1971.
17. *Omura J.K.* Optimal receiver design for convolutional codes and channel with memory via control theoretical concepts // Inform. Sci. July 1971. V. 3.
18. *Kettel E.* Ein automatischer Optimizator für den Abgleich des Impulsen-tzerrers in Datenübertragung // Arch. Elektr. Übertr. 1964. № 18.
19. *Taftis D.W.* Nyquist's problem the joint optimisation of transmitter and receiver in PAM // Proc. IEEE. 1965. V. 53. № 3.
20. *Di Toro M.J.* Communication in Time-Frequency Spread Media Using Adaptive Equalization // Proc. IEEE. 1968. V. 56. № 10.
21. *Lucky R.W.* Techniques for adaptive equalization for digital communication systems // BSTJ. V. 45. № 2.
22. *Зяблов В.В., Коробков Д.Л., Портной С.Л.* Высокоскоростная передача сообщений в реальных каналах. — М.: Радио и связь, 1991.

§ 5

1. *Котельников В.А.* Теория потенциальной помехоустойчивости. — М.: ГЭИ, 1956.
2. *Woodward P.M.* Probability and information theory, with applications to radar. N.Y.: McGraw-Hill. 1953.
3. *Middleton D., Van Meter D.* Detection and Extraction of Signals in Noise from the Point of View of Statistical Decision Theory // J. Soc. Ind. Appl. Math. 1955. V. 3. № 4; 1956. V. 4. № 2.
4. *Middleton D.* An Introduction to Statistical Communication Theory. — N.Y.: Mc. Graw-Hill. 1960.
5. *Ван Трис Г.* Теория обнаружения, оценок и модуляции. — М.: Сов. радио, 1972.
6. *Тихонов В.И.* Оптимальный прием сигналов. — М.: Радио и связь, 1972.
7. *Фомин А.Ф.* Помехоустойчивость систем передачи непрерывных сообщений. М.: Сов. радио, 1975.
8. *Slepian D.* Estimation of signal parameters in the presence of noise // IRE Trans. 1954. V. IT-3. № 2.
9. *Bello P.* Joint estimation of delay, Doppler, and Doppler rate // IRE Trans. IT-6. 1960.

10. *Swerling P.* Maximum Angular Accuracy of a Pulsed Search Radar // Proc.IRE. 1956. V. 44.
11. *Фалькович С.Е.* Оценка параметров сигнала. — М.: Сов. радио. 1970.
12. *Куликов Е.И., Трифонов А.П.* Оценка параметров сигналов на фоне помех. — М.: Сов. радио, 1978.
13. *Вайнштейн Л.А., Зубаков В.Д.* Выделение сигналов на фоне случайных помех. — М.: Сов. радио, 1960.
14. *Middleton D., Esposito R.* Simultaneous Optimum Detection and Estimation of Signals in Noise // IEEE. Trans. IT-14. 1968. № 3.
15. *Быховский М.А.* Потенциальная помехоустойчивость разделения двух сигналов с ЧМ // Электросвязь. 1979. № 10.
16. *Bryn F.* Optimal signal processing of tree-dimensional arrays operating on Gaussian signals and noise // J. Acoust. Soc. Am. March 1962. V. 34.
17. *Middleton D., Groginsky H.L.* Detection of random acoustical signals by receivers with distributed elements: optimum receivers structures for normal signals and noise fields // J. Acoust. Soc. Am. November 1965. V. 38.
18. *Young G.O.* Optimal space-time signal processing and parameter estimation // IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems. May 1968. V. AES-4.
19. *Van Trees H.L.* Optimal signal design and processing for reverberation — limited environment / // IEEE Trans. Military Electronics. July — October 1965. V. MIL-9.
20. *Middleton D.* Multidimensional detection and extraction of signals in random media // IEEE Proc. 1970. V. 58. № 5.
21. *Young G.O., Howard J.E.* Application of space-time decision and estimation theory to antenna processing system design // Proc. IEEE. 1970. V. 58. № 5.
22. *Амиантов И.Н.* Избранные вопросы статистической теории связи. — М.: Сов. радио, 1971.
23. *Быховский М.А.* Потенциальная помехоустойчивость двухканального приема сигналов с частотной модуляцией // Труды НИИР. — 1979. — № 1.
24. *Darlington S.* Demodulation of wideband low-power FM signals // BSTJ. 1964. V. 43. № 1.
25. *Akima H.* Theoretical studies on signal-to-noise characteristics of an FM system // Trans. IEEE. SET-9. 1963.
26. *Возенкрафт Дж., Джекобс И.* Теоретические основы техники связи. — М.: Мир, 1969.
27. *Ziv V., Zakai M.* Some lower bounds in signal parameter estimation // Trans. IEEE. May 1969. V. IT-15.
28. *Seidman L.* Performance limitation and error calculation for parameter estimation // Proc. IEEE. 1970. V. 58. №5.
29. *Seidman L., McAuley R.J.* A useful form of the Barankin lower bound and its application to PPM threshold analysis // Trans. IEEE. IT-15. March 1969.

§ 6

1. *Быховский М.А.* Круги памяти / Сер. изданий «История электросвязи и радиотехники». — М.: Мобильные коммуникации. 2000. Вып. 1.
2. *Lehan F.W., Parks R.J.* Optimum demodulation // IRE Nat. Conf. Rec. 1953. Pt. 8. P. 101—103.
3. *Youla D.C.* The use of the method of maximum likelihood in the estimation continuous modulated intelligence which has been corrupted by noise // IRE Trans. 1954. V. IT-3. № 2.
4. *Van Trees H.L.* Detection, Estimation and Modulation Theory. N. Y.: Wiley. 1968. Pt. I; 1971 Pt. II, III. (Теория обнаружения, оценок и модуляции. — М.: Сов. радио, 1972. Ч.1; 1975. Ч.2; 1977. Ч. 3).
5. *Thomas J.B., Wong E.* On the statistical theory of optimum demodulation // IRE Trans. 1960. V. IT-6. № 9.
6. *Viterbi A.J.* Principles of coherent communication. N. Y.: McGraw-Hill. 1966.

7. *Большаков И.А., Репин В.Г.* Проблемы нелинейной фильтрации. Ч. I // Автоматика и телемеханика. 1961. № 4.
8. *Большаков И.А., Репин В.Г.* Вопросы нелинейной фильтрации. Ч. II // Автоматика и телемеханика. 1964. № 12.
9. Вопросы статистической теории радиолокации / П.А. Бакут, И.А. Большаков, Б.М. Герасимов и др. // Под ред. Г.П. Тартаковского. — М.: Сов. радио, 1963. Т. I; 1964. Т. II.
10. *Lindsey W.C.* Optimum coherent amplitude demodulation // Proc. Nat. Electron. Conf. October 1964. V. 20.
11. *Кантор Л.Я., Дорофеев В.М.* Помехоустойчивость приема ЧМ-сигналов. — М.: Связь, 1976.
12. *Быховский М.А.* Потенциальные возможности разделения двух сигналов, передаваемых в общей полосе частот // Радиотехника и электроника. 1981. № 12.
13. *Быховский М.А.* Разделение двух ЧМ-сигналов с помощью итерационного компенсатора // Труды НИИР. 1982. № 2.
14. *Быховский М.А.* Синтез и анализ двухканального компенсатора помех для сигналов с ЧМ // Электросвязь. 1980. № 10.
15. *Middleton D.* An Introduction to Statistical Communication Theory. N. Y.: McGraw-Hill. 1960.
16. *Стратонович Р.Л.* К теории оптимальной нелинейной фильтрации случайных функций // Теория вероятностей и ее применение. 1959. № 2.
17. *Стратонович Р.Л.* Условные марковские процессы. — М.: МГУ, 1966.
18. *Kushner H.J.* On the differential equation satisfied by conditional probability densities of Markov processes, with applications // J. SIAM Control. 1964. № 1.
19. *Baggeroer A.B.* State variables and communication theory. Cambridge, Mass.: MIT Press. 1970.
20. *Тихонов В.И., Кульман Н.К.* Нелинейная фильтрация и квазикогерентный прием сигналов. — М.: Сов. радио, 1975.
21. *Ярлыков М.С.* Применение марковской теории нелинейной фильтрации в радиотехнике. — М.: Сов. радио, 1980.
22. *Тихонов В.И., Харисов В.Н.* Оптимальный прием дискретных сигналов и тактовая синхронизация // Радиотехника и электроника. 1980. № 3.
23. *Харисов В.Н.* Синтез систем синхронизации со случайным запаздыванием регулирования // Радиотехника и электроника. 1982. № 9.
24. *Детинов А.Н.* Оптимальный прием фазоманипулированных сигналов // Радиотехника и электроника. 1968. № 3.
25. *Дмитриев В.П.* Оптимальная фильтрация сигналов синхронизации // Радиотехника и электроника. 1968. № 4.
26. *Амиантов И.П.* Избранные вопросы статистической теории связи. — М.: Сов. радио, 1971.
27. *Snyder D.* The state — variable approach to continuous estimation with applications to analog communication theory. Cambridge, Mass.: MIT Press. 1969.

Глава 4. Создание и развитие теории информации

§ 1. Предыстория

Годом рождения теории информации следует считать 1948 г., когда выдающийся американский ученый **Клод Шеннон** опубликовал свою знаменитую статью «Математическая теория связи» об основных закономерностях передачи информационных сообщений по каналам связи.

Подобно тому, как за открытием Исааком Ньютоном законов механики последовало бурное развитие многих современных технологий (например, всех видов наземного и воздушного транспорта, космической техники и т.д.), так и открытие новых закономерностей передачи информационных сообщений создало предпосылки быстрого и глобального развития телекоммуникаций. Эти закономерности связаны с двумя разными аспектами проблем, которые с давних пор стояли перед инженерами, разрабатывающими новые системы связи.

Первая из них касалась возможностей устранения избыточности передаваемых сообщений, что позволило эффективнее использовать каналы связи, вторая — возможностей передачи сообщений с минимальными искажениями по каналам связи с шумом.

Для решения обеих проблем необходим был адекватный аппарат, позволяющий математически описывать сигналы, передаваемые по каналам связи. Ни одно из крупных научных направлений, естественно, не возникает на пустом месте. Фундамент, на котором К. Шеннон построил свою теорию, подготавливался его предшественниками, в работах которых, выполненных в первой трети XX столетия, были сформулированы новые понятия и установлены важные принципы теории связи.

Математическое описание сигналов, передаваемых по каналу связи. Отметим две важные работы, которые в начале XX в. формировали представление инженеров о свойствах сигналов, используемых для передачи информации. Дж. Карлсон в 1922 г. ввел понятие спектра сигналов и определил спектр сигналов с ЧМ [1], подведя черту под спором, который инженеры вели несколько лет, о возможности сокращения с помощью ЧМ полосы частот, занимаемой системой передачи сообщения в эфире. Интересно отметить, что на самом деле за шесть лет до Дж. Карлсона важнейшее для теории связи понятие спектра сигналов было введено применительно к сигналам с АМ академиком М.В. Шулейкиным. Однако его работа [2] была опубликована в малоизвестном журнале и не стала доступной широкому кругу специалистов. В 20-е гг. дискуссия об адекватности спектральных представлений в теории связи была весьма жаркой. Так, знаменитый изобретатель вакуумного диода американский инженер Дж. Флеминг резко выступал против их использования и считал возможным, применяя ЧМ, сократить занимаемую системой связи в эфире полосу частот. Важной работой оказалась статья Д. Габора [3], в которой в теорию связи было введено, по-видимому,

впервые плодотворное понятие комплексного аналитического сигнала, действительную часть которого представляет сам сигнал, а мнимая — является его преобразованием Гильберта. Эти понятия сегодня играют в теории связи ключевую роль.

Один из основных законов теории связи был установлен в 1924 г. **Г. Найквистом** (США) [4] и **К. Купфмюллером** (Германии) [5]. Согласно этому закону, по каналу с шириной полосы F за время T можно передать не более $2FT$ значений телеграфного сигнала. Математически этот закон выражает важнейшую закономерность в теории связи следующим образом:

$$N \geq 2FT,$$

где N — число отсчётов, необходимое для представления временного отрезка сигнала длительностью T , а F — полоса частот, занимаемая телеграфным сигналом. При данном критерии информация не утрачивается и этот сигнал может быть полностью восстановлен. Установленные Найквистом основополагающие принципы теории связи оказали огромное влияние на прогресс в области телекоммуникаций, связанный с переходом от аналоговых систем передачи сообщений (аналоговые сигналы вырабатываются большинством источников информации — микрофонами, телевизионными камерами и т.п.) к цифровым. В цифровых системах каждый из отсчётов сигнала преобразуется в цифровую форму и в виде последовательности символов (чаще всего бинарных) передаётся по каналу связи.

К знаковым работам, относящимся к предистории теории информации, относится работа академика **В.А. Котельникова** [6], который в 1933 г. установил знаменитую теорему, позволяющую представить любую функцию $S(t)$ с ограниченной полосой частот F своими отсчётами, взятыми через интервалы времени $\tau = 1/2F$ следующим образом:

$$S(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} S(n\tau) [\sin 2\pi F(t - n\tau) / 2\pi F(t - n\tau)].$$

Позже, в 1948 г., эта же формула независимо была установлена **Клодом Шенноном**. В честь этих крупнейших учёных XX в. данную формулу иногда называют формулой Котельникова—Шеннона—Найквиста. Важную роль в развитии теории связи сыграли исследования **Д.В. Агеева** [7], который рассмотрел возможности передачи в одном канале нескольких сообщений, осуществляющих модуляцию различных ортогональных сигналов. Он был, по-видимому, первым, кто плодотворно стал использовать в теории связи понятия многомерного пространства. Позже эти понятия эффективно применяли в своих основополагающих исследованиях **В.А. Котельников** и **К. Шеннон**.

Сокращение избыточности сообщений привлекало внимание людей еще в древние времена. Так, со времен Юлия Цезаря для ускорения записи его речей использовалась стенография — способ кодирования слов речи, при котором для записи наиболее часто употребляемых оборотов речи применялись наиболее простые и короткие символы.

Для сокращения избыточности телеграфных сообщений знаменитый американский изобретатель телеграфа **Самуэль Морзе** создал в 1837 г. код, который в его честь называют кодом Морзе. Этот код был построен таким образом, что наиболее часто встречающимся в тексте буквам английского алфавита были присвоены наиболее

короткие последовательности, состоящие из точек и тире. Он позволял передавать телеграфные сообщения по каналу связи, используя наименьшее в среднем число символов, т.е. затрачивая на передачу меньшее время. Этот код, учитывающий распределение вероятностей в текстах букв английского алфавита, явился первым практическим примером статистического кодирования дискретного источника сообщений. О высокой эффективности кода Морзе говорит то, что он до сих пор находит практическое применение.

Речевые сигналы также обладают большой избыточностью. В 1939 г. американский инженер Г. Дадли (США) изобрел вокодер — устройство, использующее особенности речи для сокращения пропускной способности канала связи, необходимой для ее передачи, в 5–10 раз [8].

Хотя отдельные проблемы устранения избыточности в сообщениях были решены задолго до появления теории информации, это нисколько не умаляет значения открытых Шенноном общих принципов сжатия данных, относящихся к источникам информации произвольной природы. Это направление теории информации имеет важное прикладное значение. В последние годы на основе этих принципов разработан ряд весьма эффективных практических методов для сжатия сигналов телеметрии, фототелеграфии, телефонии, телевидения, звукового вещания и пр. Следует подчеркнуть, что сжатие данных чрезвычайно важно не только для электросвязи, где оно позволяет эффективнее использовать каналы связи, передавая по ним только наиболее существенную часть информации, но и для других областей техники, где требуется запомнить большой объем информации, так как при этом экономится значительное число ячеек памяти.

Первой работой, в которой было введено одно из важнейших понятий теории связи — понятие информации, содержащейся в сообщении, стала статья [9] американского ученого Р. Хартли, опубликованная в 1928 г. До этой работы само понятие «сообщение» носило расплывчатый характер. В работе Хартли информация, содержащаяся в сообщении, связывалась с последовательным выбором на передающем конце линии связи символов или слов независимо от их смысла. Он показал, что в сообщении из N символов, выбранных из алфавита, имеющего K «букв», возможно формирование $M = K^N$ сообщений. Р. Хартли предполагал, что каждая «буква» выбирается для передачи по каналу связи с одинаковой вероятностью $1/K$, и предложил определять информацию, содержащуюся в одном передаваемом символе сообщения, равной $\log M/N = \log K$. Идея Р. Хартли использовать логарифмическую меру информации, содержащейся в сообщении, была позже существенно обобщена **К. Шенноном**.

Следует отметить, что характерной чертой современной теории связи является статистический подход к описанию как сообщений, передаваемых по каналу связи, так и действующих в канале связи шумов. Такой подход также начали применять в теории связи до публикации работ К. Шеннона. Одной из первых работ, в которых вопросы помехоустойчивости приема нескольких используемых в те годы на практике методов передачи дискретных сообщений были исследованы с учетом действия в канале связи случайных шумов, явилась докторская диссертация члена-корреспондента АН СССР **В.И. Сифорова** [10]. Многими своими принципами современная статистическая теория связи обязана **Н. Винеру**. Его классическая работа [11] «Ин-

терполяция, экстраполяция и сглаживание временных рядов», выполненная в 1942 г., но рассекреченная и опубликованная только в 1949 г., содержала первую четкую формулировку теории связи как статистической проблемы.

Таковы были основные результаты теории связи, полученные учеными до появления работы К. Шеннона.

§ 2. Создание теории информации

В 1948 г. отдельные разрозненные идеи предшественников были обобщены **К. Шенноном** в его знаменитой работе «Математическая теория связи» [1]. В ней дано четкое математическое описание проблем, стоящих перед теорией связи, и указаны пути их решения. Система связи любого назначения представлена структурной схемой (рис. 4.1), на которой выделены основные функциональные элементы.



Рис. 4.1

Источник на рис. 4.1 представляет собой случайный генератор данных или аналогового стохастического сигнала, а кодер источника осуществляет отображения его выхода в дискретную последовательность символов (обычно двоичную). Назначение кодера источника сообщений — устранение избыточности сообщений, поступающих от источника. Например, если источником сообщений являются буквы алфавита, закодированные равномерным кодом, то, учитывая вероятности их появления в тексте, в кодере источника можно наиболее вероятные буквы перекодировать, как это осуществлено в коде Морзе, короткими кодовыми комбинациями. Простейшим примером кодера аналогового источника служит аналого-цифровой преобразователь, называемый также квантователем; для него декодер источника — цифроаналоговый преобразователь. Мерой достигаемого сжатия данных источника служит скорость, выраженная числом символов (обычно двоичных) в единицу времени, которое необходимо для полного представления и последующего восстановления декодером источника выходной последовательности источника. При этом учитываются статистические характеристики источника и допускается определенный уровень искажений сигнала, поступающего от источника сообщений. Чем выше допустимый уровень искажений, тем экономнее описание сообщения, поступающего от источника. Кодеры и декодеры должны осуществлять взаимно однозначные преобразования таким образом, чтобы получатель сообщений в отсутствие искажений в канале получал тот же сигнал, который действует на входе кодера источника.

Назначением кодера и декодера канала является обеспечение надежной передачи выходной последовательности кодера источника по каналу связи с шумом. На выходе декодера, несмотря на ошибки в приеме сигналов, возникающие из-за действующих в канале связи шумов, должна формироваться с высокой вероятностью та же последовательность, которая поступает на вход кодера канала связи. Этого можно достичь, используя эффективные коды, исправляющие ошибки, которые возникают при передаче сообщений по каналу связи.

По Шеннону, теория связи имеет дело с двумя основными проблемами:

1. Кодирование источника таким образом, чтобы среднее число двоичных символов, приходящихся на один символ источника сообщений, было минимальным. Решение этой проблемы позволяет устранить избыточность из сообщения, подлежащего передаче, и достичь высокой эффективности использования канала связи либо объема памяти устройства хранения сообщений.

К. Шенноном, а затем многими другими учеными были установлены теоремы, определяющие скорость создания сообщений источниками с разными статистическими характеристиками. Так, для дискретного источника без памяти, у которого последовательные символы порождаются независимо и могут принимать с вероятностью p_i значения a_i ($i = 1, K$), среднее количество информации на один символ на выходе источника задается следующим выражением:

$$H(p_i) = \sum_{i=1}^K p_i \log(1/p_i) \leq \log K. \quad (1)$$

Отметим, что в случае, когда $p_i = 1/K$, данная формула совпадает с приведенной выше формулой Р. Хартли. Если p_i значительно отличаются друг от друга по величине, то $H(p_i) \ll \log(K)$, т.е. в данном случае возможно существенное сокращение избыточности сообщений, подлежащих передаче по каналу связи.

К формуле (1) можно прийти с помощью следующих простых соображений, приведенных **К. Шенноном** в своей работе. Они показывают связь подходов К. Шеннона и Р. Хартли к определению количества информации, содержащегося в сообщении. Выбирая достаточно длинную (длиной N) последовательность символов, поступающих от источника, можно утверждать, что в любой из таких последовательностей число символов a_i составит Np_i . Доля последовательностей, в которых количество символов a_i отличается от Np_i , ничтожно мала. Таким образом, число возможных последовательностей длины N , генерируемых источником, составляет

$$M = N! / \prod_{i=1}^K (Np_i)! \quad (2)$$

Здесь ! — знак факториала. Используя формулу Стирлинга $k! \approx \sqrt{2\pi k} (k/e)^k$, из (2) можно получить

$$H(p_i) = \lim_{N \rightarrow \infty} \{\log M / N\}.$$

Функцию $H(p_i)$ называют энтропией дискретного источника информации без памяти. Одним из методов сокращения избыточности источника сообщений в рассмотренном случае является метод блочного кодирования, когда на выходе кодера источ-

ника формируются номера каждой из M типовых последовательностей, поступающих от источника сообщений, количество которых с учетом того, что вероятности p_i значительно отличаются друг от друга, существенно меньше K^N .

К. Шеннон указал еще на один метод кодирования источника, когда сообщению a_i , появляющемуся с вероятностью p_i , ставится в соответствие кодовая комбинация, длина которой приблизительно равна $\log(1/p_i)$. При таком методе кодирования короткие коды присваиваются наиболее вероятным сообщениям. Независимо от Шеннона этот метод был открыт также другим американским ученым **Р. Фано**.

К. Шенноном было введено еще одно очень важное понятие — «кодирование сообщений при данной точности воспроизведения» и указан метод определения скорости создания сообщений при таком кодировании. Согласно К. Шеннону в кодере непрерывного сигнала $x(t)$ осуществляется его преобразование в сигнал $y(t)$. «Мгновенное» значение погрешности преобразования кодируемого сигнала в кодере определяется функцией $\rho(x,y)$. Среднее значение возникающих при этом искажений равно

$$\varepsilon^2 = \iint \rho(x,y)p(x,y)dx dy.$$

К. Шеннон показал, что скорость создания сообщений R при заданном ε^2 может быть определена следующим образом:

$$R(\varepsilon) = \min_{p_x(y)} \iint p(x,y) \log[p(x,y)/p(x)p(y)] dx dy. \quad (3)$$

Для гауссовского источника сообщений, имеющего полосу F и мощность σ^2 при $\rho(x,y) = (x - y)^2$ из (3), следует, что

$$R(\varepsilon) = F \log_2(\sigma^2/\varepsilon^2) \text{ бит/с.}$$

К. Шенноном были установлены общие теоремы, определяющие возможности устранения избыточности как дискретных, так и непрерывных источников информации, обладающих разными статистическими характеристиками.

2. Кодирование канала, т.е. преобразование последовательности информационных символов, передаваемых по каналу связи, в код таким образом, чтобы было минимизировано влияние шумов канала связи и тем самым минимизированы различия в информационных символах между входной последовательностью кодера канала и выходной последовательностью декодера канала.

Решение этой проблемы позволяет при заданном отношении сигнал/шум в месте приема, определяющем пропускную способность канала связи, передать по нему сообщения со сколь угодно высокой достоверностью. Для этого, как показал К. Шеннон, необходимо использовать помехоустойчивые коды, а скорость передачи информации по этому каналу должна быть меньше его пропускной способности. Им же было показано, что, вводя в кодере канала достаточную, но конечную избыточность, можно добиться безошибочной передачи сообщений, передаваемых по каналу с шумом. Единственным и необходимым условием этого является то, чтобы скорость R передачи сообщений была меньше пропускной способности канала связи C .

Для симметричного двоичного канала, в котором ошибки символов 0 и 1 происходят независимо с вероятностью p , пропускную способность можно определить, используя следующие соображения К. Шеннона. При передаче любой достаточно длинной

последовательности из N символов она из-за ошибок в канале преобразуется в одну из последовательностей, отличающихся от исходной в Np позициях. Количество таких возможных последовательностей составляет $M/(Np)!(Nq)!$, где $q = 1 - p$. Если для передачи сообщений использовать не все 2^N возможных последовательностей, а только

$$M = 2^N/[N!/(Np)!(Nq)!],$$

то вероятность перехода одной из M последовательностей в другую из-за ошибок в канале при больших N будет ничтожно мала. Пропускная способность канала, т.е. максимально возможная скорость безошибочной передачи информации в этом канале, составит

$$C = \lim_{N \rightarrow \infty} \{\log_2 M / N\} = 1 - p \log_2 p - (1 - p) \log_2 (1 - p).$$

Доказав теорему о пропускной способности дискретного канала, **К. Шеннон** привел простой пример семизначного кода, предложенного **Р. Хэммингом**. Этот код позволяет исправлять одиночные ошибки в кодовой комбинации, возникающие в процессе приема сигналов.

Для непрерывных каналов связи К. Шеннон ввел формулы совместной энтропии $H(x, y)$ непрерывного распределения процессов $x(t)$ и $y(t)$ и условных энтропий $H_x(x)$ и $H_x(y)$:

$$H(x, y) = - \iint p(x, y) \log p(x, y) dx dy ;$$

$$H_y(x) = - \iint p(x, y) \log [p(x, y) / p(y)] dx dy ;$$

$$H_x(y) = - \iint p(x, y) \log [p(x, y) / p(x)] dx dy .$$

Используя введенные понятия, он показал, что пропускная способность канала связи может быть определена следующей общей формулой:

$$C = \lim_{T \rightarrow \infty} \left\{ \max_{p(x)} \frac{1}{T} \iint p(x, y) \log [p(x, y) / p(x)p(y)] dx dy \right\}.$$

Для пропускной способности непрерывного канала связи с полосой частот F , в котором действует «белый» тепловой шум мощности P_n , а мощность принимаемого сигнала равна P_s , им была установлена следующая знаменитая формула:

$$C = F \log [1 + P_s / P_n].$$

Следует отметить, что данная формула (как было отмечено самим К. Шенноном) независимо была выведена и другими учеными — **Н. Винером** [2] и В.Г. Таллером [3].

Шеннон доказал, что по любому каналу связи возможна передача информации без искажений, если скорость передачи меньше пропускной способности канала. Эта пропускная способность определяется отношением сигнал/шум на входе приемника и полосой частот, используемой для передачи. Открытие Шенноном теоремы о пропускной способности принадлежит к той категории человеческих достижений, о которых писатель С. Цвейг сказал: «Нет прекраснее правды, кажущейся неправдоподобной». Оно явилось для инженеров-связистов сенсацией, так как до работы Шеннона инженеры были убеждены, что уменьшить искажения сигналов при действии помех можно только путем уменьшения скорости передачи информации — повторяя передачу од-

ного и того же сигнала несколько раз. Так, для борьбы с искажениями при приеме телеграфных сигналов в 30-е гг. XX в. использовалась французская система Вердана — трехкратное автоматическое повторение сигналов.

В оригинальных работах **К. Шеннона** не было предложено конкретных инженерных решений, совершенствующих используемые в 40-х гг. методы передачи сообщений. Однако он установил фундаментальные закономерности передачи сообщений по каналам связи, которые определяли для любых систем передачи информации предельные возможности ее воспроизведения на приеме с заданной точностью. Эти закономерности открывали новые направления разработок систем связи, и круг ученых, ведущих исследования в этой области, стал быстро расширяться.

Пионерские идеи К. Шеннона оказались важными не только для технологии телекоммуникаций и других областей техники, но и для других научных направлений. Сам К. Шеннон до середины 60-х гг. продолжал активные научные исследования и получил ряд основополагающих результатов. К разработке идей К. Шеннона на строгой математической основе подключились известные математики. В США и в нашей стране возникли крупные научные школы, в которых были выполнены важные работы по созданию эффективных методов кодирования источников сообщений и канала связи.

Роберт ФАНО

Выдающийся американский ученый Роберт М. Фано родился 11 ноября 1917 г. в Торонто в Италии. В 1939 г. там же окончил Инженерную школу. Однако работать в Италии не стал, так как в этом же году семья Фано была вынуждена эмигрировать из фашистской Италии. Свое образование он продолжил в Массачусетском технологическом институте (МТИ) в Бостоне, где в 1941 г. получил степень бакалавра, а в 1947 г. — доктора наук. Во время Второй мировой войны он был сотрудником радиационной лаборатории МТИ, в которой занимался разработкой компонентов микроволновой техники и фильтров. В МТИ он проработал начиная с 1941 г. всю жизнь, будучи профессором факультета электротехники и ведя научные исследования в Исследовательской лаборатории электроники (ИЛЭ). В его деятельности можно выделить три периода, в течение которых он работал в нескольких направлениях: в области теории цепей и электромагнитной теории, теории информации и компьютерной техники. С 1950 по 1953 г. возглавлял группу радиолокационной техники в лаборатории им. Линкольна, в начале 60-х гг. в центре его научных интересов оказываются проблемы теории информации, а в 1963 г. он возглавляет крупный проект создания компьютерных сетей связи.

В первом из указанных направлений им было проведено ставшее классическим исследование вопросов согласования произвольных импедансов, которые являются ключевыми при проектировании электрических цепей и фильтров. Его работа [4], в которой были изложены



полученные им оригинальные результаты, была переведена и опубликована на русском языке в 1965 г. В соавторстве со своими коллегами по МТИ он написал в 1960 г. книгу [5] по теории электромагнитного поля. Эта книга была переиздана в 1968 г. В этом же году вышла еще одна книга [6], написанная теми же авторами.

К проблемам теории информации Р. Фано обратился в конце 40-х гг. В 1949 г. им был предложен эффективный метод кодирования источников информации, на выходе которых распределение вероятностей p_i появления символов, передаваемых в канал связи, существенно неравномерно. Коды, предложенные Р. Фано [7], ставили в соответствие передаваемым символам кодовые комбинации, длина которых была пропорциональна $\log(1/p_i)$. Этот метод кодирования источников информации в современной литературе называют методом Шеннона–Фано, так как он был независимо предложен К. Шенноном. В 1951 г. Р. Фано дал задание одному из своих студентов, *Давиду Хаффмену*, разработать оптимальный алгоритм кодирования источников сообщений. Д. Хаффмену удалось создать оптимальные коды, носящие теперь его имя. Эти коды нашли широкое применение для сжатия данных во многих отраслях техники. Их используют в системах передачи факсимильных сообщений, системах телевидения высокой четкости, устройствах памяти, компьютерной технике и т.д.

В 1955 г. группе ученых ИЛЭ, возглавляемой Р. Фано, удалось создать первые в мире эффективные с практической точки зрения кодирующее и декодирующее устройства для кода, позволяющего при заданной скорости передачи информации по каналу связи корректировать многократные ошибки. В 1956 г. им были открыты сверточные коды. За эти научные достижения он был в 1998 г. награжден Секцией теории информации Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) золотой юбилейной медалью.

В 1952 г. Р. Фано создал один из первых учебных курсов по теории информации [8]. В 1961 г. выходит его замечательная книга [9], в которой на высоком методическом уровне изложены основные результаты теории, известные к этому времени. В свою книгу Р. Фано включил ряд полученных им новых результатов, которые касались обратной теоремы кодирования для каналов связи, оценки сверху и снизу вероятности ошибочного приема ортогональных сигналов, вычисления на основе метода случайного кодирования К. Шеннона, показателя экспоненты $E(R)$ в формуле для вероятности ошибки при приеме кодовой комбинации. Им был сделан также эвристический вывод границы сферической упаковки для вероятности ошибки при приеме сигналов в дискретном канале без памяти. В 1965 г. эта книга под названием «Передача информации. Статистическая теория связи» вышла на русском языке.

В 1963 г. Р. Фано предложил новый алгоритм последовательного декодирования [10], который совершенствовал изобретенную Дж. Возенкрафтом процедуру последовательного декодирования. Этот алгоритм описан во всех книгах по теории кодирования и информации.

С 1963 по 1968 г. профессор Р. Фано — руководитель крупного проекта МАС (Machine-Aided Cognition and Multi-Access Computer). Идею данного проекта выдвинул ученый МТИ Дж. Ликлайдер, который возглавлял его проект с 1968 по 1971 г. Проект МАС следует отнести к крупнейшим проектам XX в. Он был направлен на разработку глобальной информационной системы на базе сетей, объединяющей многие компьютеры. Кроме того, в нем предусматривалось создание методов доступа к компьютерным сетям многих пользователей. Создание такой системы определило новое направление разработок в компьютерной технике. Права на ее разработку в 1965 г. приобрела Белл-лаборатория, и необходимое для него программное обеспечение создавалось в США объединенными усилиями ученых нескольких организаций. Данный проект разрабатывался в интересах Министерства обороны США. На его основе

должны были создать системы контроля и принятия коллективных решений с учетом информации, которой обладают многие офицеры в разных точках земного шара. Этот проект был также направлен на создание системы, позволяющей многим пользователям работать с программами, находящимися на одном мощном центральном компьютере. Автор проекта Дж. Ликлайдер полагал, что распределение времени доступа к центральному компьютеру между многими пользователями позволит достичь высокой эффективности его использования. Разработка данного проекта явилась предтечей создания сети Интернет, которой сейчас пользуются миллионы людей в разных странах мира. Многопользовательские компьютерные сети в настоящее время созданы во многих университетах в США и других странах. Развитие компьютерных технологий, которое обуславливает переход нашей цивилизации к новой форме организации — к информационному обществу, берет свое начало от проекта MAC, первым руководителем которого был видный американский ученый Р. Фано.

Р. Фано — заслуженный профессор МТИ. В 1973 г. за работы, выполненные при создании первой интерактивной компьютерной системы для многих пользователей, и за значительный вклад в разработку проблем теории связи он был избран почетным членом Института радиоинженеров.

Профессор Р. Фано является также членом Американской академии искусств и наук и ряда других профессиональных обществ. Он входил в состав административного комитета Секции теории информации IEEE и был председателем редакционного совета журнала IEEE Transaction on Information Theory.

§ 3. Развитие математических основ теории информации

Шенноном были рассмотрены только простейшие математические модели источников сообщений и каналов связи. Предполагалось, что статистические характеристики источников и каналов связи заранее точно известны и не имеют памяти. Идеи Шеннона породили лавину работ в открытой им новой научной области. В научных обзорах [1–28] освещались новые результаты, полученные многими учеными на протяжении более чем полувекового периода развития теории информации.

Обоснование теории информации. Поскольку теория информации зародилась при решении задач электросвязи, то ее большое значение для других областей знаний, и в частности для математики, не сразу было понято. На первых порах к идеям **К. Шеннона** многие отнеслись со скептицизмом. Так, крупный американский специалист в области теории вероятностей Дж. Л. Дуб в своей рецензии на работу К. Шеннона отмечал, что она целиком основана на эвристических предположениях и не содержит ни одного математически строго доказанного результата.

В 1963 г. академик **А.Н. Колмогоров** писал: *«Значение работ Шеннона для чистой математики не сразу было достаточно оценено. Мне вспоминается, что еще на международном съезде математиков в Амстердаме (1954 г.) мои американские коллеги, специалисты по теории вероятностей, считали мой интерес к работам Шеннона несколько преувеличенным, так как это более техника, чем математика. Сейчас такие мнения вряд ли нуждаются в опровержении».*

В середине 50-х гг. за разработку математических аспектов теории информации взялись крупные математики. Из американских ученых в первую очередь назовем математиков Б. МакМилана, обобщившего в 1953 г. [29] установленные К. Шенноном

теоремы кодирования для марковских источников сообщений на общий класс эргодических источников, А. Файнштейна [30] и Дж. Вольфовица [31], которые в своих работах, выполненных после 1953 г., дали строгое, основанное на теории меры, доказательство теоремы кодирования каналов связи с шумом. Этими учеными были математически строго доказаны и обобщены теоремы кодирования для разных моделей дискретных и непрерывных источников сообщений и каналов связи.

В нашей стране важные в принципиальном отношении работы были выполнены академиком **А.Н. Колмогоровым** [32]. В одной из своих работ он ввел определение взаимной информации, которое, в отличие от подхода **К. Шеннона**, основывалось на теории рекурсивных функций [33]. Другой крупный отечественный математик член-корреспондент АН СССР **А.Я. Хинчин** доказал ряд результатов теории информации для случая, когда источники сообщения описываются стационарной марковской цепью. Ему принадлежит также строгое аксиоматическое обоснование теории информации, и он получил ряд важных асимптотических результатов этой теории [34, 35]. Обоснованию понятия взаимной информации и разработке методов ее вычисления были посвящены работы А.Н. Колмогорова и его учеников — профессоров И.М. Гельфанда, А.М. Яглома, **Р.Л. Добрушина** и **М.С. Пинскера** [36–41].

Р.Л. Добрушин ввел понятие информационной стабильности пар случайных переменных и установил общие условия, при которых справедливы теоремы К. Шеннона для каналов связи. **М.С. Пинскером** были разработаны критерии информационной устойчивости широкого класса случайных величин и процессов [39–41].

Особое место в развитии теории информации занимают работы крупного отечественного ученого **Р.Л. Стратоновича**. В своей книге [42], в которую вошли его работы 1965–1975 гг., он изложил проблемы теории информации с привлечением положений статистической термодинамики и теории оптимальных статистических решений. Им была также создана теория ценности хартлиевского, больцмановского и шенноновского количества информации.

Марк Семенович ПИНСКЕР

Марк Семенович Пинскер — один из крупнейших отечественных ученых в области теории информации, родился 24 апреля 1925 г. После окончания механико-математического факультета МГУ в 1949 г. работал в одном из научно-исследовательских институтов, а затем до 1955 г. преподавал математику в средних школах. С 1955 г. начал работать в Лаборатории по разработке проблем проводной связи АН СССР, которая с 1961 г. стала Институтом проблем передачи информации.



В 1958 г. М.С. Пинскер защитил кандидатскую, а в 1964 г. — докторскую диссертации в области физико-математических наук. В 1973 г. ему было присвоено ученое звание профессора. Им было подготовлено более 20 кандидатов и пять докторов наук.

М.С. Пинскер принадлежит к научной школе выдающегося математика XX столетия академика А.Н. Колмогорова, который привлек в 50-х гг. его внимание к проблемам теории информации. Пинскеру принадлежат многие важные научные результаты в области теории связи, которые отражены в многочисленных публикациях (он опубликовал более 150 статей в ведущих научных журналах). Полученные им результаты охватывают широкий круг сложнейших проблем теории связи, а также математической статистики и эргодической теории, которые инициировали большое количество новых работ, выполненных другими учеными.

В середине 50-х гг. М.С. Пинскером независимо от другого крупного отечественного ученого А.М. Яглома были получены основополагающие результаты в теории оптимальной фильтрации и экстраполяции случайных процессов, которая нашла широкое применение в теории оптимального приема сигналов.

Фундаментальные результаты по теории информации были установлены М.С. Пинскером в начале 60-х гг. XX в. Они отражены в его работе «Информация и информационная устойчивость случайных величин и процессов» (Проблемы передачи информации. 1960. Вып. 7), которая получила мировую известность и была издана в 1964 г. в США. В ней были получены формулы, определяющие количество информации и скорость создания информации гауссовских случайных величин и процессов, а также определены критерии информационной устойчивости.

Ряд работ М.С. Пинскера (выполненных в середине 60-х гг. в соавторстве с И.А. Овсеви-чем) посвящен исследованию методов передачи сигналов по каналам со случайно изменяющимися параметрами. В этих работах были определены пропускная способность таких каналов, скорость передачи информации и т.д.

Совместно с Р.Л. Добрушиным им был получен важный результат — наличие у канала памяти увеличивает его пропускную способность. Цикл работ М.С. Пинскера (выполненных в 70—90-х гг. совместно с А.К. Горбуновым и Л.Б. Софманом) был посвящен различным обобщениям классического определения ε -энтропии и изучению их свойств. В этих работах рассматривались, в частности, общие свойства ε -энтропии сообщений и скоростей создания сообщений источником без предвосхищения, с прогнозом и с задержкой. Был исследован случай гауссовских и марковских источников сообщений.

Начиная с конца 70-х гг. М.С. Пинскер занимался проблемами кодирования и передачи информации в многокомпонентных системах связи. К ним относятся ширококвещательные системы связи и системы с многостанционным доступом, которые будут рассмотрены далее. Им было получено точное выражение для области пропускной способности ширококвещательного канала. Он определил также пропускную способность стационарных гауссовских ширококвещательных каналов, установил границы пропускной способности для дискретных каналов с многостанционным доступом при асимметричной связи.

В начале 80-х гг. М.С. Пинскер (совместно с С.Ю. Ефроймовичем) начал рассмотрение проблем определения асимптотически достаточной статистики для оценки параметров сигналов. Определение этой статистики основывалось на использовании шенноновской информации об оцениваемом параметре, содержащейся в принятом сигнале. Он получил важные

результаты, связанные с непараметрическим оцениванием параметров сигналов, а в начале 80-х гг. предложил непараметрический алгоритм оценки параметров сигнала, принимаемого на фоне шума, который быстро сводился к оптимальному с увеличением размерности выборки отсчетов принимаемого сигнала. Эти результаты М.С. Пинскера сыграли значительную роль в развитии непараметрических методов оценки параметров сигнала, принимаемого на фоне шума, инициировав многочисленные работы адаптивных методов оценки параметров сигналов.

М.С. Пинскер исследовал (совместно с В.В. Преловым и С. Верду) влияние слабого дополнительного негауссовского шума на скорость создания сообщений стационарным гауссовским процессом и на пропускную способность гауссовского канала.

Значительны результаты, полученные М.С. Пинскером в области теории кодирования. Он был одним из первых, кто дал точную формулировку проблемы сложности в теории кодирования и получил ряд выдающихся асимптотических результатов. Исследуя каскадные коды, в которых в качестве внутреннего и внешнего используются сверточные коды, он доказал, что для любых таких кодов сложность их декодирования растет линейно с ростом длины, если кодовая скорость меньше пропускной способности канала связи. К важным результатам, полученным М.С. Пинскером в области теории кодирования, относится доказательство существования кодов, у которых кодовое расстояние и сложность кодирования растут линейно с увеличением их длины, а также существование кодов, для которых с увеличением их длины линейно растут кодовое расстояние, сложность декодирования и количество исправляемых ошибок. М.С. Пинскер построил последовательность кодов, для которых кодовое расстояние удовлетворяет границе Варшавова–Гильберта, а сложность декодирования не растет экспоненциально. М.С. Пинскер предложил и исследовал методы кодирования для обобщенных моделей каналов со случайными ошибками. Совместно с Л.А. Бассалыго, С.И. Гельфандом и Р. Алсведе М.С. Пинскером были исследованы методы кодирования сообщений, когда при кодировании имеется определенная информация о возникающих в каналах ошибках. Им были проанализированы коды, корректирующие не только ошибки, но и дефекты (выпадения и вставки символов), определены длины кодов, корректирующих ошибки на локализованных позициях.

Важные результаты М.С. Пинскер получил в области теории коммутации каналов связи, предложив новый метод оценки сложности оптимального концентратора и неблокирующих схем коммутации. Он указал на принципиально новые способы построения коммутационных схем и разработал способ построения оптимальной неблокирующей схемы коммутации, имеющей наименьшую сложность.

М.С. Пинскер был всемирно признанным ученым. За научные заслуги в 1978 г. он стал лауреатом премии имени К. Шеннона, присужденной ему Институтом инженеров по электротехнике и электронике (IEEE), а в 1996 г. был награжден IEEE только что учрежденной медалью им. Р. Хемминга.

Марк Семенович Пинскер скончался 28 декабря 2003 г. в Москве.

Вычисления пропускной способности каналов связи. Отечественные и зарубежные ученые вели теоретические исследования, в которых развивались строгие методы вычисления пропускной способности каналов связи. В результате были получены приближенные, а в ряде случаев и точные формулы пропускной способ-

ности векторных гауссовских каналов, каналов связи с замираниями уровня принимаемого сигнала, асинхронного канала связи с синхросимволом, безошибочно воспроизводимым на выходе канала. Развивались асимптотические методы вычисления пропускной способности для разных моделей каналов связи, рассматривались модели каналов связи с памятью, с негауссовским шумом, каналы с выпадением символов и т.п. Такие исследования в нашей стране были выполнены учеными Института проблем передачи информации Б.С. Цыбаковым [43], Л.П. Цареградским [44], И.А. Овсевиным, **Р.Л. Добрушиным**, **М.С. Пинскером**, В.В. Преловым [45]. Исследования в данном направлении выполнялись и американскими учеными [46].

Вычисления надежности передачи сообщений по каналам связи. Значительное число исследований было посвящено определению асимптотических формул для показателя надежности связи $E(R)$ для различных моделей каналов связи:

$$E(R) = -\lim_{n \rightarrow \infty} \left[\log P_e \left[(2^{nR}, n) \right] \right] / n,$$

где $P_e(2^{nR}, n)$ — вероятность ошибочного приема кодовой комбинации оптимального кода длины n (оптимальный код обеспечивает передачу информации со скоростью R по каналу связи).

Эти исследования важны тем, что они перекинули мост между двумя фундаментальными направлениями теории связи — теорией потенциальной помехоустойчивости и теорией информации. Это позволило получить доказательства теорем кодирования канала связи конструктивным путем, рассматривая задачу оптимального приема при наличии шума многопозиционных (2^{nR} -позиционных) сигналов. Кроме того, что важно с практической точки зрения, они давали возможность, сравнивая показатели надежности конкретного кода, выбранного при проектировании системы связи, и оптимального кода, определить целесообразность применения выбранного кода.

Первым для непрерывного гауссовского канала подобное исследование выполнил в 1950 г. знаменитый американский ученый **С.О. Райс** [47]. Он ввел метод случайного кодирования и определил среднее значение функции $E(R)$ для случайно выбранного кода, что давало оценку сверху функции $E(R)$ для оптимального кода. В данном направлении работали многие крупные ученые: А. Файнштейн, рассмотревший [48] в 1955 г. подобную задачу как для непрерывного, так и для дискретного канала связи, и **К. Шеннон**, существенно уточнивший в 1959 г. результаты С.О. Райса и предложивший метод оценки снизу значения функции $E(R)$.

Важные результаты были получены Р.Л. Добрушиным [49], рассмотревшим, в частности, каналы связи, в которых происходит стирание передаваемых символов, и видными американскими учеными **П. Элайсом** и **Р. Фано**. Эффективные методы получения нижней границы для $E(R)$ были разработаны в 1967 г. выдающимися американскими учеными в области теории информации К. Шенноном, **Р. Галлагером** и Э. Берлекампом [50].

Роберт ГАЛЛАГЕР

Роберт Галлагер родился 29 мая 1931 г. в Филадельфии, штат Пенсильвания (США). В 1953 г. он закончил Пенсильванский университет и получил степень бакалавра. Дальнейшее образование продолжил в Массачусетском технологическом институте (МТИ), где в 1957 г. получил степень магистра, в 1960 г. — докторскую степень. Р. Галлагер — выдающийся американский ученый в области теории связи и ее применений, профессор электросвязи МТИ, член совета директоров Лаборатории информационных систем, а также систем, предназначенных для принятия решений, почетный член Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE). Он провел фундаментальные исследования в области беспроводных сетей, высокоскоростных сетей передачи данных, теории информации и теории сетей передачи данных. В центре его научных интересов проблемы передачи информации в системах с множественным доступом, теории информации, проблемы передачи информации по оптическим каналам связи, построения эффективных сетей передачи данных, стохастические процессы.

После завершения образования он в течение двух лет работал в знаменитой Белл-лаборатории, а позже в течение двух лет проходил военную службу в одной из корпораций. Работа, представленная им на соискание докторской степени, называлась «Коды с малой плотностью проверок на четность» и была опубликована в 1963 г. [51]. В следующем году она была переведена на русский язык, а в 1974 г. — перепечатана в Сборнике фундаментальных работ в области теории информации, изданном Институтом инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) под редакцией Э. Берлекампа. Эта работа не утратила своей актуальности и сегодня. В 1998 г. она была отмечена юбилейной золотой наградой Общества теории информации IEEE.

Ряд научных работ Р. Галлагера связан с теоремой кодирования каналов связи. Его статья «Простой вывод теоремы кодирования и ее применение», опубликованная в 1965 г., была отмечена в 1966 г. премией IEEE им. Бакера и в 1998 г. еще одной юбилейной золотой наградой Секции теории информации IEEE. Совместно с К. Шенноном и Э. Берлекампом в 1968 г. была опубликована фундаментальная статья, в которой предложен метод определения нижней границы вероятности ошибки кодирования в дискретном канале без памяти. В этом же году Р. Галлагером была написана и издана фундаментальная работа «Теория информации и надежная связь», которая является одной из лучших в мировой литературе монографий в данной области [52]. В 1974 г. под редакцией видных отечественных ученых М.С. Пинскера и Б.С. Цыбакова она была переведена на русский язык. Уже в течение многих лет эта книга остается одним из лучших учебников по теории информации и ее применениям.



С середины 70-х гг. научные интересы Р. Галлагера перемещаются в область цифровых сетей передачи данных. В 1987 г. (в соавторстве с Д. Бертсекасом) в издательстве Prentice-Hall выходит книга «Сети передачи данных» [53], которая в 1989 г. под редакцией Б.С. Цыбакова издается на русском языке. В этой книге развивается теория массового обслуживания, используемая для проектирования систем множественного доступа и алгоритмов маршрутизации в сетях передачи данных. Рассматриваются вопросы организации связи в сетях с множественным доступом, таких как локальные сети, спутниковые сети и радиосети, а также вопросы маршрутизации и управления в сетях связи потоками данных. Второе издание этой книги вышло в 1992 г.

В 90-х годах в центре научных интересов Р. Галлагера вновь оказываются проблемы теории информации и случайных процессов. В 1996 г. в издательстве Kluwer выходит его учебник «Дискретные стохастические процессы» [54].

Профессор Р. Галлагер с 1979 г. — член Национальной инженерной академии, с 1992 г. — Национальной академии наук США, с 1999 г. — почетный член Американской академии искусств и наук. В течение многих лет он входит в совет управляющих Секции теории информации IEEE, в 1971 г. — ее президент, а с 1989 по 1992 г. — председатель Консультативного комитета по сетевым вопросам и инфраструктуре сетей связи. Галлагер активно участвовал в работе ряда других комитетов.

За фундаментальные научные исследования в области теории информации и теории кодирования он награжден многими престижными наградами IEEE. В 1993 г. ему была вручена награда МТИ как выдающемуся педагогу.

В 1962 г. Р. Галлагер участвовал в основании компании «Codex Corporation», вошедшей позже в состав одной из крупнейших в мире компаний в области связи «Motorola». В течение многих лет он научный консультант этой компании. Его фундаментальные исследования квадратурной амплитудной модуляции и детектирования легли в основу разработки модемов на скорость 9600 бит/с, выпуск которых обеспечил коммерческий успех этой компании. Он же научный консультант ряда других компаний и автор пяти патентов на изобретения.

Вычисления энтальпии источников сообщений. Большинство видов информационных сообщений являются аналоговыми (например, источники аудио- и видеосигналов и др.). Для передачи таких сообщений в современных системах связи необходимо их преобразование в цифровой вид. Основу преобразования дает теорема **В.А. Котельникова** и ряд изобретений, сделанных в конце 30-х — середине 40-х гг. XX в., — изобретение импульсно-кодовой (ИКМ) и дельта-модуляции. Скорость цифрового потока, формируемого при таком преобразовании, тем выше, чем выше точность, с которой требуется передать информационное сообщение по каналу связи.

Современная теория информации позволяет определить один из важнейших для оптимального проектирования любой системы связи параметров — скорость создания информации $R(\epsilon)$ источником сообщения или, как ее назвал в одной из своих работ академик **А.Н. Колмогоров** в 1956 г., ϵ -энтропию источника. В задачах теории связи на вход такого источника поступает аналоговый сигнал $\alpha(t)$ с определенными статистическими характеристиками, а на его выходе заданной точностью ϵ формируется сигнал $\alpha^*(t)$, который и передается по каналу связи. Впервые задача определения функции $R(\epsilon)$ была решена **К. Шенноном** в 1948 г. В 1959 г. он вернулся к этой проблеме.

Знание $R(\epsilon)$ позволяет при анализе конкретных алгоритмов преобразования аналоговых сигналов в цифровую форму выбрать те из них, которые близки к оптимальным и могут при заданной точности воспроизведения этих сигналов передавать их по каналам связи со скоростью, близкой к $R(\epsilon)$.

В течение второй половины XX в. над созданием методов определения $R(\epsilon)$ для источников информации с разными статистическими характеристиками работали многие ученые. В работах отечественных ученых **М.С. Пинскера**, Б.С. Цыбакова, Л.А. Бас-салыго, **Р.Л. Добрушина**, В.В. Прелова и др. [40, 55–57] была определена ϵ -энтропия для стационарных и нестационарных источников. Этой же теме посвящен ряд работ американских ученых Т. Дж. Гоблика, Т. Бергера, Дж. Зива, С. Верду и др. [58–62], которые рассмотрели важные задачи передачи по гауссовским каналам связи сигналов от гауссовских источников сообщений.

§ 4. Разработка методов кодирования источников

Основополагающая статья **К. Шеннона** инициировала огромное число работ, в которых предлагались и исследовались различные алгоритмы кодирования источников как аналоговых, так и дискретных сообщений. Эти алгоритмы представляют самостоятельный интерес. Они ценны также тем, что заложенные в них идеи могут составлять комбинации, давая эффективные инженерные решения конкретных задач, встречающихся на практике. Алгоритмы кодирования источников (или, что то же самое, алгоритмы устранения избыточности или сжатия данных) направлены на то, чтобы в наибольшей степени сократить количество бинарных знаков, приходящихся в среднем на один символ, поступающий от источника сообщений на вход кодера.

Алгоритмы кодирования могут быть классифицированы по двум критериям. Следует различать алгоритмы кодирования во-первых, без потерь и, во-вторых, с потерями информации, поступающей от источника сообщений. Первый тип алгоритмов применим только к дискретным сигналам и позволяет на выходе декодера всегда однозначно определить символ, поступивший от источника, а второй — определить этот символ с определенной ошибкой. В последнем случае должна быть задана мера искажений или критерий верности воспроизведения сигнала. Ко второму типу алгоритмов относятся все алгоритмы кодирования источников аналоговых сообщений. Алгоритмы кодирования дискретных источников могут быть как первого, так и второго типа. К первому типу относятся, например, алгоритмы кодирования Шеннона—Фано, Хаффмена, кодирования длин серий и др. Ко второму — импульсно-кодовая (ИКМ) и дельта-модуляция.

Согласно другому критерию классификации имеется четыре типа алгоритмов, каждый из которых характеризуется тем, что кодируется одновременно в последовательности либо одинаковой, либо разной длины символов, поступающих от источника, и эти последовательности преобразуются в коды, имеющие либо фиксированную, либо переменную длину. Например, алгоритм кодирования Хаффмена преобразует последовательность символов одной длины в коды, длина которых пропорциональна $\log(1/p_i)$, где p_i — вероятность появления i -й последовательности символов на входе кодера.

4.1. Кодирование дискретных источников

К. Шенноном был предложен субоптимальный алгоритм кодирования (алгоритм Шеннона—Фано) дискретных источников, позволяющий сократить избыточность передаваемых по каналу связи сообщений за счет того, что символам, появляющимся в передаваемой последовательности с большей частотой, присваивались более короткие кодовые комбинации. Предложенный алгоритм обладал свойством префиксности, т.е. ни одна из кодовых комбинаций, соответствующая определенному символу, не являлась началом любой другой кодовой комбинации. Префиксный код позволял однозначно восстановить переданную последовательность символов по принятой кодовой последовательности. Данное направление теории информации в последующие годы получило значительное развитие в работах многих отечественных и зарубежных ученых.

В 1952 г. в США **Д. Хаффмен** — ученик профессора Р. Фано создал алгоритм построения оптимального неравномерного кода [1], в котором длина i -кодовой комбинации пропорциональна $\log(1/p_i)$, где p_i — вероятность ее появления. До Д. Хаффмена такой код пытался построить Л. Крафт — другой ученик Р. Фано. Он не достиг в этом успеха, однако в 1949 г. им была доказана весьма важная теорема [2], известная в теории информации как неравенство Крафта. Эта теорема определяла условия, которым должны удовлетворять длины кодовых комбинаций неравномерного префиксного (однозначно декодируемого) кода. Б. МакМилан в 1956 г. доказал, что это условие гарантирует однозначное разделение и декодирование неравномерного кода. Позже Дж. Л. Дубом и **А.И. Хинчиным** было доказано, что средняя длина кодовой комбинации любого кода, удовлетворяющего условиям теоремы Крафта, не может быть меньше энтропии источника сообщений.

Метод кодирования источника, предложенный Д. Хаффменом, получил широкое применение для решения различных технических задач. Одно из них связано с сокращением избыточности компьютерных файлов, содержащих символы, закодированные восьмизначным *ASCII*-кодом. Согласно стандарту, обычно используются только 128 комбинаций этого кода, отображающих символы алфавита, цифры, знаки препинания, ряд служебных символов и т.п. Статистика содержания компьютерных файлов показывает, что в них 96% текста составляет 31 наиболее часто используемый символ, как, например, буквы *a*, *b*, *v* и т.д. Применяя подход Хаффмена, можно сократить избыточность файлов, используя для кодирования наиболее часто встречающихся символов пятизначные кодовые комбинации 00000, 00001, ..., 11110. Для кодирования остальных символов следует использовать 13-значные кодовые комбинации, первыми пятью знаками которых является комбинация 11111. Такое построение кода позволяет добиться однозначного декодирования символов, закодированных короткими и длинными кодовыми комбинациями. Среднее число бит, приходящихся на один символ, при этом составляет $0,96 \times 5 + 0,04 \times 13 = 5,32$. Таким образом, сокращение избыточности при таком простом методе кодирования составляет $8/5,32 = 1,5$ раза.

Другой распространенный метод кодирования источника — это кодирование длин серий одинаковых символов. Впервые такой метод был предложен [3] американским ученым А.Е. Лаймелом в 1951 г. В нашей стране этот метод предлагали и исследовали профессора И.И. Цуккерман [4] (1958 г.) и Э.Л. Блох [5] (1959 г.).

Суть метода кодирования длин серий можно пояснить следующим примером. Пусть кодируется следующая последовательность, состоящая из 45 символов, 000000010011000001100000011000110000000100001. Как видно, вероятность появления символа 0 в данной последовательности велика, и поэтому в ней часто встречаются длинные серии 0. Выберем в данном случае максимальную длину серии 0, равную семи (в данном случае для кодирования длины серии достаточно трехзначного кода). В приведенной последовательности подчеркнуты серии из семи или меньшего числа 0, заканчивающиеся 1. Этим последовательностям присваивается трехзначный двоичный код, определяющий число содержащихся в них нулей. Код 000 присвоен символу 1, если перед ним нули отсутствуют. В результате такого кодирования эта последовательность будет представлена с помощью всего 33 символов следующим образом 111 000 010 000 101 000 110 000 111 000 100. Сокращение избыточности в данном случае составит $45/33 = 1,36$ раза. Следует отметить, что с уменьшением вероятности появления символа 1 на выходе источника сообщения увеличивается максимальная длина серии 0, для которой выбирается код. При этом сокращение избыточности становится более существенным.

Новое направление теории кодирования дискретных источников дал в 1965 г. академик **А. Н. Колмогоров**. Он ввел термин «универсальное» кодирование [6], обозначающее кодирование источников сообщений, статистические характеристики которых (как это обычно бывает на практике) априорно неизвестны. Создатель универсальных кодов, избыточность которых минимальна для целого класса источников сообщений, — отечественный ученый Б.М. Фитингоф [7]. Развитие данного направления (начало 60-х — конец 80-х гг.) связано с работами отечественных ученых Б.Я. Рябко, Р.Е. Кричевского, В.К. Трофимова, Ю.М. Штарькова, В.Ф. Бабкина и др. За рубежом важные исследования были выполнены **Р. Галлагером**, **П. Элайсом**, **Л. Дэвисоном**, **Я. Зивом** и др.

Были разработаны «адаптивные» коды, занимающие промежуточное положение между универсальными и специально подобранными для определенного источника кодами. Адаптивные алгоритмы кодирования основаны на предварительном измерении параметров статистических моделей, описывающих поведение источников сообщений, и на дальнейшем кодировании сообщений с учетом этих параметров. Для этого в последовательности определенной длины, поступающей от источника сообщений, определяется частота появления в ней отдельных информационных символов. Эта информация, во-первых, используется для кодирования данных символов, например методом Хаффмена, и, во-вторых, сообщается об измеренных параметрах моделей на приемный конец линии связи, где их используют для декодирования принимаемых сообщений. Впервые задача адаптивного кодирования источника была рассмотрена в 1968 г. отечественным ученым Р.Е. Кричевским [8]. В США исследования в данном направлении в 1973 г. провел Т.М. Ковер [9]. В середине 80-х гг. эта проблема для источников с пуассоновской статистикой передаваемых символов изучались В.К. Трофимовым и Ю.М. Штарьковым.

Важные для построения универсальных кодов результаты были получены В.И. Левенштейном [10] и Б.Я. Рябко [11]. Левенштейн предложил (1968 г.) метод построения монотонного префиксного кода для записи натуральных чисел, а Б.Я. Рябко исследовал (1979 г.) метод кодирования так называемых монотонных источников, относительно ко-

торых известно лишь то, что вероятности появления $p(A_i)$ отдельных символов A_i на выходе источника связаны соотношением $p(A_i) \geq p(A_j)$, если $i < j$. Эти результаты были им применены [12] при разработке метода кодирования источника, названного «сжатием с помощью стопки книг» (1980 г.). Несколько позднее этот же метод независимо открыл известный американский ученый **П. Элайс**, назвавший его «кодированием по степени новизны» [13]. Суть данного метода в следующем. По линии связи должно быть передано слово X из алфавита A , буквы которого A_1, A_2, \dots, A_N отождествлены с числами $1, 2, \dots, N$. На приемном и передающем концах имеются идентичные списки, которые в начальный момент содержат все указанные выше числа в порядке возрастания. При появлении в слове очередной буквы A_i по линии связи передается монотонный код номера позиции, занимаемой в списке данной буквой. Это позволяет однозначно декодировать переданную букву. Вслед за этим на передающем и на приемном концах ставят букву A_i на первую позицию и увеличивают на единицу номера букв, стоящих на позициях от 1 до i . Номера букв, стоящих на позициях от $i + 1$ до N остаются неизменными. Монотонный префиксный код устроен так, что более близкие к началу списка буквы получают более короткие коды. В результате часто повторяющиеся буквы, оказываются в процессе передачи в начале списка и имеют более короткие кодовые комбинации. Доказано [13], что данный метод кодирования по своей эффективности близок к методу кодирования Хаффмена. Этот метод легко приспосабливается к возможным изменениям статистических характеристик источника сообщений и поэтому назван локально адаптивным [14].

Превосходный алгоритм универсального кодирования источника был предложен в 1976—1978 гг. израильскими учеными **Я. Зивом** и А. Лемпелем [15]. Этот алгоритм (алгоритм LZ) нашел широкое применение для сжатия текстовых файлов и файлов изображений в компьютерной технике, позволяя достичь весьма высокой степени сжатия файлов (до пяти раз). Информационным элементом в файлах является байт-блок из восьми бинарных знаков. Число блоков равно $2^8 = 256$. Для кодирования файлов выбирают K -блоки из 12 бинарных знаков. Общее число различных K -блоков составляет $2^{12} = 4096$. Различным байтам присваивают первые 256 K -блоков. Алгоритм работает следующим образом. При кодировании поступающих с выхода источника байтов используют первые 256 позиций кодовой таблицы и, кроме того, в процессе кодирования анализируются сначала пары символов, состоящие из символа, кодируемого в данный момент, и ему предшествующего. Этим парам присваиваются K -блоки, в которых записаны их номера. Они последовательно дополняют кодовую таблицу, и если в ходе передачи вновь появляется такая пара символов, то ей с помощью кодовой таблицы присваивают 12-разрядный блок K . При кодировании соответствующие этой паре два байта (16 бит) заменяются одним K -блоком (12 бит), и в данном случае коэффициент сжатия составляет $16/12 = 1,33$. В процессе кодирования и анализа в кодовую таблицу заносятся под определенными номерами появляющиеся вновь комбинации из трех, четырех и т.д. последовательно поступающих с выхода источника байтов. При повторном появлении таких комбинаций из трех, четырех и т.д. байтов (24, 32 и т.д. бита) они кодируются также одним K -блоком (12 бит). При этом коэффициент сжатия увеличивается и составляет $24/12 = 2$, $32/12 = 2,66$ и т.д.

После заполнения всей кодовой таблицы, имеющей 4096 позиций, процесс кодирования начинается заново. Это позволяет при кодировании источника адаптироваться к изменению статистических характеристик появления отдельных байтов в кодируемых файлах.

Давид ХАФФМЕН

Давид Хаффмен родился в г. Алиенс штата Огайо 9 апреля 1925 г. В раннем детстве он не проявлял особых способностей. Мать очень любила своего сына и старалась делать все возможное, чтобы он получил хорошее образование. В 16 лет он окончил школу и сразу же поступил в университет штата Огайо. Через два года (в 1944 г.) он получил степень бакалавра в области электротехники и был призван в военно-морской флот США, где служил офицером в радиолокационной команде на эсминце, участвуя в операциях по очистке Японского и Китайского морей от мин, установленных во время Второй мировой войны.

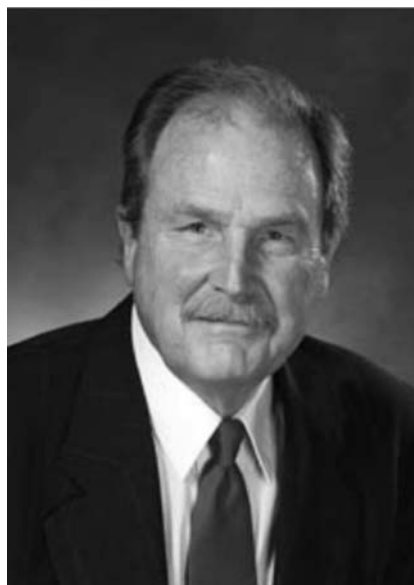
После окончания войны Д. Хаффмен демобилизовался и снова приступил к учебе в университете штата Огайо. В 1949 г. он защитил магистерскую диссертацию. Степень доктора наук Д. Хаффмен получил в 1953 г. в Массачусетском технологическом институте (МТИ). В 1962 г. ему было присвоено звание профессора МТИ, где он проработал до 1967 г.

В 1967 г. Д. Хаффмен оставляет МТИ, переезжает в Калифорнию и работает в Калифорнийском университете в Санта-Круссе. Предложение перейти в этот университет привлекло его тем, что он был приглашен руководить вновь созданным научным отделом компьютерной техники, а также тем, что он был заядлым туристом и спортсменом, а университет располагался вблизи западных гор и океана. Даже в возрасте 65 лет он продолжал активно заниматься подводным плаванием и серфингом.

Д. Хаффмен играл ключевую роль в формировании академической программы обучения студентов и с 1970 по 1973 г. возглавлял в университете одну из кафедр. Он читал курсы по теории информации и цифровой обработке сигналов. После выхода на пенсию в 1994 г. продолжал работать в нем почетным профессором.

Профессор Д. Хаффмен был консультантом по проблемам теории переключающих систем, теории сигналов и методов и систем управления во многих правительственных агентствах и промышленных лабораториях, включая Президентский комитет по развитию науки, Научный совет военно-воздушных сил США, Институт оборонных исследований, Белл-лабораторию и др.

Самым крупным научным достижением профессора Д. Хаффмена, благодаря которому его имя получило широкую известность, стала разработанная им оптимальная процедура кодирования источников сообщений, позволяющая устранять их избыточность. Эта процедура дает возможность построения оптимальных неравномерных кодов, в которых наиболее вероятным сообщениям ставятся в соответствие более короткие кодовые комбинации. Впервые подобный принцип кодирования источников был реализован в коде Морзе. Субоптимальный алгоритм кодирования источников сообщений был предложен в 1948 г. знаменитыми американскими учеными К. Шенноном и Р. Фано.



Во время обучения Д. Хаффмена в аспирантуре МТИ его руководитель профессор Р. Фано в 1951 г. предложил своим студентам вместо сдачи заключительного экзамена по курсу теории информации решить задачу — разработать процедуру оптимального кодирования источников сообщений. Эта проблема показалась Д. Хаффмену очень простой, и он взялся за ее решение. Однако проходили месяцы напряженной работы, а все методы, которые приходили ему в голову, при детальном рассмотрении оказывались неэффективными. Он уже отчаялся найти решение данной проблемы и решил оставить ее, чтобы готовиться к заключительному экзамену. Он собрал стопку листов, на которых записывал свои мысли, и уже поднес их к мусорной корзине, как вдруг к нему пришло озарение. Позднее он вспоминал: *«Это был самый замечательный момент во всей моей жизни. В одно мгновение все стало абсолютно ясным»*. В это время Д. Хаффмену было 25 лет. Позже он говорил: *«Я ни за что не взялся бы за решение данной проблемы, если бы знал заранее, что такие крупные ученые, как основатель теории информации К. Шеннон и мой учитель профессор Р. Фано, безуспешно пытались ее решить»*.

Процедура Хаффмена для кодирования источников сообщений имеет широкую область применений и используется в системах компрессии сигналов и передачи данных. Это и факсимильные аппараты, и модемы, и компьютерные сети, и системы телевидения высокой четкости, и многие другие устройства. Хотя объемы производства устройств для компрессии сигналов, при разработке которых используются идеи Д. Хаффмена, оцениваются в денежном выражении в сотни миллионов долларов, единственным материальным вознаграждением самого Д. Хаффмена за свое открытие стало освобождение его от необходимости сдавать заключительный экзамен по теории информации. Однако внезапное прозрение принесло Д. Хаффмену другую, гораздо более существенную награду — мировую славу. Его имя неразрывно связано с открытой им процедурой кодирования. В любой книге по теории информации, системам цифровой связи и компьютерной технике одна из глав посвящена кодированию источников сообщений по Хаффмену. За это открытие он получил несколько наград от Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE). Известный американский ученый Дональд Кнут — автор широко известной многотомной книги *«Искусство программирования»* писал: *«Коды Хаффмена — одна из фундаментальных идей, которая постоянно применяется инженерами при разработке компьютерной техники и систем связи»*.

Вклад Давида Хаффмена в науку не ограничивается только этими кодами. Его докторская диссертация была посвящена синтезу последовательных переключающихся цепей, которые являются важным элементом кодирующих и декодирующих устройств, широко применяемых во многих системах, связанных с обработкой сигналов. Это исследование (*The Synthesis of Sequential Switching Circuits*) было в 1956 г. опубликовано в сборнике статей *«Information Theory»* (Academic Press, N.Y., pp. 75—99). В этом же году Д. Хаффмен опубликовал еще одну знаковую работу (*A linear circuit viewpoint on error-correcting codes*, IRE Trans. on Information Theory, vol. IT-2, Sept., pp. 20—28, 1956), которая оказала существенное влияние на развитие теории кодов, исправляющих ошибки. Ее результаты вошли в книги по теории кодирования. В начале 80-х гг. Д. Хаффмен получил важные результаты в теории конечных автоматов, доказав, что в гипотетическом цифровом автомате можно использовать не все операции булевой алгебры, а только операцию «НЕТ».

В начале 60-х гг. вице-президент исследовательской Белл-лаборатории Вильям О. Баркер привлек Д. Хаффмена к работе в Национальном агентстве над проблемами засекречивания сообщений. В этот период Д. Хаффмен разработал метод преобразования последова-

тельности бинарных чисел в другую бинарную последовательность без потери информации. Эта работа нашла применение в криптографии.

В 1962 г. он опубликовал еще одну важную работу (*The Generation of Impulse-Equivalent Pulse Trains*, IRE Trans. on Information Theory, vol. IT-8, September), посвященную синтезу широкополосных сигналов с низким уровнем боковых лепестков корреляционной функции. Такие сигналы Д. Хаффмен назвал «импульсно-эквивалентными». Результаты этой работы были отмечены премией, которую Общество теории информации IEEE присудило за существенный вклад в решение сложной проблемы синтеза оптимальных сигналов, над которой долгое время работали многие ученые.

В последние годы жизни он увлеченно работал над изучением математических и физических свойств поверхностей с нулевой кривизной. Результатом явилось открытие возможности преобразования простых плоских поверхностей в необычные скульптурные трехмерные формы, которые выставлялись на художественных выставках.

Научная деятельность Давида Хаффмена получила широкое признание. Он являлся почетным членом IEEE. В 1955 г. его исследования по синтезу последовательных переключающих цепей были отмечены почетной медалью Луиса Е. Леви Франклинского института. В 1974 г. от Секции компьютерной техники IEEE он получил награду В.В. МакДоувелла за «вклад в создание теории последовательных переключающих цепей и теории кодирования, а также за его вклад в преподавание этих дисциплин». Его работы по последовательным переключающим цепям были отмечены медалью IEEE в 1982 г. В 1998 г. IEEE наградил его золотой юбилейной медалью за инновации в области технологии, а в 1999 г. — медалью Р. Хэмминга за особый вклад в науку об информации.

Давид Хаффмен скончался 9 октября 1999 г. в возрасте 74 лет.

Якоб ЗИВ

Якоб Зив родился в г. Теберия (Израиль) 27 ноября 1931 г. Высшее образование получил в имеющем мировую известность Израильском технологическом институте (Технионе), находящемся в Хайфе. Окончив институт в 1954 г. бакалавром, он в 1957 г. защитил магистерскую диссертацию. С 1955 по 1959 г. Я. Зив работал ведущим инженером-исследователем в группе телекоммуникаций Департамента науки Министерства обороны Израиля, участвуя в разработке телеметрической системы, создаваемой на новых для того времени элементах — транзисторах. В это же время он заинтересовался проблемами выделения сигналов из шума. Его знакомство с теорией информации состоялось после прочтения одного из первых учебников по этому предмету, написанного С. Голдманом.

В 1961 г. Якоб Зив поступил в знаменитый Массачусетский технологический институт (МТИ), в котором в 1962 г. защитил докторскую диссертацию. В группу аспирантов — его коллег, которые в этот период, как и Я. Зив, готовили докторские диссертации, входили



ставшие впоследствии крупными учеными: Г. Ван Трис, Д. Сакриксон, А. Джалинек, Т. Кэйлас, Т. Гоблик и др. В эти годы там преподавали выдающиеся ученые в области теории информации: Р. Фано, П. Элайс, Дж. Возенкрафт и только что защитивший докторскую диссертацию Р. Галлагер.

Выдающийся израильский ученый Якоб Зив — известный специалист в области теории информации. Круг его научных интересов очень широк — это вопросы статистической теории связи: кодирование источников информации, теория информации и теория оптимального приема сигналов.

Темой докторской диссертации Я. Зива было исследование влияния эффектов квантования при передаче и приеме сигналов на вероятность ошибочного приема кодированного сигнала. Исследовательскую работу над докторской диссертацией он совмещал с работой ведущего инженера-исследователя в области теории связи в научном отделе фирмы Melpar, Inc. (Watertown, MA).

В МТИ он познакомился с только что появившимися идеями последовательного декодирования, выдвинутыми Дж. Возенкрафтом, и предложил свой вариант алгоритма последовательного декодирования. В период обучения Я. Зива в МТИ актуальной являлась проблема определения вычислительной сложности алгоритмов, в частности алгоритмов декодирования. Его заинтересовала эта проблема, и после защиты докторской диссертации Я. Зив провел исследование сложности декодирования итеративных кодов П. Элайса, доказав существование таких методов кодирования, для которых сложность декодирования растет с ростом длины кода по полиномиальному закону. Данная работа предшествовала классической работе Д. Форни по итерированным кодам.

В 1962 г., вернувшись на родину, Я. Зив возглавил Департамент науки в Министерстве обороны Израиля и одновременно стал преподавать на факультете электросвязи в Технионе. В этот период Я. Зив совместно с другим крупным израильским ученым М. Закаи разработал, используя идеи теории информации, новые методы определения точности оценок параметров сигналов, принимаемых на фоне гауссовских шумов. Разработанные ими методы относятся к числу важных результатов теории оптимального приема сигналов.

В середине 60-х гг. Я. Зив познакомился с идеями универсального кодирования источников информации, предложенными академиком А.Н. Колмогоровым. В 1968 г. он вновь выехал в США и в течение полутора лет работал в Белл-лаборатории. В тот период он тесно сотрудничал с крупным американским ученым Ароном Вайнером в решении широкого круга проблем теории информации, включая вопросы кодирования источников сообщений и канала связи, эффективности информационных систем с обратной связью и др. К этому времени относится и начало исследований Я. Зива по универсальному кодированию источников сообщений.

В 1970 г. Я. Зив вернулся к преподавательской работе в качестве доцента в Технионе. С 1974 по 1976 г. он был деканом факультета электросвязи Техниона. Его научные интересы в этот период сосредоточились на проблемах оценки сложности источников сообщений и на связанных с ними проблемах универсального кодирования источников информации. Эти проблемы он разрабатывал совместно с другим израильским ученым Абрахамом Лемпелем. Данные исследования привели к одному из важнейших результатов теории информации — универсальному алгоритму кодирования источников сообщений Лемпеля—Зива (алгоритм LZ). В 1977 и 1978 гг. ими были опубликованы две получившие широкую известность

статьи в журнале IEEE Transaction on Information Theory, в которых был представлен алгоритм LZ и приведено доказательство его оптимальности. Этот алгоритм получил широкое практическое применение. Якоб Зив — автор более 70 научных статей, посвященных различным проблемам теории связи, которые получили широкую известность.

С 1985 по 1991 г. Я. Зив был председателем Израильского комитета, планирующего деятельность университетов страны и предоставляющего гранты на проведение научных исследований. В 1982 г. он был избран членом Академии наук Израиля и стал профессором Техниона. В настоящее время он президент Национальной академии наук и искусств Израиля.

Якоб Зив — почетный член Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE). В 1988 г. он избирается иностранным членом Национальной инженерной академии, а в 1998 г. — Национальной академии наук и искусств США.

Научные достижения Зива отмечены многими национальными и международными премиями. В 1993 г. он получил почетный приз Израиля, присуждаемый за работы в области точных наук (электросвязи и технологии). В 1977 и 1979 гг. он дважды награждался IEEE как автор лучших статей, опубликованных в журнале «Transaction on Information Theory». В 1995 г. Якоб Зив — лауреат международной премии Г. Маркони и награжден почетной медалью Ричарда Хэмминга, учрежденной IEEE. В 1997 г. он стал лауреатом премии Шеннона, присуждаемой Секцией теории информации IEEE, а в 1998 г. ему была присуждена международная премия Эдуарда Рейна.

4.2. Кодирование источников аналоговых сигналов

Задача кодирования источников аналоговых сигналов заключается в нахождении такого метода их преобразования в цифровую форму, при котором бы сформированный цифровой поток имел минимальную скорость и на приеме эти сигналы могли быть восстановлены с наименьшей погрешностью.

Два весьма важных метода преобразования аналоговых сигналов в цифровую форму — импульсно-кодовая модуляция (ИКМ) и дельта-модуляция (ДМ) были изобретены инженерами в 40-х гг. XX в., еще до создания теории информации. На протяжении второй половины XX в. эти методы развивались многими учеными. Сегодня они широко применяются как в современных системах связи, так и в устройствах памяти, предназначенных для хранения больших объемов аналоговой информации на разных носителях (в частности, для записи аудио- и видеосигналов).

Импульсно-кодовая модуляция была изобретена в 1937 г. [1] французским инженером А.Г. Ривсом. При ИКМ преобразование аналогового сигнала в цифровую форму осуществляют в два этапа. На первом — этот сигнал модулирует по амплитуде последовательность импульсов, следующих с частотой, определяемой теоремой Котельникова—Шеннона и равной $2F_{\text{в}}$, где $F_{\text{в}}$ — верхняя частота спектра сигнала. На втором этапе диапазон возможных уровней сигнала A разбивается на $N = 2^n$ интервалов $\Delta = A/N$ и определяется, в каком из интервалов находится уровень каждого из модулированных импульсов. В результате каждый импульс преобразуется в n -значную бинарную кодовую комбинацию, соответствующую данному интервалу. Устройству, осуществляющему преобразование уровня аналогового сигнала в кодовую комби-

нацию, называется квантователем. В 1948 г. американский ученый В. Беннет [2] получил формулу для отношения сигнал/шум на выходе квантователя с равномерной шкалой квантования:

$$\varepsilon^2 = \Delta^2/12.$$

Для гауссовского сообщения мощностью σ^2 , пиковые значения равны 3σ , диапазон $A = 6\sigma$ и, следовательно, $\varepsilon^2 = 3\sigma^2/N^2$. С учетом этого скорость передачи сообщений по каналу связи при ИКМ оказывается равной

$$R = 2 F_{\text{в}} \log_2 N = F_{\text{в}} \log(3\sigma^2/\varepsilon^2) \text{ бит/с},$$

что несколько выше, чем это следует из формулы Шеннона $R = F \log_2(\sigma^2/\varepsilon^2)$ бит/с.

Важные результаты, относящиеся к помехоустойчивости приема сообщений при использовании ИКМ, были получены в конце 40-х годов в США Б. Оливером, Дж. Пирсом, **К. Шенноном** [3] и в нашей стране профессором С.В. Бородичем [4].

Следует отметить, что если не применять специальных способов кодирования источника, то при использовании ИКМ полоса частот, необходимая для передачи сообщений в цифровом виде, значительно расширяется. Например, для передачи с высоким качеством телефонного сообщения, занимающего полосу частот 4 кГц, необходимо выбрать $N = 256$, и скорость сформированного при ИКМ цифрового потока составит 64 кбит/с; сигнал звукового вещания, который имеет полосу частот, равную 15 кГц, и должен быть передан по каналу связи с высоким качеством, преобразуется с помощью ИКМ в цифровой поток со скоростью 320 кбит/с; телевизионный сигнал, полоса частот которого составляет 6 МГц, при цифровом преобразовании образует поток со скоростью порядка 250 Мбит/с.

Поэтому проблема преобразования аналогового сигнала в цифровую форму в последние годы была тесно связана с проблемой сокращения его избыточности, т.е. определения таких алгоритмов, с помощью которых можно было бы существенно сократить скорость формируемого цифрового потока, приблизившись к тому пределу, на который указывает теория информации.

Одним из методов уменьшения N при увеличении динамического диапазона речевых сигналов, преобразуемых с помощью ИКМ в цифровую форму, является применение на передающем конце линии связи устройств с нелинейной амплитудной характеристикой, сжимающих этот диапазон, — компрессоров, а на приемном — устройств, расширяющих его, — экспандеров.

Данный метод уменьшения искажений при квантовании сигналов с распределением уровней, отличающимся от равномерного, исследовался в начале 60-х гг. американским ученым Дж. Максом [5] и отечественным ученым А.И. Величкиным [6].

Во многих случаях спектр аналогового сигнала неравномерен, и его последовательно взятые отсчеты статистически зависимы. В этом случае для устранения избыточности при его преобразовании в цифровую форму широко применяется дельта-модуляция (ДМ). Этот вид модуляции был изобретен независимо несколькими учеными в конце 40-х — начале 50-х гг.: во Франции (Е. Делорейн, С. Ван Миеро и Б. Дерьявич [7] — 1946 г.), СССР (Л.А. Коробков [8] — 1949 г.) и США (К.К. Катлер [9] и Ф. де Яджер [10] — 1952 г.).

При ДМ формируется разность между текущим значением аналогового сигнала и его предсказанным значением на основе предшествующих отсчетов. Эта разность преобразуется в цифровую форму. В первых изобретениях ДМ для квантования разно-

стного сигнала использовали бинарный код, символы которого принимают значения (1,0) или (± 1). На рис. 4.2 а, б показаны схемы кодера и декодера системы ДИКМ. Одно из первых исследований, позволяющих теоретически обосновать возможность применения метода предсказания текущих значений сигнала на основе его предшествующих отсчетов для кодирования источника, провел в 1950 г. известный американский ученый профессор *П. Элайс* [11].



Рис. 4.2а



Рис. 4.2б

Для получения высокой точности преобразования аналогового сигнала в цифровую форму методом ДМ требуется более высокая частота его дискретизации (в 10–15 раз), чем в ИКМ. Применение ДИКМ позволяет при заданной точности преобразования аналогового сигнала в цифровую форму уменьшить общую скорость полученного в результате такого преобразования цифрового потока. В 1952 г. был предложен метод дельта-ИКМ (ДИКМ), в котором указанная выше разность преобразуется в k -значную кодовую комбинацию с помощью ИКМ. В 60-е гг. были предложены многочисленные разновидности ДМ, в том числе ДМ с двойным интегрированием, ДМ с компандированием сигналов (адаптивная ДМ) и др.

Начало исследований искажений, которыми сопровождается преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму с помощью ИКМ и ДМ, было положено американскими учеными В. Беннетом [2] и Ван де Вега [12]. Эти исследования установили зависимость мощности и спектра продукта искажений сигнала от параметров метода преобразования (частоты дискретизации, динамического диапазона аналогового сигнала, числа уровней квантования и т.д.). Эти исследования были продолжены в 60–70-х гг. XX в. многими учеными. Были исследованы точность разных алгоритмов преобразования ИКМ, ДМ и ДИКМ, осуществлен синтез оптимальных

алгоритмов преобразования с учетом статистических свойств аналогового сигнала [13–18]. В статье [19] дан обзор исследований, посвященных методам ИКМ и ДИКМ, выполненных до 1965 г.

До 1957 г. исследовались так называемые скалярные методы кодирования аналоговых сообщений, представляющих одномерную функцию времени. Однако в ряде случаев такие сообщения могут быть представлены суммой определенных функций. Для их кодирования могут быть применены разные методы. Один из них, названный кодированием с преобразованием сигнала, оказался эффективным и нашел широкое применение в системах передачи звуковых и телевизионных сигналов.

Метод кодирования с преобразованием сигнала поясняется рис. 4.3. Сигнал $Y(t)$ в блоке A разлагается на интервале длительностью T в ряд по ортогональным функциям $\Psi_i(t)$, т.е.

$$Y(t) = \sum Y_i \Psi_i(t), \text{ где } Y_i = \int_0^T Y(t) \psi_i(t) dt.$$

Если выбрано разложение функции $Y(t)$ в ряд Карунена–Лозва, то параметры Y_i данного разложения представляют собой независимые случайные величины. Могут быть использованы и другие ортогональные преобразования: по функциям Хаара, ряды Фурье и т.п. На практике чаще применяется дискретное косинус-преобразование (ДКП).

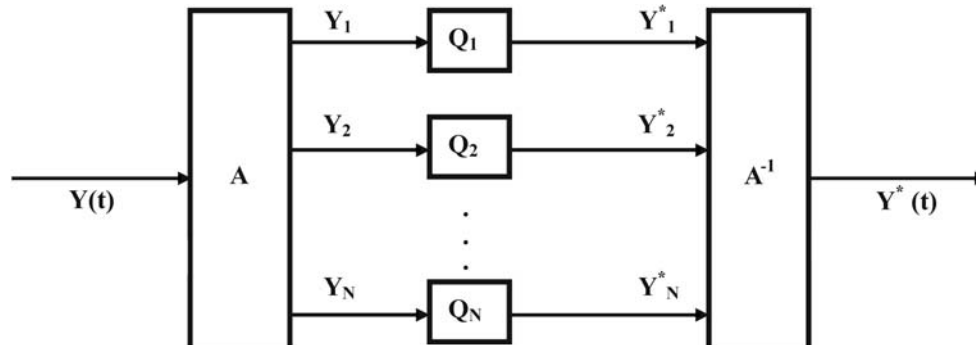


Рис. 4.3

Параметры Y_i , сформированные на выходе данного блока, поступают на квантизаторы Q_i , в которых они с помощью ИКМ преобразуются в цифровые блоки Y_i . Параметры квантизаторов согласуются со статистическими характеристиками величин Y_i . За счет этого скорость единого цифрового потока, в который объединяются блоки Y_i , передаваемые по каналу связи, оказывается при заданной точности преобразования минимальной и близкой к тому пределу, на который указывает теория информации. На приемном конце линии связи из общего потока выделяются цифровые блоки Y_i^* , и с помощью обратного преобразования A^{-1} по формуле $Y(t) = \sum Y_i \Psi_i(t)$ осуществляется восстановление оценки переданного сообщения. Данный метод кодирования источников аналоговых сообщений был впервые предложен в 1956 г. американ-

скими учеными Г. Крамером и М. Месьюз [20]. В 1962–1963 гг. Дж. Хуангом и П.М. Шалсейсом этот метод был детально исследован [21], после чего он стал широко применяться [22, 23] для решения практических задач. Он оказался существенно более эффективным, нежели непосредственное применение для этих целей ИКМ или ДИКМ.

Другим важным конструктивным методом оптимального кодирования источников аналоговых сообщений, основанным на положениях теории информации, является метод векторного квантования. Суть данного метода состоит в следующем. Отрезок аналогового сигнала, занимающего полосу $F_{\text{в}}$ и имеющего длительность T , может быть представлен $N = 2F_{\text{в}}T$ отсчетами, образующими вектор в N -мерном пространстве. На рис. 4.4 изображена схема векторного квантователя.



Рис.4.4

На вход кодера поступают N последовательных отсчетов $Y(t_i)$ кодируемого аналогового сообщения $Y(t)$. Имеется множество кодовых слов длины N , каждый символ которых Y_i^* может принимать одно из M -значений. В кодере осуществляется поиск такого кодового слова, которое воспроизводило бы это сообщение с минимальной погрешностью:

$$D(Y, Y^*) = \min \left\{ \sum_1^N (Y(t_i) - Y_i^*)^2 \right\}.$$

Первая работа, выполненная в 1956 г. французским математиком Г. Штейнхаусом [24], в которой была рассмотрена проблема оптимального векторного (трехмерного) квантования, относилась не к теории связи, а к математической статистике. Одной из первых работ, непосредственно посвященных проблеме векторного квантования источников сообщений, стала работа М. Шуценберга [25], опубликованная в 1958 г. Существенный вклад в разработку проблемы векторного квантования внес отечественный ученый В.Н. Кошелев [26].

Крупными американскими учеными **Э.Д. Витерби** и Дж. К. Омурой было установлено важное положение [27], согласно которому задача оптимального векторного кодирования источника аналогична задаче оптимального декодирования сигнала, принятого на фоне шума. Ими были исследованы возможности использования для кодирования источника сообщения как блочных, так и решетчатых кодов. Обзор многочисленных исследований, связанных с проблемой кодирования источников аналоговых сообщений, приведен в статье [28].

Был разработан еще один класс алгоритмов сжатия данных, содержащихся в непрерывных сообщениях, которые называют апертурными. Они нашли применение в телеметрических системах, установленных на борту космических аппаратов, и впервые были предложены в 1962 г. [29]. Они иллюстрируются рис. 4.5.

Апертура — это полоса допустимого отклонения D шириной 2Δ информационного сообщения $X(t)$ от аппроксимирующей функции. В рассматриваемом на рис. 4.5 примере в пределах интервалов времени $t_i < t < t_{i+1}$, в которых функция содержащегося $X(t)$ не выходит за пределы апертуры, она аппроксимируется прямой линией. Основное достоинство апертурных алгоритмов сжатия сообщений состоит в том, что частота первичной дискретизации сообщения может быть выбрана достаточно высокой, так как избыточные выборки будут устранены в устройстве сжатия данных.

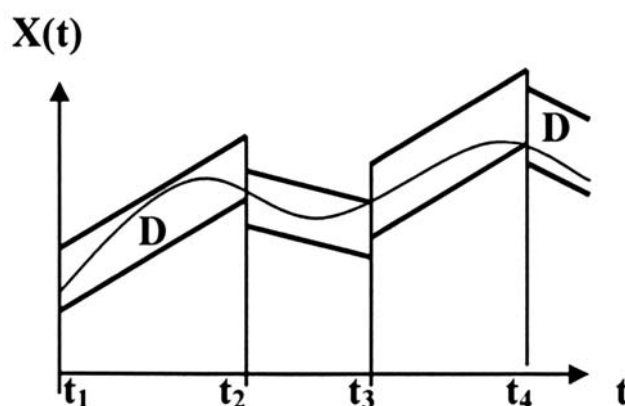


Рис. 4.5

Это представляет интерес особенно в тех случаях, когда энергетический спектр телеметрируемого сигнала заранее неизвестен, или сигнал является нестационарным процессом. Апертурные алгоритмы позволяют определить параметры $X(t_i)$ и t_i . Эти параметры передаются по линии связи и используются на приеме для того, чтобы путем интерполяции полностью восстановить сообщение $X(t)$ с заданной точностью Δ . Поток информационных выборок $X(t_i)$ и t_i на выходе апертурного устройства нерегулярен, так как интервалы $(t_{i+1} - t_i)$ представляют собой случайную величину. Там, где функция $X(t)$ изменяется медленно, ее отсчеты $X(t_i)$ передаются редко. Частота передачи этих отсчетов возрастает, если функция $X(t)$ изменяется быстро. Моделирование [29] и теоретические исследования [22, 30] показали, что алгоритмы апертурного сжатия данных позволяют при передаче сигналов достичь существенного сокращения их избыточности.

4.3. Практические применения методов кодирования источников

Начиная с 1837 г., когда С. Морзе создал свой знаменитый неравномерный код, повышающий эффективность передачи телеграфных сигналов по линиям связи, инженерами предлагались разные методы сокращения избыточности источников сообщений. Еще до появления работ К. Шеннона для аналоговых источников аудио- и видеосообщений также предлагались методы сокращения их избыточности.

Однако установленные **К. Шенноном** фундаментальные законы кодирования источников создали твердую теоретическую основу для разработки эффективных алгоритмов кодирования различных источников. Эти алгоритмы сегодня находят широчайшее применение в цифровых системах связи самого различного назначения.

На основе теории информации были разработаны алгоритмы, позволившие значительно сократить избыточность факсимильных (в том числе газетных полос, графических изображений и технической документации), речевых и телевизионных сообщений, данных телеметрии, компьютерных, текстовых, видеофайлов и т.п. Эти алгоритмы дают существенный экономический эффект, так как позволяют увеличить пропускную способность каналов связи при передаче этих сообщений, а также обеспечить значительную экономию памяти при записи разного рода информации на различные носители. На основании выполненных за полвека прошлого столетия исследований Международным союзом электросвязи (МСЭ) созданы рекомендации по применению методов кодирования источников и помехоустойчивого кодирования в современных системах цифровой связи. Рассмотрим использование изложенных выше методов кодирования источников, таких, например, как ДИКМ, кодирование с преобразованием сигнала, кодирование длин серий, кодов Хаффмена и др., к разнообразным практическим задачам.

4.3.1. Сокращение избыточности факсимильных сообщений

Для сокращения избыточности в системах передачи факсимильных сообщений широчайшее практическое применение нашли коды Хаффмена. Один из используемых на практике методов [1] был основан на том, что изображение разбивалось на прямоугольники размером $m \times n$ элементов, принимающих значение 0 или 1. Наибольшую вероятность имеют прямоугольники, содержащие только символы 0, и им при передаче присваивался символ 0. Если же в прямоугольнике содержались и символы 1, то передавались все символы, перед которыми ставился префикс 1. При выборе размерности прямоугольника 8×1 достигался коэффициент сжатия 2,5–2,7, для прямоугольников размером 4×4 этот коэффициент составил 5–6.

Несколько отличная система для сжатия данных факсимильных изображений, в которой код Хаффмена заменялся простым в реализации субоптимальным кодом, была разработана в Японии [2]. В этой системе кодер обрабатывал сразу две строки, каждая из которых содержала по 128 элементов. Эти строки разбивались на четыре прямоугольника размером 32×2 . Если прямоугольник содержал только 0, то ему присваивался символ 0, если же в нем имелась хотя бы одна единица, то ему присваивался символ 1 и он вновь разбивался на четыре прямоугольника размером 8×2 . Опять символ 0 присваивался тем прямоугольникам, которые состояли из одних нулей, а остальным — присваивался символ 1. Процедура кодирования продолжалась таким же образом до тех пор, пока не приходили к прямоугольникам 2×2 . При этом прямоугольник, состоящий из одних нулей, кодировался символом 0, а содержание любых других передавалось полностью. Этот код оказался близок к оптимальному, а реализовать данный алгоритм кодирования на микропроцессорах было достаточно просто.

Методы кодирования длин серий легли в основу соответствующих стандартов МСЭ для факсимильной передачи документов по телефонной сети [3]. При этом каждая строка рассматривалась как чередующаяся последовательность серий «белых»

и «черных» элементов (символов 0 и 1), причем в ней доминировали серии 0. Коды для серии 0 и 1 близки к кодам Хаффмена.

Использование современных методов кодирования источников позволяет сокращать избыточность факсимильных сообщений в 5–17 раз в зависимости от содержания посылаемого по линии связи документа.

4.3.2. Сокращение избыточности при передаче звуковых сигналов

Сигналы речи. Речевые сигналы занимают полосу частот, равную примерно 4 кГц. Для их передачи с высоким качеством в цифровом виде с помощью ИКМ требуется канал связи со скоростью передачи данных 64 кбит/с. Устранение избыточности речевых сигналов позволяет уменьшить эту скорость. Одним из методов сокращения избыточности сигналов речи является применение адаптивной ДИКМ. В этом методе осуществляется преобразование в цифровую форму разности между передаваемым отсчетом сообщения и его предсказанным значением. Для предсказания используются несколько предыдущих отсчетов. Применение ДИКМ позволяет для речевых сигналов сократить необходимую скорость передачи в 2–4 раза.

Уменьшить избыточность сигналов речи можно и с помощью вокодерной техники. Первый вокодер изобрел в 1939 г. американский инженер Г. Дадли [4]. В течение многих лет инженеры США, России, Франции, Японии и других стран работали над совершенствованием вокодеров.

В вокодерах путем анализа речевого сигнала голосовой тракт моделируется формирующим фильтром, возбуждаемым импульсным и шумовым сигналами. В процессе анализа определяются основные параметры речевого сигнала — параметры формирующего фильтра и частота основного тона речи, определяющая частоту импульсного воздействия. Эти параметры изменяются медленно, и для их передачи требуется скорость 4,8 — 16 кбит/с.

Над проблемами создания вокодерной техники в нашей стране активно работали многие советские ученые: А.П. Петерсон, А.С. Пирогов, М.А. Сапожков, Н.Н. Акинфиев, С.П. Баронин, В.Е. Муравьев, Ю.К. Трофимов, А.И. Куштуев и др. [5]. Исследования и разработки американских ученых отражены в [6].

Современные методы компрессии речевых сигналов, созданные в 80-х гг. XX в., позволяют повысить эффективность использования канала связи в 15–30 раз. Вокодеры широко применяют в современных системах подвижной связи. В системе сотовой подвижной связи стандарта GSM используется вокодер с многоимпульсным возбуждением и линейным кодированием с предсказанием. Они находят применение в системах спутниковой связи, устройствах запоминания речи, криптографии речевых сигналов, устройствах автоматического распознавания речи и т.п.

В многоканальных системах, по которым передаются сигналы речи, можно повысить приблизительно в два раза эффективность использования каналов связи и более простыми методами без применения в каждом канале вокодеров. Этого можно достичь, приняв во внимание то обстоятельство, что каждый абонент занимает канал только 40% времени, в течение которого он говорит. Первой подобной системой, в которой паузы речи использовались для увеличения пропускной способности каналов связи, была аналоговая 48-канальная система TASI, созданная в 1956 г. для подводной линии кабельной телефонной связи между Европой и Америкой [7].

В 1978 г. в нашей стране был разработан цифровой аналог системы TASI, названный блочной ИКМ (БИКМ) [8, 9]. В системе БИКМ сигнал каждого канала длительностью 2 мс методом ИКМ преобразуется в цифровую форму, и из всех отсчетов этого сигнала исключаются старшие разряды, имеющие значения логического нуля. Данный метод дает экономию числа передаваемых по каналу связи бит за счет того, что в нем учитываются не только паузы между словами и слогами, как в системе TASI, но и распределение уровней речевых сигналов. Метод нашел применение в цифровых многоканальных системах передачи сообщений по радиорелейным и спутниковым каналам связи. В цифровых системах связи со скоростью передачи 2048 кбит/с применение БИКМ удваивает их пропускную способность, позволяя передавать по ним не 30, а 60 ТФ-каналов с высоким качеством, удовлетворяющим рекомендациям МСЭ.

В Новосибирском электротехническом институте связи отечественными учеными Б.Я. Рябко и Б.Р. Звонковичем был предложен другой метод сжатия сигналов телефонии [10]. Ими была разработана адаптивная система кодирования источника сообщений, в которой для высокого качества воспроизведения телефонный разговор должен был квантоваться с частотой 8 кГц при 8 бит на отсчет. При этом формируется цифровой сигнал с большой избыточностью. Статистика сообщения постоянно меняется и зависит от говорящего абонента. Адаптивный код позволяет учесть особенности абонентов. Для кодирования выбирается блок из 16 последовательных отсчетов по 8 бит в каждом. Без сжатия информация, содержащаяся в этом блоке, требует передачи 128 бит. В предложенном алгоритме определяются X_{\min} и X_{\max} — минимальное и максимальное значения отсчетов в выбранном блоке. Код состоит из записи числа X_{\min} (8 бит), записи числа $\Delta = \text{integ} \log(X_{\max} - X_{\min})$ (3 бит) и 16 записей разностей $(X_i - X_{\min})$, каждая из которых имеет длину Δ . Таким образом, на передачу 16 отсчетов расходуется $11 + 16\Delta$ бит. Длина кода оказывается переменной, однако если кодируются одновременно от 32 до 128 разговоров, то суммарная длина кода для них практически не флуктуирует. Такой код позволяет, сохранив высокое качество воспроизведения речи, в два раза уменьшить количество бит, необходимых для передачи речевых сигналов по цифровым каналам связи.

Сигналы звукового вещания. Сигнал звукового вещания занимает полосу частот порядка 15 кГц и имеет значительный динамический диапазон (75 дБ). Для качественной передачи такого сигнала по цифровым каналам связи необходимо применение 16-разрядной ИКМ. При этом скорость цифрового потока при преобразовании сигнала ЗВ-вещания с помощью линейной ИКМ составляет 512 кбит/с.

Для сокращения избыточности вещательных сигналов в современной технике применяется несколько методов. В 1980 г. в компании Би-би-си была создана система NICAM [11] (Near Instantaneous Companded Audio Multiplex) — система ИКМ с почти мгновенным компандированием для сокращения избыточности сигналов звукового вещания. Ее также называют системой ИКМ с масштабирующими множителями. Заложенные в ней принципы сокращения избыточности по существу мало отличаются от изобретенной несколько раньше системы БИКМ. Применение мгновенного компандирования сигнала и введение масштабных коэффициентов для блоков из последовательных 32 отсчетов позволяют уменьшить количество двоичных разрядов на один отсчет с 16 до 9.

Использование ДИКМ с введением масштабирования для блоков отсчетов также позволяет сократить число двоичных разрядов на один отсчет до 9. При этом скорость цифрового потока при преобразовании монофонического сигнала ЗВ-вещания уменьшается до 320 кбит/с.

Значительным успехом в сокращении избыточности сигналов звукового вещания явилась разработка в 1989 г. метода MUSICAM [12], включенного в стандарт MPEG (Moving Picture Expert Group), который предназначен для сокращения избыточности ТВ-сигнала, включая сигнал звукового сопровождения. В системе MUSICAM вещательный сигнал разбивается на 32 парциальные полосы частот. Преобразование сигналов каждой полосы частот в цифровые потоки с помощью ИКМ осуществляется в соответствии с управляющими сигналами психоакустической модели восприятия звука человеком. При этом число двоичных разрядов на один отсчет сокращается до двух. Система позволяет сократить скорость цифрового потока, необходимого для передачи сигналов моновещания, до 100 кбит/с. По сравнению со стандартным методом преобразования сигналов цифрового вещания с помощью ИКМ, при котором этот сигнал преобразуется в цифровой поток со скоростью 512 кбит/с, сокращение избыточности достигает пяти раз. В цифровом потоке со скоростью 256 кбит/с становится возможной передача стереопрограммы с качеством компакт-диска.

4.3.3. Сокращение избыточности при передаче ТВ-сигналов

Огромная работа во второй половине XX в. была выполнена исследователями разных стран по разработке методов сжатия ТВ-сигналов. Сокращение полосы частот таких сигналов обусловлено тем, что ТВ-сигнал обладает большой избыточностью, так как имеются незначительные отличия двух последовательных кадров изображения и в каждом кадре имеются значительные однотонные участки. Эта избыточность приводит к особенностям спектра ТВ-сигнала, которые могут быть использованы для сокращения полосы частот канала связи, требуемой для передачи ТВ-сигнала. Такое сокращение возможно за счет использования статистических свойств изображения и психофизиологических особенностей человека при визуальном восприятии.

Сокращение избыточности аналоговых ТВ-сигналов. Первое исследование, в котором было показано, что ТВ-сигнал значительно избыточен, так как его спектр имеет линейчатую структуру, а основная энергия сигнала сосредоточена на гармониках строчной и кадровой частоты, было отражено в работе, выполненной в 1934 г. американскими инженерами П. Мертцом и Ф. Греем [13].

В 1950 г. в США инженер Р. Дом [14] предложил использовать частотное уплотнение спектра ТВ-сигнала дополнительной информацией, передаваемой на поднесущей, частота которой выбиралась нечетно-кратной половине частоты строк, т.е. она располагалась в середине между гармониками строчной частоты. Эти исследования в последующем были использованы при выборе частоты поднесущей для передачи сигналов цветности в спектре черно-белого ТВ-сигнала. На этом принципе основаны все современные стандарты передачи аналогового цветного ТВ (NTSC, PAL, SECAM). В нашей стране первые исследования возможностей сокращения избыточности ТВ-сигнала были проведены в конце 50-х гг. Н.Г. Дерюгиным [15].

Одна из ранних идей использования линейчатого характера спектра ТВ-сигнала состояла в том, чтобы в одном частотном канале передавать две ТВ-программы, при этом спектр второго ТВ-сигнала инвертировался и помещался в промежутки между частотными составляющими спектра первого ТВ-сигнала. Разделение двух сигналов осуществлялось с помощью гребенчатых фильтров. Этот метод не нашел практического применения, но через 30 лет в 90-х годах XX в. на основе этих идей были созданы две современные аналоговые системы передачи ТВ-сигналов высокой четкости (ТВЧ). Одна из них разработана в Японии (MUSA – Multiple Sub-Nyquist Sampling Encoding) [16], а другая – во Франции (HD-MAC – High Definition Multiplexed Analogue Component) [17]. Суть сжатия спектра в этих системах в том, что частотные составляющие в верхней области спектра исходного ТВ-сигнала помещаются в промежутки между частотными составляющими в средней части исходного спектра. В системе MUSA достигалось сжатие спектра исходного ТВЧ-сигнала в три раза (до 8,1 МГц), а в системе HD-MAC – в полтора раза (до 11 МГц). В обеих системах использовалась последовательная передача сигналов яркости, цветности, звукового сопровождения и сигналов синхронизации.

Сокращение избыточности цифровых ТВ-сигналов. Развитие систем передачи видеосигналов связано с применением цифровых методов их обработки, дающих сокращение скорости цифрового потока, необходимого для передачи данных сигналов с высоким качеством. В большинстве этих методов используется ДИКМ. При этом осуществляется предсказание каждого элемента изображения на основе взвешенной комбинации предыдущих отсчетов, расположенных вблизи от него. В канал связи передается разность между предсказанным и истинным значением этого элемента. Эта разность мала из-за высокой корреляции соседних элементов изображения, и для ее передачи в цифровой форме необходимо гораздо меньшее число бит, нежели это требуется для преобразования в цифровую форму его исходных отсчетов. Применяется также и субнапквистовое кодирование, когда отсчеты по вертикальной, горизонтальной и временной оси изображения передаются с частотой меньше $1/2F$, где F – полоса частот изображения. На приеме восстановление недостающих элементов осуществляется путем интерполяции. Использование ДИКМ позволяет сократить цифровой поток для цветного ТВ-сигнала до 50–70 Мбит/с. Применение адаптивной ДИКМ с использованием межполевого и межкадрового предсказания позволяет дополнительно сократить этот поток до 30 Мбит/с [18].

В разработанных в начале 90-х гг. XX в. стандартах MPEG [19] для сжатия сигналов изображения учитывается также то, что большая часть изменений изображения от кадра к кадру является следствием смещений малых областей изображения в предыдущем кадре. Определив для каждой области это смещение (вектор движения), можно существенно повысить точность предсказания элементов изображения и в итоге сократить избыточность передаваемого сигнала.

Использование алгоритмов компенсации движения и кодирования блоков элементов изображения с помощью косинус-преобразования или преобразования Адамара дает возможность сократить цифровой поток вещательного ТВ-сигнала до 6 Мбит/с. Этот цифровой поток путем применения многопозиционных сигналов (например, КАМ-16) можно передать в полосе частот 1,5–2 МГц, что позволяет в полосе частот стандартного канала наземного ТВ-вещания разместить до пяти цифровых ТВ-программ.

4.3.4. Сокращение избыточности в системах телеметрии

Системы телеметрии широко применяют в разных областях современной техники. В частности, они необходимы в технике космической связи. Уже при выполнении первых космических программ выявилась необходимость передачи с космических аппаратов (КА) весьма значительных объемов данных, связанных как с работой телеметрических систем КА, так и с получаемыми с помощью специального оборудования данными исследований, проводимых на борту КА. Эта задача могла быть решена только путем кодирования источников сообщений, находящихся на их борту. Исследования при разработке системы телеметрических измерений, которая использовалась на космическом аппарате «Маринер-2», посланном к Юпитеру, показали, что сжатие данных позволяет на сотни килограммов уменьшить вес бортовой аппаратуры. Кроме того, за счет применения систем кодирования источников сообщений суммарная экономия средств на создание телеметрических систем составляет около 250 млн долл.

Для сжатия данных в телеметрических системах использовались как методы, описанные в 4.1, в частности коды Хаффмена, универсальные методы кодирования источников и др., так и методы, о которых шла речь в 4.2, в частности апертурные методы. Прикладным вопросам кодирования источников телеметрической информации посвящена обширная литература [20–23].

4.3.5. Сокращение избыточности компьютерных файлов

В современных компьютерах широко используют программы для кодирования хранящихся в памяти текстовых, аудио-, видеофайлов и др. Они также называются программами упаковки файлов (ZIP-программами). В основе программ упаковки текстовых файлов часто лежит адаптивный алгоритм Хэмминга либо предложенный в 1977 г. А. Лемелем и **Я. Зивом** более эффективный алгоритм LZ, описанный в 4.1. Этот алгоритм преобразует видеофайлы в файлы с расширением *.gif*. Метод кодирования с использованием косинус-преобразования и затем адаптивного кода Хаффмена применяется для упаковки видеофайлов в файлы с расширением *.jpg*. В типичных случаях упакованные текстовые файлы по объему меньше исходных в 3–5 раз, а коэффициент сжатия видеофайлов в некоторых случаях может достигать 20.

§ 5. Теория кодирования

Начало истории кодирования можно отнести к 1948 г., когда была опубликована знаменитая статья **Клода Шеннона**, доказавшего принципиальную возможность безошибочной передачи сигналов, если скорость передачи не превышает пропускной способности канала связи. Пропускная способность канала связи тем больше, чем выше отношение сигнал/шум на входе приемного устройства. Эта закономерность указывала на то, что энергетика линий связи определяет только их пропускную способность, а сколь угодно высокой помехоустойчивости приема сообщений можно достичь путем применения специальным образом построенных кодов. Новаторские идеи Шеннона изменили сознание инженеров-связистов. Ведь до создания этой теории считалось само собой разумеющимся, что единственные возможности повышения помехоустой-

чивости приема сигналов состоят в увеличении мощности передатчика или же в многократной передаче по каналу связи одного и того же сообщения. Оба эти способа приводят к весьма низкой эффективности использования пропускной способности канала связи.

В 1950 г. **С.О. Райсом** [1], а позже **К. Шенноном** [2] было доказано, что почти любой случайно выбранный достаточно длинный код является оптимальным, т.е. обеспечивает максимально возможную помехоустойчивость приема передаваемой информации. Причем с увеличением его длины вероятность ошибочного приема сигналов уменьшается по экспоненциальному закону. Однако применение длинных кодов продолжительное время было практически невозможно из-за вычислительных трудностей, возникающих при их декодировании. Это связано с тем, что оптимальное декодирование по методу максимума правдоподобия основано на определении кодового расстояния между принятым сигналом и всеми комбинациями выбранного кода. В оптимальном декодере осуществляется сравнение вычисленных кодовых расстояний между собой и выбор той кодовой комбинации, которая удалена от принятого сигнала на минимальное расстояние. Количество вычислений, которые при этом необходимо выполнить в декодере, огромно, так как с увеличением длины кода число кодовых комбинаций растет по экспоненциальному закону.

Поэтому начиная с 50-х гг. XX в. многочисленные исследования были направлены на решение следующих проблем теории кодирования:

- построение кодов с регулярной структурой, обладающих высокой способностью корректировать ошибки;
- определение потенциальных возможностей коррекции ошибок с помощью кодов с заданной избыточностью;
- разработка алгоритмов декодирования, реализующих потенциальные возможности коррекции ошибок данным кодом, сложность которых растет с ростом длины кода не по экспоненциальному, а по степенному закону;
- согласование кодов, корректирующих ошибки, видов модуляции и алгоритмов декодирования со статистическими характеристиками каналов связи.

5.1. Блочные коды

Первый метод построения блочных бинарных кодов с регулярной структурой, позволяющих корректировать одиночные ошибки, был предложен **Р. Хэммингом**, работавшим в конце 40-х гг. XX в., как и К. Шеннон, в Белл-лаборатории. При блочном кодировании последовательность информационных символов, каждый из которых может принимать q значений, разбивается, как это показано на рис. 4.6, на отдельные блоки определенной длины k . Для каждого такого блока формируются дополнительно $(n - k)$ -проверочных символов, которые образуются путем сложения по модулю q определенных информационных символов. Блоки информационных и проверочных символов передаются в канал связи.



Рис. 4.6

В своей знаменитой статье 1948 г. К. Шеннон в качестве иллюстрации возможности повышения помехоустойчивости приема сигналов с помощью кодирования привел со ссылкой на Р. Хэмминга простой пример семизначного кода, имеющего четыре информационных знака и корректирующего одну ошибку. Из-за того что на этот метод кодирования оформлялась заявка на изобретение, статья **Р. Хэмминга** [3], содержащая описание процедур кодирования и декодирования предложенных им кодов, была опубликована только в 1950 г. Р. Хэммингом было введено важное понятие расстояния d между кодовыми комбинациями. Это расстояние определяется числом позиций, на которых в кодовых комбинациях находятся различные символы.

В своей работе он установил важные взаимозависимости между минимальным расстоянием между кодовыми комбинациями d_{\min} , числом исправляемых ошибок t , длиной кода n и числом проверочных символов $(n - k)$. Эти же коды были независимо открыты другим американским ученым М. Дж. Голеем, опубликовавшим в 1949 г. свои результаты в короткой статье [4], где был рассмотрен общий случай небинарных кодов, символы которых могли принимать одно из q значений (q является степенью простого числа и называется основанием кода). Коды Хэмминга могли исправлять одиночные и обнаруживать двойные ошибки в кодовой комбинации. Они имели простой алгоритм декодирования, однако были разочаровывающе слабы по сравнению с теми возможностями коррекции ошибок для длинных кодов, на которые указывала теория Шеннона. Тем не менее значение этих кодов велико, так как их открытие дало толчок для огромного числа последующих работ в области алгебраической теории кодирования. Работа Р. Хэмминга явилась катализатором цепной реакции выдвижения новых идей в данной области, которая началась с 1954 г.

Американские ученые И.С. Рид [5] и независимо от него Д.Е. Маллер [6] предложили блочные коды, корректирующие многократные ошибки в кодовой комбинации.

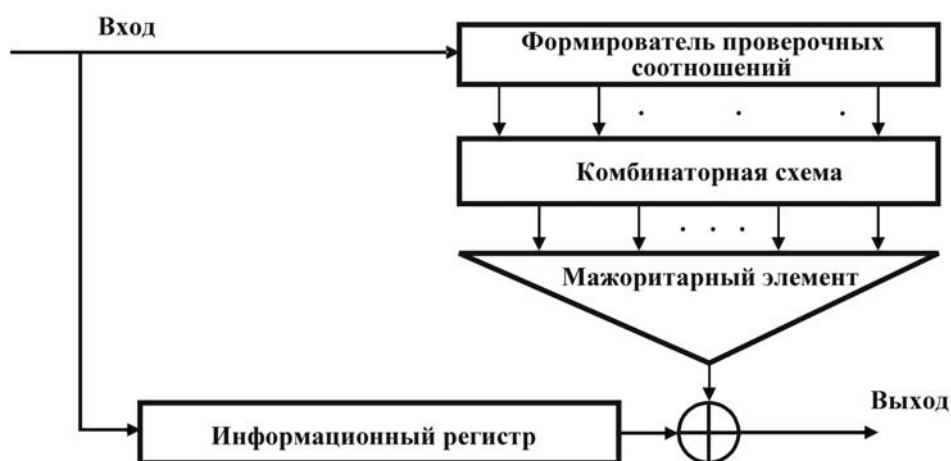


Рис. 4.7

Коррекция ошибок осуществляется в показанном на рис. 4.7 сумматоре по модулю 2, на один из входов которого поступает принятая последовательность символов, которая в информационном регистре задерживается на время, требуемое для формирования в мажоритарном элементе (МЭ) корректирующих символов.

Американский ученый **Д. Слепян**, получивший важные результаты в разных областях теории связи, был одним из первых, кто в 1956 г. заложил строгий математический фундамент теории линейных блочных кодов с проверкой на четность — математическую теорию групп. Его статья [7], опубликованная в журнале IEEE Transactions on Information Theory, стала широко известной и оказала существенное влияние на дальнейшее развитие теории кодирования. Следует отметить, что за три года до публикации Д. Слепяна японскими учеными были получены аналогичные результаты [8], однако, к сожалению, длительное время научный мир не был с ними знаком.

Д. Слепяном было доказано, что для декодирования двоичных кодов можно путем сложения по модулю 2 определенных принятых информационных символов с принятым символом, который используется для их проверки на четность, сформировать $(n - k)$ символов, образующих так называемый синдром, который полностью определяет конфигурацию ошибок в информационных символах, если их число не превышает исправляющей способности кода.

Давид СЛЕПЯН

Давид Слепян родился 30 июня 1923 г. в Питсбурге (США). С 1941 по 1943 г. учился в Мичиганском университете. С 1943 по 1946 г. служил в американской армии. В 1946 г. окончил Гарвардский университет и получил степень магистра, а в 1949 г. в этом же университете ему была присвоена докторская степень по физике. После стажировки в Кембридже (Англия) и Сорбонне (Франция) он в 1950 г. стал сотрудником Математического исследовательского центра в Белл-лаборатории — мировом научном центре, в котором в XX столетии были проведены фундаментальные исследования во многих областях науки. В то время сотрудниками лаборатории были ученые, внесшие значительный вклад в разные разделы статистической теории связи, а именно К. Шеннон, С.О. Райс, Э. Берлекамп, А. Вайнер, Ф. Дж. МакВильямс, Г. Дж. Ландау и Т.Т. Кадота.

Вся научная карьера Д. Слепяна тесно связана с этой лабораторией, в которой он проработал до выхода на пенсию в 1982 г. Д. Слепян был научным консультантом многих проектов, разрабатываемых в Белл-лаборатории. В первые годы своей работы он провел фундаментальные исследования в области коммутации и проектирования логических схем.



Однако в начале 50-х гг. XX столетия он стал заниматься проблемами статистической теории связи, которая в то время находилась на стадии становления. В этой области Д. Слепян достиг значительных результатов, став одним из самых авторитетных в мире ученых.

В середине 50-х годов он опубликовал две важные работы. В первой из них «Оценка параметров сигнала при наличии шума» (1954 г.) были изложены результаты, которые относились к определению точности оценок параметров сигналов, принимаемых на фоне гауссовского шума. Во второй — он заложил основы современной теории кодирования, первым предложив применение алгебраической теории групп для построения кодов с исправлением ошибок. Его классическая статья «Класс двоичных сигнальных алфавитов» (1956 г.) вызвала поток научных работ, что привело к быстрому прогрессу в теории кодирования.

В 1956 г. Д. Слепян возглавил в Белл-лаборатории Исследовательский центр, разрабатывающий проблемы теории связи. Д. Слепяном было установлено (1958 г.): если спектр мощности шума удовлетворяет определенным условиям, то возможно достоверное обнаружение принимаемых сигналов. Этот вывод также явился важным вкладом в теорию связи. Он опубликовал несколько статей по теории случайных процессов, в которых, в частности, были получены новые результаты по проблеме распределения нулей гауссовского шума. В 1963 г. Д. Слепян опубликовал статью «Границы в электросвязи», в которой были определены верхние и нижние границы вероятности ошибки декодирования для оптимальных кодов, передаваемых в канале с ограниченной полосой частот и с аддитивным гауссовским шумом. Совместно с Г.О. Поллаком и Г. Дж. Ландау он ввел в теорию связи вытянутые сфероидальные волновые функции, с помощью которых им удалось решить задачу синтеза сигналов ограниченной длительности, занимающих минимально возможную полосу частот. Позже эти функции стали использовать для решения широкого круга задач, связанных с обработкой сигналов: оценки спектров сигналов, исследований точности восстановления функции по ее отсчетам и т.д.

В 1973 г. Д. Слепян совместно с другим крупным американским ученым Дж. Вольфом опубликовал основополагающую работу, в которой рассматривалась проблема кодирования многокомпонентных источников информации. Эта статья в том же году была отмечена премией Секции теории информации Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE).

Д. Слепян занимался не только научными исследованиями, но и вел преподавательскую деятельность. В 1958—1959 гг. он был приглашен профессором в Калифорнийский университет (Беркли). В настоящее время он профессор Гавайского университета (Гонолулу) и продолжает сотрудничать с Белл-лабораторией.

Научные заслуги Д. Слепяна отмечены многими престижными премиями и наградами. Секция теории информации IEEE избрала его в 1974 г. шенноновским лектором. Это звание весьма почетно и присваивается выдающимся ученым. Несколько раз он был руководителем комитета Секции теории информации IEEE и в 1969—1970 гг. редактором журнала *Proceedings of the IEEE*. В 1981 г. за фундаментальный вклад в теорию связи был награжден почетной медалью IEEE А. Белла, а в 1994 г. стал лауреатом премии К. Шеннона, присуждаемой Секцией теории информации IEEE.

Д. Слепян — почетный член IEEE, член Института математической статистики и Национальной инженерной академии США (избран в 1976 г.). В 1977 г. он был избран членом Национальной академии наук США.

5.2. Циклические коды

Важные исследования, создавшие основу для разработки оборудования, используемого при кодировании, а также при исправлении и обнаружении ошибок с помощью линейных кодов, были проведены в 1955–1956 гг. американскими учеными Н. Цирлером, Д. Хаффменом и С.В. Голомбом [9–12]. Ими была разработана общая теория линейных переключающих схем с конечным числом состояний. Такие схемы позволяют формировать проверочные символы при кодировании сигналов, а также строить достаточно простые декодирующие устройства.

Эти работы подготовили теоретическую базу для создания циклических кодов, которые ввел в 1958 г. другой американский ученый Е. Прейндж [13], указав на их связь с идеалами алгебр. Циклические коды являются важным подклассом линейных кодов, которые имеют эффективные алгоритмы кодирования и декодирования, основанные на применении идей алгебраической теории полей Галуа.

Весьма важный и обширный класс линейных циклических кодов был предложен Р. Боузом и Д. Рой-Чоудхури (США, 1960 г.) [14]; А. Хоквингемом (Франция, 1959 г.) [15]. В их честь эти коды были названы кодами БЧХ по первым буквам имен ученых, открывших их независимо. Коды БЧХ позволяли корректировать многократные ошибки в принятой кодовой комбинации. Эти коды имели следующие параметры: $n = 2^m - 1$, $k > 2^m - 1 - mt$, $d > 2t + 1$ (здесь n — длина кода, k — число информационных символов в кодовой комбинации, t — число корректируемых ошибок, d — минимальное хэммингово расстояние между кодовыми комбинациями).

Важным подклассом кодов БЧХ являются коды Рида—Соломона (коды РС) [16], являющиеся недвоичными систематическими блочными кодами, каждый элемент кода выбирается из алфавита $q = 2^s$ символов. При этом S информационных бит отображается одним символом, и максимальная длина кодового слова не может превышать $n_{\max} = 2^s - 1$. Наиболее часто такие коды имеют байтовую структуру, т.е. $S = 8$ и $n_{\max} = 255$.

На рис. 4.8 показана схема кодирующего устройства для кода РС. На ней указаны элементы задержки D на один символ, представляющие собой восьмиразрядные регистры сдвига, и сумматоры по модулю q . В начале цикла кодирования ключ S_1 замкнут и в регистр сдвига поступают информационные символы, из которых формируются проверочные. При этом ключ S_2 находится в нижнем положении, и информационные символы поступают на выход кодера. После окончания поступления в регистр сдвига блока символов ключ S_1 размыкается, а ключ S_2 переводится в верхнее положение.

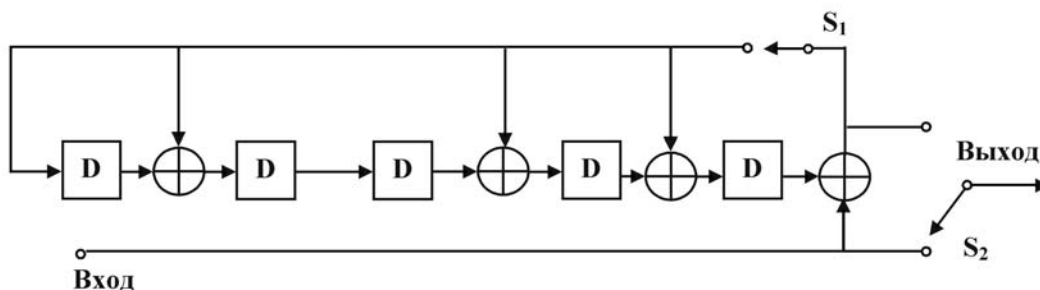


Рис. 4.8

На выход кодера из регистра поступают проверочные символы. Декодирование линейных кодов в общем случае, когда $q > 2$, возможно путем решения алгебраических уравнений, которые позволяют определить как позиции в кодовой комбинации, на которых произошли ошибки, так и символы, корректирующие ошибки на этих позициях.

Значительный вклад в разработку методов алгебраического декодирования кодов БЧХ внесли американские ученые У. Питерсон, Э. Берлекамп и Т. Кассами.

На рис. 4.9 в качестве примера показана схема алгебраического декодера для кодов РС. Недостаток кодов БЧХ в том, что в любой последовательности этих кодов с возрастающей длиной n и ограниченной кодовой скоростью $(k/n) \geq R$ нормируемое минимальное кодовое расстояние с ростом n уменьшается ($d_{\min}/n \rightarrow 0$).

Поэтому такие коды не позволяют достичь тех пределов помехоустойчивости приема, на которые указывает теория Шеннона. В течение десяти лет не удавалось построить линейные коды более мощные, чем коды БЧХ. В 1970 г. отечественным ученым В.Д. Гоппой [18] был предложен новый класс кодов, которые, как было доказано, позволяют строить коды, в которых с увеличением их длины минимальное кодовое расстояние d_{\min} также пропорционально возрастало.

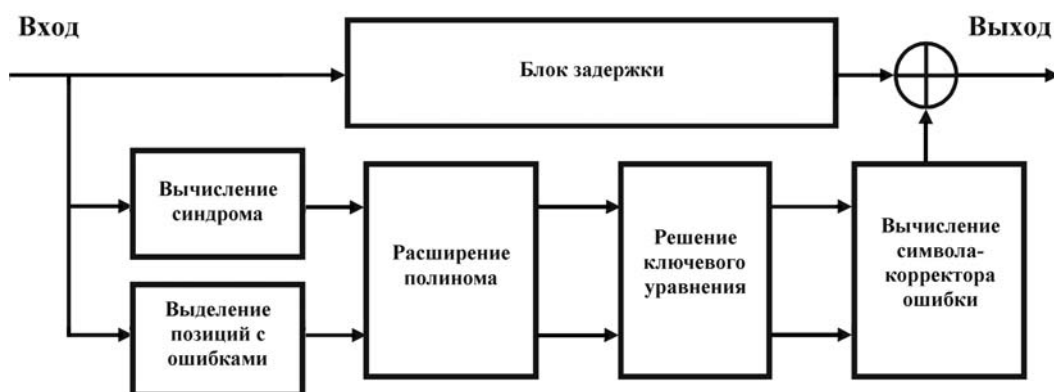


Рис. 4.9

В 1974 г. американским ученым Г.Г. Хельгертом [19] были построены так называемые альтернантные коды, частным случаем которых являются коды В.Д. Гоппы. Операции кодирования и декодирования альтернантных кодов сложны, поэтому на практике они применения не нашли.

Для декодирования некоторых циклических кодов может быть использован метод мажоритарного декодирования, открытый впервые в 1954 г. И.С. Ридом [5]. В 1963 г. Дж. Л. Месси установил общие принципы построения и декодирования подобных кодов [20]. Значительный вклад в создание теории построения мажоритарно декодируемых циклических кодов внесли в 1965 г. отечественные ученые В.Д. Колесников и Е.Т. Мирончиков [21]. Достоинством мажоритарно декодируемых кодов являются чрезвычайная простота и быстрдействие алгоритмов декодирования.

Новый эффективный метод декодирования таких кодов был предложен в 1976 г. отечественным ученым В.В. Золотаревым [22]. Этот метод позволил создавать достаточно простые декодеры для кодов большой длины (что в соответствии с теоремой Шеннона существенно повышает помехоустойчивость приема сигналов), названные оптимизированными многопороговыми декодерами (ОМПД). Для этого было предложено объединить несколько пороговых декодеров в один, формируя многоступенчатое, распределенное решение. Благодаря регистрации информационных символов, измененных на последующих ступенях декодирования, анализаторы синдрома последующих ступеней используют ранее принятые решения для последовательного приближения к решению оптимального декодера. В последующие годы этот метод развивался в работах Ю.М. Брауде-Золотарева, В.В. Золотарева [23, 24].

ЭЛВИН БЕРЛЕКАМП

Крупный американский ученый в области теории кодирования Элвин Р. Берлекамп родился в Довере, штат Огайо, 6 сентября 1940 г. Учился в Массачусетском технологическом институте (МТИ), который закончил в 1962 г. и получил магистерскую степень в области электротехники, а в 1964 г. стал доктором наук. После защиты диссертации Э. Берлекамп в течение трех лет работал в Калифорнийском университете в Беркли в качестве старшего преподавателя. С 1967 по 1971 г. он сотрудник Математического исследовательского центра в Белл-лаборатории в г. Нью-Джерси, а затем вернулся в свой университет профессором математики.



Еще в начале 70-х гг. Э. Берлекамп основал фирму «Cyclotomics Inc.», которая специализировалась на проведении исследовательских работ и разработке и реализации высокоточных систем управления для цифровой связи и накопителей данных. С 1982 г. Э. Берлекамп совмещал преподавание в университете и работу в своей фирме, которая в 1985 г. была приобретена компанией «Кодак», и до 1989 г. Э. Берлекамп оставался ее президентом-учредителем.

Под руководством Э. Берлекампа в компании были спроектированы и разработаны электронные системы и интегральные схемы, которые реализовывали новые алгоритмы кодирования и декодирования для кодов с исправлением ошибок, коррекции искажений, для синхронизации в системах военной космической связи и в коммерческих системах. В 1984 г. в фирме Cyclotomics по заказу НАСА был создан кодек для системы связи с космическими аппаратами, находящимися в космосе. В частности, кодек использовался на аппарате «Вояджер», достигшем в августе 1989 г. планеты Нептун. В нем применяли код Рида—Соломона и алгоритм декодирования, разработанный Э. Берлекампом. Такой же код и алгоритм декодирования использовались в проигрывателях компакт-дисков, производимых промышленностью.

Фирмой были разработаны информационные системы военного назначения, система накопления данных для библиотеки конгресса, факсимильные системы, оптические системы памяти с высокой плотностью записи сообщений и лазерным считыванием информации. Фирма являлась пионером в разработке оборудования для электронных систем кинематографии, включая алгоритмы компрессии данных, криптографическую защиту, устройства синхронизации и т.п.

Э. Берлекамп — автор 75 научных публикаций и 13 патентов. Им была написана фундаментальная научная монография «Алгебраическая теория кодирования», изданная в 1968 г. в издательстве McGraw-Hill и переизданная в 1984 г. в Aegean Park Press. Эта книга в 1971 г. была выпущена также на русском языке издательством «Мир». Берлекамп написал книгу «Путь победы», представляющую собой двухтомный курс комбинаторной теории игр двух лиц с полной информацией. Им написаны несколько книг, в которых рассматриваются занимательные математические задачи.

С десяти лет Э. Берлекамп увлекался искусством демонстрации фокусов. В настоящее время в круг его научных интересов входит разработка на основе теории информации методов прогнозирования курса акций на бирже.

Профессор Э. Берлекамп — почетный член Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE), в 1973 г. он был президентом Секции теории информации IEEE. Он также член Национальной инженерной академии, Национальной академии наук, Американской академии искусств и наук и Американской ассоциации содействия развитию наук. Ему присужден ряд почетных научных наград. Он лауреат премий IEEE им. К. Шеннона и Р. Хэмминга.

5.3. Рекуррентные коды

В 1955 г. независимо *П. Элайсом* [25] и отечественными учеными *Л.М. Финком* и *В.И. Шляпоберским* [26] был предложен важный класс сверточных или рекуррентных кодов, нашедший широкое применение в современной технике связи. Исследования, связанные с построением таких кодов и разработкой эффективных с вычислительной точки зрения алгоритмов их декодирования, заняли более 20 лет. Позднее, в 1960 г., эти коды были исследованы *Д. Хегельбергером* [27], статья которого вызвала появление многих других работ, посвященных этим кодам. Этот метод кодирования успешно применяется в высокоскоростных системах передачи цифровых сигналов по спутниковым каналам связи.

В этом классе кодов информационная последовательность символов разбивается на блоки, содержащие по m символов, которые поступают на линейный преобразователь, имеющий память на K подобных блоков. На рис. 4.10 показана в качестве примера схема кодера сверточного кода (в данном случае $K = 2$, на рис. 4.10 блоки D — элементы задержки на один символ, а сумматоры осуществляют сложение символов по модулю 2). В преобразователе каждый блок из m поступивших символов с учетом содержащихся в памяти K блоков (K — длина кодового ограничения) преобразуется в n ($n > m$) символов, передаваемых по каналу связи.

Информационные символы и символы, формируемые на выходе K блоков, объединяются в единый цифровой поток в мультиплексоре. При этом относительная скорость передачи информации составляет $R = m/n$ (в примере, приведенном на рис. 4.10, $R = 1/3$).

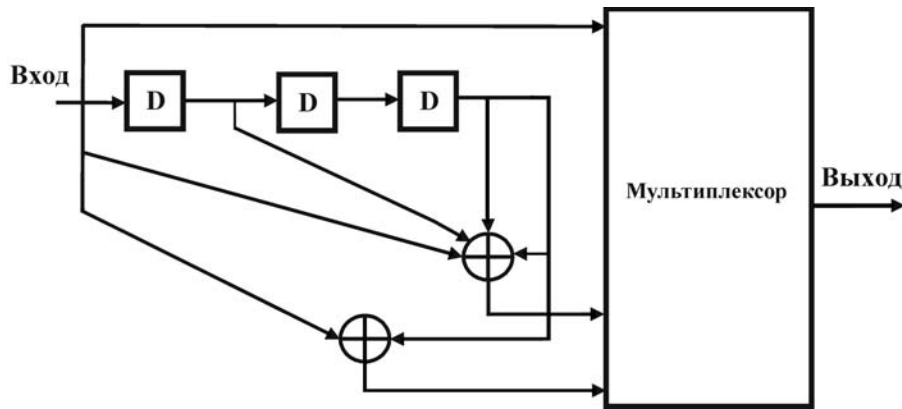


Рис. 4.10

Сверточные коды являются частным случаем блочных линейных кодов. Однако введение сверточной структуры наделяет эти коды дополнительными свойствами, которые существенно облегчают его декодирование. Эти коды имеют древовидную (или, как часто говорят, решетчатую) структуру, каждому ребру которой соответствует определенная последовательность t информационных символов. Для их декодирования могут применяться алгебраические методы.

При оптимальном декодировании сверточных кодов в декодере по принятой последовательности символов для каждого ребра определяется его вес — число, характеризующее его расстояние от принятой последовательности. Если в демодуляторе принимается жесткое решение, то для измерения этого расстояния используется метрика Хэмминга. Декодирование состоит в прослеживании по кодовой решетке того пути, для которого расстояние от принятой последовательности символов имеет минимальное значение. Структура сверточного кода позволяет для вычисления этого расстояния использовать рекуррентные алгоритмы, упрощающие процедуру его декодирования. Вместе с тем если длина кодового ограничения велика, то оптимальное декодирование таких кодов требует огромных вычислений.

Изящный алгоритм последовательного декодирования, в соответствии с которым в декодере просматриваются не все возможные пути по ребрам кодовой решетки сверточного кода, а только наиболее вероятные, был предложен в 1957 г. американским ученым Дж. Возенкрафтом [28]. В соответствии с этим алгоритмом, если декодер выбрал на каком-то шаге неверный путь, то он вскоре обнаруживает, что при последующих выборах ребер происходит быстрое увеличение расстояния между выбранным путем и принимаемой последовательностью. Это является сигналом к тому, чтобы декодер сделал несколько шагов назад и начал исследовать альтернативные, более правдоподобные пути. При последовательном декодировании число вычислений на одно ребро является случайной величиной, и в буферной памяти декодера должны храниться вычисленные расстояния для всех исследованных ветвей. Первые исследования алгоритма последовательного декодирования провели Дж. Возенкрафт и Б. Рейффен [29]. В 1963 г. его усовершенствовал

Р.М. Фано, в 1966 г. эффективную модификацию этого алгоритма разработал отечественный ученый К.Ш. Зигангиров [30], а несколько позднее (1969 г.) аналогичный алгоритм был предложен американским ученым Ф. Джелинеком.

Значительным достижением в области теории кодирования явилась разработка в 1967 г. одним из крупнейших американских ученых **А. Витерби** эффективного с вычислительной точки зрения алгоритма декодирования сверточных кодов по максимуму правдоподобия [31]. Этот алгоритм, в отличие от алгоритма последовательного декодирования, исследует все возможные пути по кодовой решетке на длине кодового ограничения K . Поэтому он применим для декодирования сверточных кодов при сравнительно небольших значениях $K = 7 - 10$.

Сверточные коды в настоящее время получили весьма широкое распространение в радиорелейных и спутниковых системах связи. Для их декодирования используется метод последовательного декодирования либо алгоритм Витерби.

5.4. Коды, корректирующие пакеты ошибок

В реальных каналах связи ошибки при приеме последовательно поступающих символов часто происходят не независимо и возникают пакеты ошибок. Для систем связи в таких каналах построены специальные коды. Для этой цели могут быть использованы блочные коды, построенные в конце 50-х гг. М.А. Эпштейном [32], Н. Абрамсоном [33] и П. Файером [34]. Ими были созданы коды, корректирующие одиночные пакеты ошибок. В 1963 г. Дж. Стоун создал коды, способные корректировать несколько пакетов ошибок в кодовой комбинации [35]. Для коррекции пакетов ошибок были предложены сверточные коды [26, 27].

Следует отметить, что задача коррекции пакетов ошибок может быть сведена к задаче коррекции независимых ошибок путем применения метода перемежения символов. Этот метод состоит в перестановке передаваемых символов таким образом, чтобы соседние символы передаваемой кодовой комбинации оказывались разнесенными в достаточной степени во времени так, чтобы их искажения в канале связи были независимыми. На приеме производится восстановление исходного порядка символов. Эта простая идея, выдвинутая в 1960 г. отечественными учеными — академиком **А.А. Харкевичем** и профессором Э.Л. Блохом [36], а позднее (1970 г.) американским ученым Дж. Л. Рамсеем [37], сегодня применяется во многих системах радиорелейной и подвижной связи, в которых при приеме цифровых сигналов группируются ошибки.

5.5. Итерированные коды

В 1954 г. **П. Элайсом** [38] был предложен важный класс итерированных кодов. В двумерном случае эти коды формируются следующим образом: последовательность информационных символов длиной $N_1 = N_1 \times N_2$ записывается в буферную память в виде таблицы, имеющей $N_1 - C_1$ столбцов и $N_2 - C_2$ строк, как это показано на рис. 4.11.

Символы отдельных строк и столбцов кодируются с помощью корректирующих кодов, имеющих соответственно C_1 и C_2 проверочных символов и расстояния между кодовыми комбинациями, равные соответственно d_1 и d_2 .

П. Элайсом было показано, что для такого кода расстояние между кодовыми комбинациями равно $d = d_1 \times d_2$. С помощью этих кодов вначале по линии связи передаются N_1 символов первой строки. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будут переданы $(N_2 - C_2)$ строк. Затем определяются последние C_2 строки, содержащие проверочные символы, сформированные для каждого столбца таблицы. При декодировании принятого сигнала используются C_1 проверочных символов первого порядка для исправления ошибок информационных символов, расположенных в строках таблицы. Для исправления оставшихся после этих проверок ошибок в столбцах таблицы используются C_2 проверочных символов второго порядка.

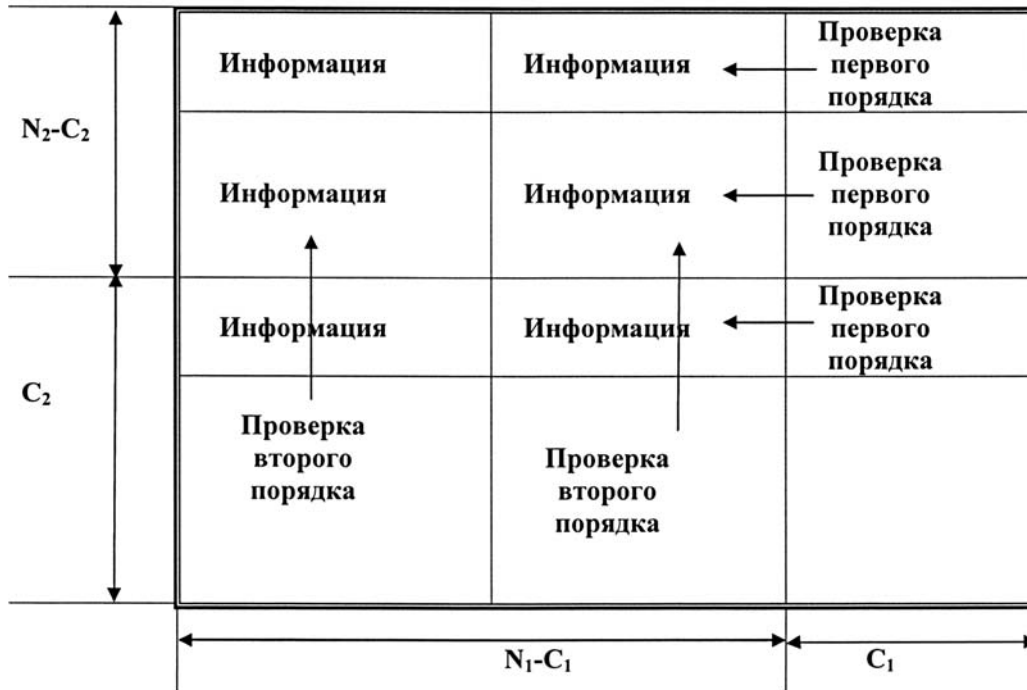


Рис. 4.11

П. Элайсом были исследованы коды, имеющие k измерений. В этом случае длина кода равна $N = \prod_{i=1}^k N_i$.

Если же $k = 2$, то кодирование с помощью итерированных кодов можно пояснить, пользуясь таблицей рис. 4.11.

П. Элайс показал, что при выполнении определенных ограничений на вероятность ошибки в канале связи и длину N_i парциальных кодов в соответствии с теоремой **К. Шеннона** вероятность ошибочного приема символов на выходе декодера стремится к нулю при $k \rightarrow \infty$.

Питер ЭЛЙС

Питер Элайс родился 23 ноября 1923 г. в Брунsvике (штат Нью-Йорк) в семье инженера, который был сотрудником лаборатории Томаса Эдисона. В 1942 г. он поступил в Бостоне в колледж, на основе которого через два года был создан Массачусетский технологический институт (МТИ). После окончания МТИ в 1944 г. Элайс был призван служить радистом в военно-морской флот США. После увольнения в запас в чине помощника капитана первого класса по электронному оборудованию П. Элайс продолжил свое образование в Гарвардском университете, где позже получил ученую степень доктора наук.

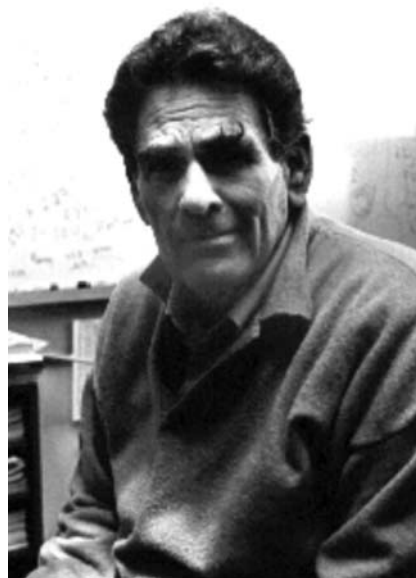
В 1953 г. он начал преподавать в МТИ. В 1956 г. стал доцентом, а в 1960 г. — профессором МТИ. Позднее он получил звание почетного профессора и главного лектора. В МТИ он преподавал до 1991 г. и одно время был деканом факультета электротехники и компьютерных наук. В 1976 г. П. Элайс начал работать в Лаборатории проблем разработки компьютеров. Он также работал в Исследовательской лаборатории электроники, в которой занимался проблемами теории информации и ее применений к системам связи и обработки данных.

Профессор П. Элайс внес значительный вклад в развитие теории информации, выдвинув ряд основополагающих новых идей, касающихся кодирования сообщений для их передачи по каналу связи и кодирования источников (сокращения их избыточности).

В 1954 г. им было введено важное понятие сверточного кода. Этот класс кодов интенсивно исследовался многими учеными. Для этих кодов Дж. Возенкрафтом был предложен метод последовательного декодирования, а Э. Витерби — широко используемый на практике алгоритм декодирования по методу максимального правдоподобия. В 1998 г. за это научное достижение П. Элайс был отмечен золотой юбилейной медалью Секции теории информации IEEE.

В этом же году П. Элайс выдвинул идею построения итеративных кодов. В двумерном случае такие коды могут быть представлены матрицей, имеющей N_1 столбцов и N_2 строк, на каждой из позиций которых расположены информационные или проверочные символы. Дополнительные избыточные символы добавляются путем кодирования символов каждого из столбцов и затем каждой из строк. Уникальность каскадных кодов в том, что они обладают достаточно простыми алгоритмами декодирования.

В 1955 г. Элайсом была доказана теорема кодирования для кодов с проверкой на четность в двоичном симметричном канале и в канале со стиранием отдельных символов. Он установил важный теоретический результат, который показывал, что при скоростях, близких к пропускной способности, границы случайного кодирования и сферической упаковки экспоненциально совпадают. В этом же году, работая в группе профессора Р. Фано в Исследовательской лаборатории электроники (МТИ), П. Элайс создал первые практически действующие кодер и декодер, позволяющие передать информацию с заданной скоростью и произвольно



малой вероятностью ошибки по каналу с шумом. В 1955 г. им была предложена и детально исследована оригинальная идея построения систем связи с предсказанием. В этой системе избыточность передаваемого сообщения, обусловленная статистической зависимостью его соседних отсчетов, устранялась путем формирования разности между передаваемым отсчетом и его предсказанным значением. Для предсказания использовались предыдущие сигналы.

В 1957 г. П. Элайс ввел для двоичного симметричного канала понятие декодирования списком. При декодировании списком декодер на базе полученного с ошибками слова составляет список из определенного числа возможных кодовых слов, имеющих наибольшую апостериорную вероятность, и если переданное кодовое слово появится в любом месте этого списка, то оно считается принятым правильно. Такое декодирование могло быть практически полезным, если бы в системе связи имелся обратный канал и при последующей передаче устранялась неопределенность путем указания, какое кодовое слово из данного списка в действительности было передано. Введенное П. Элайсом важное понятие декодирования списком имело многочисленные применения и, в частности, было использовано К. Шенноном, Э. Берлекампом и Р. Галлагером для получения нижней границы вероятности ошибки для оптимальных кодов.

В 1963 г. П. Элайс предложил важный класс арифметических кодов, которые в дальнейшем получили применение в коммерческих системах устранения избыточности. Эти коды, усовершенствованные в 1976 г. американскими учеными Дж. Риссаненом и Р. Паско, оказались более простыми в реализации по сравнению с известными оптимальными кодами Хаффмена.

Количество публикаций у П. Элайса невелико. Однако его результаты вошли во все монографии, посвященные теориям информации и кодирования. В 1976 г. была опубликована его книга «Очерки теории информации».

За новаторские исследования в области теории информации и значительный вклад в подготовку инженеров профессор П. Элайс был избран почетным членом Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE), Американской ассоциации содействия развитию наук, Национальной академии наук и Национальной инженерной академии США, Американской академии искусств и наук, а также многих других научных обществ и ассоциаций.

Он был председателем Секции теории информации IEEE, членом комитетов IEEE по присуждению премий и по стандартизации. Кроме того, он был одним из трех главных редакторов, основавших в 1957 г. международный журнал «Информация и контроль» (Information and Control), входил в редакционный совет издательства ИМТ и журналов Proceedings of the IEEE и IEEE Spectrum.

Профессор Питер Элайс скончался 10 декабря 2001 г. в Кембридже (США).

5.6. Каскадные коды

В 1964 г. **Д. Фorni** предложил каскадные коды, которые оказались эффективным средством исправления как одиночных, так и пакетированных ошибок [39]. Каскадное кодирование характеризуется тем, что на передаче используются два последовательно включенных кодека, как правило, различного типа. Эти кодеки оптимизированы для исправления ошибок различной конфигурации. Схема каскадного кодирования показана на рис. 4.12. Внутренний кодек и декодер сопряжены соответственно с модулятором, в котором осуществляется формирование сигналов, передаваемых по каналу связи, и с демодулятором, который, обрабатывая принятый сигнал, формирует символы, поступающие на вход декодера.

Элементы, указанные на рис. 4.12 между выходом внешнего кодера и входом внешнего декодера, образуют, по терминологии **Д. Форни**, суперканал, внешний и внутренний кодер — суперкодер, а внутренний и внешний декодер — супердекодер. Внешний кодер, добавляя проверочные символы, формирует из последовательности k информационных символов на своем выходе блоки из n символов.

Таким образом, он работает с кодовой скоростью $r = k/n$. Внешний кодер осуществляет кодирование K блоков по n символам, преобразуя их путем добавления проверочных блоков в N блоки. Таким образом, kK информационных символов преобразуются в каскадный код длиной nN символов. Кодовая скорость в данном случае составляет $R = kK/nN$.

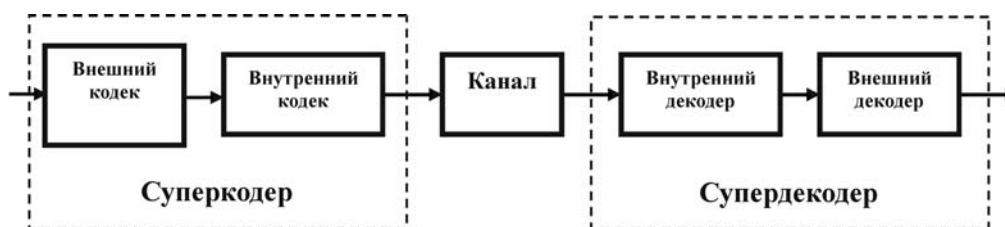


Рис. 4.12

Значимые результаты по исследованию каскадных кодов были получены Д. Форни и отечественными учеными Э.Л. Блохом и В.В. Зябловым [40], исследования которых в 1976 и 1982 гг. показали, что при соответствующем выборе внутреннего и внешнего кодов каскадные коды позволяют эффективно корректировать как независимые, так и пакетные ошибки, возникающие в канале связи. Ими было также показано, что с помощью таких кодов с увеличением их длины можно получить рост сложности алгоритмов кодирования и декодирования по степенному закону. Каскадные коды перспективны для применения в системах связи.

ДЭВИД ФОРНИ

Выдающийся американский ученый Дэвид Форни, внесший значительный вклад в теорию кодирования сообщений, родился 6 марта 1940 г. в Нью-Йорке. Его отец Дж. С. МакДоннелл был крупным авиационным инженером и возглавлял фирму McDonnell Aircraft. Инженерами были и два его старших брата. Это повлияло на выбор Д. Форни профессии. Он закончил престижную школу и поступил в Принстонский университет, в котором получил глубокое базовое образование. Форни изучал философию, архитектуру, социологию, литературу, физику и математику. Университет он окончил в 1961 г. и получил степень бакалавра. Дальнейшее образование



продолжил в Массачусетском технологическом институте (МТИ), в котором, получив серьезную инженерную подготовку, в 1963 г. стал магистром, а в 1965 г. — доктором наук в области электротехники. В МТИ он познакомился с теорией информации и квантовой механикой.

В том же году Форни стал сотрудником фирмы «Codex Corporation», которая по правительственным заказам разрабатывала высокоскоростные модемы и эффективные кодеры и декодеры. В фирме он занялся разработкой декодеров сверточных кодов, исправляющих пакеты ошибок. В первой же разработке, в которой он принял участие, ему удалось существенно упростить разрабатываемый в то время на фирме пороговый декодер сверточного кода. В течение первых двух лет работы на фирме он занимался разработкой по заказу Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (НАСА) кодеров для космических аппаратов «Пионер», запускаемых для исследования дальнего космоса. Спроектированный им кодек включал пороговый декодер и работал на скорости 512 бит/с. Этот кодек давал энергетический выигрыш, равный 3 дБ, что позволило увеличить дальность связи с аппаратами «Пионер» в 1,4 раза.

Следующей крупной разработкой Д. Форни стал работающий на скорости 5 Мбит/с последовательный декодер, созданный по заказу Оборонного агентства США по связи. Простота и высокая скорость этого декодера достигалась за счет использования алгоритма декодирования Фано. В 1968 г. под руководством Д. Форни в фирме Codex был разработан первый в мире однополосный модем на скорость 9600 бит/с, который, хотя и не нашел применения в военной технике связи, однако стал выпускаться как коммерческая продукция. Разработка модема нового поколения, в котором использовалась квадратурно-амплитудная модуляция, была начата Д. Форни в 1969 г. В 1970 г. был выпущен модем на скорость 4800 бит/с. Эта продукция также имела коммерческий успех. Через год этот модем был усовершенствован и мог работать на скорости 9600 бит/с. Под руководством Д. Форни на фирме были созданы модемы, в которых использовались решетчатые коды. Совершенство принятых в этих модемах технических решений предопределило то, что в начале 80-х годов их спецификации были приняты в качестве международных стандартов Международным союзом электросвязи.

В фирме Д. Форни быстро продвигался по служебной лестнице и через пять лет стал ее вице-президентом и директором. В 1975 г., когда произошла реорганизация фирмы, он возглавил инновационное направление в ее деятельности. В его обязанности входили научные исследования, разработка и планирование выпуска оборудования, а также стратегический маркетинг.

В 1982 г. «Codex Corporation» вошла в состав фирмы «Motorola», одной из крупнейших в мире фирм — производителей современного оборудования связи. Д. Форни стал ее вице-президентом и директором департамента информационных систем. В круг его обязанностей входило внедрение современных технологий и планирование разработок новых систем передачи данных. С 1986 г. он был ответственным за техническую политику фирмы «Моторола» в создании новой техники. В 1999 г. Д. Форни оставил свой пост в этой фирме и в настоящее время преподает в МТИ, читая курс лекций «Принципы цифровой связи».

Д. Форни выполнил ряд основополагающих теоретических работ в области теории кодирования. Его интерес к этой области появился после того, как он принял участие в проводимом К. Шенноном в МТИ семинаре «Вопросы теории информации». В лекциях

К. Шеннона теория информации связывалась с основами термодинамики, которые Д. Форни были хорошо известны еще с Принстонского университета. После этих лекций он решил приступить к подготовке докторской диссертации в этой области, и профессор Дж. Возенкрафт предложил ему исследовать кодирование сообщений с помощью каскадных кодов.

На основе результатов докторской диссертации была написана книга «Каскадные коды», вышедшая в 1966 г. в издательстве МТИ, а в 1970 г. изданная на русском языке издательством «Мир».

В своей диссертации Д. Форни исследовал коды БЧХ и Рида—Соломона, исправляющие стирания и ошибки, возникающие при приеме символов, и разработал методы декодирования таких кодов. Он ввел важное понятие минимального обобщенного расстояния, которое позволяло использовать информацию о коэффициентах правдоподобия при алгебраическом декодировании таких кодов.

Основной результат его монографии состоял в достаточно простом методе построения каскадного кода, который предусматривал применение внутреннего кода, декодируемого по методу максимального правдоподобия, и внешнего кода Рида—Соломона, декодируемого по критерию минимума обобщенного расстояния.

В диссертации было показано, как добиться экспоненциального уменьшения вероятности ошибочного приема с увеличением длины кода при полиномиальном законе возрастания сложности декодирования.

Важный вклад внес Д. Форни в теорию сверточных кодов, применив для их алгебраической структуры методы уравнений состояния, введенные Р.Е. Калманом в теорию оптимальной линейной фильтрации гауссовских сигналов. Им были получены также новые результаты по декодированию таких кодов методом максимального правдоподобия и методом последовательного декодирования. Он был одним из первых, кто развил подход к передаче сообщений, исследуя совместно осуществляемые процессы модуляции и кодирования сообщений. Такой подход позволял повысить эффективность систем передачи данных в каналах с межсимвольной интерференцией и приблизиться к пределу, который был определен теорией информации. Профессор Д. Форни продолжает активно разрабатывать современные научные проблемы теории кодирования.

Работая в крупных фирмах, занимающихся производством нового оборудования передачи данных, Д. Форни продолжал активную преподавательскую и общественную деятельность. В 1972, 1973 и 1990 гг. он преподавал в Стэнфордском университете, а с 1978 г. по настоящее время с перерывами — в МТИ.

Значительную роль играл Д. Форни и в Институте инженеров по электротехнике и электронике (IEEE), почетным членом которого он был избран в 1973 г. С 1970 по 1973 г. был редактором пользующегося мировой известностью журнала IEEE Trans. on Information Theory. В 1970—1976 гг. и 1986—1994 гг. входил в состав совета Секции теории информации IEEE, а в 1992 г. был президентом этой секции.

Профессор Д. Форни — с 1983 г. член Национальной инженерной академии США, награжден многими наградами IEEE (премией Б. Томпсона — 1972 г., премией Д. Финка — 1990 г., премией Шеннона — 1990 г., медалью Эдисона — 1992 г., премией Секции теории информации IEEE — 1995 г., международными премиями за развитие технологий передачи данных Х. Колумба — 1996 г. и Г. Маркони — 1997 г.) С 1994 г. он почетный член Российского научного общества радиотехники и электроники им. А.С. Попова.

5.7. Турбокоды

В 1993 г. группой французских ученых во главе с К. Берру был разработан новый класс параллельно-каскадных кодов, которые назвали турбокодами [41]. Турбокод можно рассматривать как блочный код с очень большой длиной. На рис. 4.13 показана схема кодека турбокода. Поступающая на его вход последовательность информационных символов группируется в пакеты, которые поступают на первый выход кодека и на входы параллельных каналов. В каждом канале формируется последовательность проверочных символов. Таких каналов в турбокодеке может быть два или три. В них установлен перемежитель, осуществляющий по определенному закону перестановку информационных символов в пакете. Пакеты, в которых осуществлена перестановка символов, поступают на кодеры. В качестве компонентов турбокода могут использоваться коды Хэмминга, БЧХ, Рида—Соломона и др.

Информационные символы поступают на выход 1, а на выходах 2 и 3 кодеров формируются блоки проверочных символов. Последовательности, действующие на выходах 1, 2, и 3, мультиплексируются, и единый цифровой поток поступает на модем, а затем передается в канал связи. На рис. 4.14 показана одна ступень турбокодера. После демодуляции пришедшего по каналу связи сигнала и демультимплексирования принятой цифровой последовательности на выходы 1, 2 и 3 декодера поступают (возможно, с ошибками) блоки информационных и проверочных символов, сформированных на входах мультиплексора кодера.

В первом декодере после декодирования информационной и первой проверочной последовательности получают начальную оценку информационной последовательности, которая во втором декодере используется для декодирования второй проверочной последовательности.

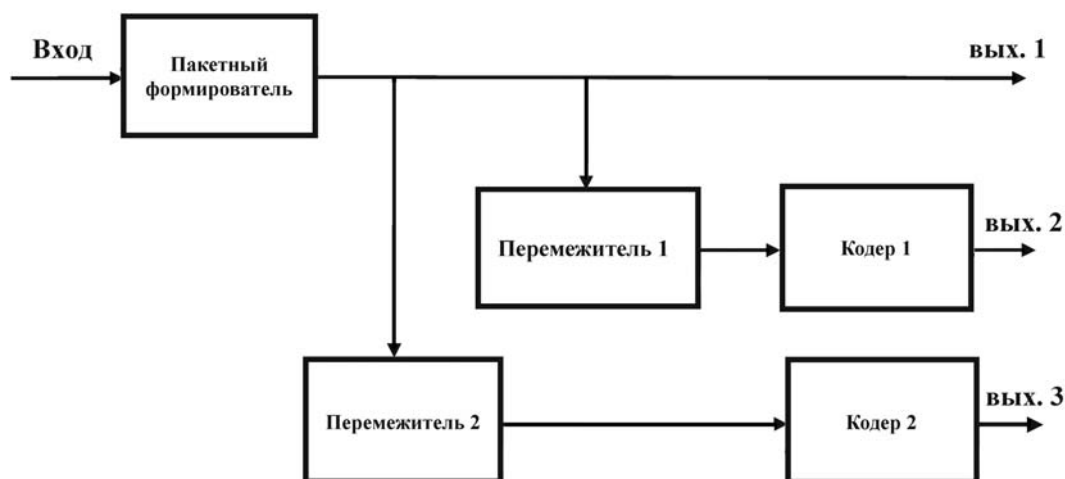


Рис. 4.13

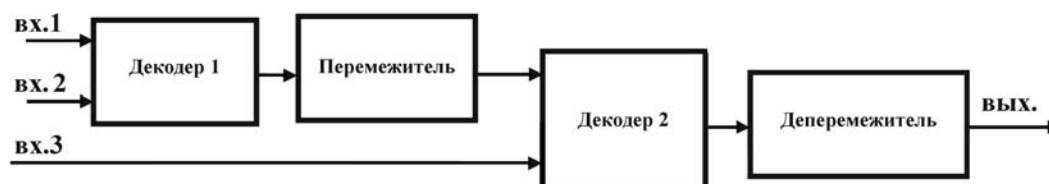


Рис. 4.14

Качество декодирования можно существенно улучшить при проведении нескольких итераций декодирования одного и того же блока информационных символов с последовательной обработкой в нескольких физических декодерах. Однако оптимальные результаты получаются в итеративном декодере с обратной связью, в котором обработанные данные с выхода декодера подаются снова на его вход.

Данный метод кодирования — один из перспективных. Применение турбокодов при заданной длине блока кодируемых данных позволяет получить помехоустойчивость приема сообщений, наиболее близкую к тому пределу, который определен теорией Шеннона. В последнее десятилетие этот вид кодирования интенсивно развивается и находит все более широкое применение.

5.8. Прием в целом

Сердцем любой цифровой системы связи является аналоговый канал. Цифровая система связи для такого канала включает модулятор/демодулятор (модем), преобразующий аналоговый канал в дискретный так, чтобы можно было использовать кодер/декодер (кодек). Наименьшую вероятность ошибки можно получить, вычисляя в демодуляторе расстояния между принятым сигналом и всеми возможными кодовыми комбинациями. Решение принимается в пользу той кодовой комбинации, которая находится на минимальном расстоянии от принятого сигнала. Однако при этом для кодов большой длины и с огромным числом кодовых комбинаций сложность демодулятора столь сильно возрастает, что его практическая реализация становится невозможной. Поэтому использование кодов дает наилучшие результаты при разумном согласовании модема и кодека. Это возможно, если в демодуляторе принимается мягкое решение о принимаемом символе и декодер получает дополнительную информацию, характеризующую надежность решения, принятого в демодуляторе. Методы приема сигналов, основанные на мягком решении о принимаемых символах сообщения, называются приемом в целом.

Идеи применения мягкого решения в демодуляторе для декодирования кодовых комбинаций зародились почти с возникновения теории кодирования. Первой работой в этом направлении можно считать исследование помехоустойчивости приема кода Вагнера с мягким решением, проведенное в 1954 г. американскими учеными Р. Сильверманом и М. Болсером [42]. Этот код содержит всего один избыточный двоичный символ для проверки информационных символов на четность. На приеме принимается жесткое решение о значениях всех принятых символов и, кроме того, дополнительно определяется наименее надежный из них. Этот символ при декодировании изменя-

ется на противоположный в том случае, если проверка принятой кодовой комбинации на четность не выполняется. При наличии всего одного проверочного символа в кодовой комбинации такой алгоритм декодирования позволял корректировать в ней одиночные ошибки. Позже ими же было рассмотрено декодирование кодов Хэмминга при использовании мягкого решения по каждому из принимаемых символов.

Одной из простейших разновидностей методов декодирования, которая позволяет учесть надежность принятия решений в демодуляторе, является стирание тех символов, надежные решения для которых не могут быть приняты. При этом декодер извещается о тех позициях кода, на которых находятся стертые символы. Впервые такой подход к декодированию предложил в 1954 г. *П. Элайс* [38]. Для декодирования блочных кодов, содержащих стертые символы, а также и ошибочные, могут быть применены, в частности, алгебраические методы декодирования, предложенные в 1958 г. М.А. Эпштейном [43]. Эта идея была позже в обобщенном виде применена к декодированию кодов БЧХ в канале со стираниями ненадежно принятых символов.

В конце 60-х и начале 70-х гг. были проведены многочисленные исследования, направленные на разработку методов приема сигналов в целом. При этом в приемном устройстве решение о приеме той или иной кодовой комбинации принимается по методу максимального правдоподобия, т.е. при декодировании ведется поиск такой кодовой комбинации, которая находится на наименьшем евклидовом расстоянии от принятого сигнала. Учет структуры кода позволял существенно упростить вычисления этого расстояния.

Для блочных кодов в начале 70-х гг. американскими учеными Е. Велдоном [44] и Д. Чейзом [45] были предложены простые алгоритмы декодирования, использующие мягкое решение демодулятора и позволяющие приблизиться к решению по максимуму правдоподобия. Идея алгоритма Чейза проста — при приеме одной из кодовых комбинаций кода, способного исправлять t ошибок, демодулятор определял в ней t наименее надежных символов. Количество возможных конфигураций ошибок на ненадежных позициях равно 2^t . В принятой комбинации на этих позициях для всех возможных конфигураций ошибок осуществляется изменение информационных символов, стоящих на ненадежных позициях, и формируется новое кодовое слово. Для этого слова определяется его расстояние от принятой кодовой комбинации. Декодирование состоит в определении информационных символов того нового кодового слова, которое наиболее близко расположено к принятой комбинации.

Вопросы использования мягкого решения для кодов с пороговым декодированием исследовались в США Дж. Л. Мессе [20] и несколько позже в СССР Б.Д. Каганом и **Л.М. Финком** [46, 47].

Мягкое решение в демодуляторе для сверточных кодов позволяет без существенного усложнения декодера повысить помехоустойчивость приема информации, используя алгоритм **Витерби** или алгоритм последовательного декодирования. При этом расстояние между принятой и возможными последовательностями символов определяется с учетом их веса, который пропорционален надежности их приема.

С 80-х гг. появилось новое научное направление — разработка и анализ помехоустойчивости приема специально построенных сигналов, названных сигнально-кодowymi конструкциями. Это направление представляет собой синтез методов модуляции, кодирования и их оптимального приема и позволяет создавать системы связи, в

которых по каналу связи с ограниченной полосой частот можно передавать информацию с качеством, приближающимся к потенциальному пределу, определяемому положениями теорий **Котельникова** и **Шеннона**.

В 1982 г. в результате теоретических исследований американского ученого Г. Унгербоэка была создана решетчатая кодовая модуляция (РКМ) [48]. Этот вид модуляции основывается на сочетании многопозиционных сигналов и помехоустойчивых кодов. При этом ансамбль многопозиционных сигналов, содержащий $M = 2^n$ сигналов, разбивается на $K = 2^{k+1}$ вложенных подансамблей с монотонно возрастающими расстояниями. В качестве сигналов используются многопозиционная ФМ и КАМ. Информационная последовательность символов преобразуется в кодовую с помощью сверточного кода, который применяется при кодировании k из n информационных символов, причем сверточный код имеет скорость $k/(k + 1)$ и вводит однобитовую избыточность. Кодированные биты определяют подансамбль, а некодированные — конкретную сигнальную точку в этом выбранном подансамбле. Для оптимального приема сигналов РКМ используют метод максимального правдоподобия, реализуемый в виде алгоритма Витерби. Применение РКМ позволяет (при заданных скорости передачи сигналов и вероятности ошибочного приема) уменьшить необходимые энергетика линии и полосу частот. Этот вид модуляции находит применение на магистральных высокоскоростных линиях радиорелейной и спутниковой связи.

В [49] приведены важные результаты исследований помехоустойчивости различных методов приема сигнально-кодовых конструкций в гауссовском канале связи, полученные отечественными учеными (С.Л. Портной, В.В. Зяблов, В.В. Гинзбург и В.Л. Банкет).

При создании конкретных систем, как правило, используется не один метод кодирования, а их комбинация, позволяющая, с одной стороны, построить коды, которые имеют простой алгоритм декодирования, а с другой — при заданной скорости передачи обеспечить высокую помехоустойчивость приема сигналов, близкую к границе, установленной теорией информации.

5.9. Возможности исправления ошибок с помощью линейных кодов

Знание предельных ограничений на возможности исправления ошибок корректирующими кодами очень важно. Это позволяет при разработке разных систем обработки сигналов судить о потенциальной помехоустойчивости, которую можно достичь, выбирая должным образом параметры применяемых кодов. Исследования в данном направлении начались сразу же с появлением первых работ по теории кодирования. Исправляющая способность для блочных кодов тесно связана с такими его параметрами, как длина кодовой комбинации n , число информационных символов в ней k (или относительная скорость передачи информации $R = k/n$) и минимальное расстояние между разными кодовыми комбинациями $d = 2t + 1$, где t — число ошибок, исправляемых кодом.

Подобные ограничения сверху или снизу имеют соответственно вид $R \leq F(t/n)$ или $R \geq F(t/n)$. Поиск таких ограничений отечественными и зарубежными учеными велся в течение почти двух десятилетий. Верхняя граница **Хэмминга**, приведенная в 1950 г. им в работе [3], имеет следующий вид:

$$(n - k) \geq \log_2 [1 + C_n^1 + C_n^2 + C_n^3 + \dots + C_n^t].$$

Здесь C_n^i — биномиальный коэффициент.

Позже, в начале 50-х гг., независимо Р.Р. Варшамовым [50] и Е.Н. Гильбертом [51] была получена нижняя граница, которая носит имя этих ученых:

$$(n-k) \leq \log_2 [1 + C_n^1 + C_n^2 + C_n^3 + \dots + C_n^{2t-1}].$$

В 1960 г. М. Плоткиным была получена новая простая верхняя граница [52]:

$$(n-k) \geq 2d - 2 - \log_2 d.$$

Еще одна важная верхняя граница для R была получена **П. Элайсом**. Для больших значений n она имеет вид:

$$2(t_h/n)(1 - t_h/n) \geq d/n,$$

где t_h — является корнем уравнения $1 - k/n = -(t_h/n) \log_2(t_h/n) - (1 - t_h/n) \log_2(1 - t_h/n)$.

Границы Хэмминга, Плоткина и Элайса показывают, насколько большим может быть кодовое расстояние для кода с заданной длиной и скоростью передачи. Граница Варшамова — Гильберта является границей существования и дает нижнюю оценку кодового расстояния для «наилучшего» кода. Используя эти границы, нетрудно найти, в частности, оценку вероятности ошибки при декодировании двоичного кода, у которого вероятность ошибки при приеме одного символа равна p , а минимальное расстояние между кодовыми комбинациями $d = 2t + 1$:

$$P_{ош} = 1 - \sum_{i=0}^t C_n^i p^i (1-p)^{n-i}.$$

Приведенные выше ограничения исправляющей способности блочных кодов были в последующем обобщены рядом ученых для случаев, в которых используются символы с произвольным основанием q . Подобные ограничения были установлены также и для сверточных кодов.

5.10. Применение теории кодирования

Более чем за 50 лет после создания теории информации коды, корректирующие ошибки, нашли широкое применение в разных областях техники. Сегодня разработанные методы кодирования образуют обширный раздел теории информации, основанный на математическом аппарате теории групп, теории чисел, конечных проективных геометрий и т.п. Кодирование широко используется не только в электросвязи, но и для коррекции ошибок, возникающих в цифровых вычислительных машинах. Коды применяют в системах записи сигналов на магнитную ленту или на другие носители, а также в разных областях техники, связанных с запоминанием и обработкой данных. Алгоритмы кодирования и декодирования достаточно мощных кодов весьма сложны. И хотя эффективные коды были разработаны довольно давно, в 50–60-е гг. XX в., они не находили широкого применения из-за сложности технической реализации устройств кодирования и декодирования. Однако с 60-х гг. в связи с бурным развитием микроэлектроники стоимость цифровой аппаратуры стала резко уменьшаться. Кроме того, были предложены эффективные и достаточно просто реализуемые алгоритмы кодирования и декодирования данных. В связи с этим началось широкое внедрение результатов, полу-

ченных учеными в течение нескольких предшествовавших десятилетий. Конечно, повышение помехоустойчивости приема сигналов может быть получено не за счет кодирования, а простым повышением мощности передаваемого сигнала. Однако во многих случаях, например в спутниковой и космической связи, кодирование информации — наиболее эффективный метод достижения высокой помехоустойчивости приема сигналов, так как стоимость повышения на 1 дБ энергетики в спутниковых линиях связи оценивается суммой более миллиона долларов. Кодирование в настоящее время применяется в модемах, предназначенных для передачи данных по телефонным линиям связи, в системах сотовой подвижной связи, в спутниковой связи, в современных системах цифрового звукового и телевизионного вещания. Международный союз электросвязи выпустил ряд рекомендаций по применению кодов в разных системах связи. Теория кодирования, опирающаяся на глубокие теоретические идеи, выдвинутые более полувека назад **К. Шенноном**, и развитая многими учеными разных стран мира, стала основой создания многих современных информационных систем.

§ 6. Системы с обратной связью

Большинство линий связи являются двухсторонними. Это позволяет создавать системы с обратной связью (**ОС**), в которых по обратному каналу могут быть запрошены для повторения те блоки сообщений, которые были приняты по прямому каналу с недостаточно высоким качеством. Такие системы полезны не только для повышения помехоустойчивости приема сообщений по линиям связи с фиксированной скоростью передачи данных, но и для повышения скорости передачи данных в условиях, когда затухание сигналов в линии связи подвержено сильным колебаниям. Подобные условия возможны, например, в радиосистемах, в которых принимаемый сигнал замирает. Кроме того, они характерны для радиоприемных систем, использующих механизмы распространения радиоволн за счет рассеяния на естественных неоднородностях электронной плотности ионосферы либо на ионизированных следах в ионосфере, возникающих при падении метеоритов на Землю. Когда уровень полезного сигнала на приеме становится незначителен, в течение определенных промежутков времени сообщения принимаются с невысокой скоростью. При высоких уровнях принимаемого сигнала скорость передачи информации становится высокой.

Системы с **ОС** и с повторениями по сути являются адаптивными — число повторений в них автоматически поддерживается таким, которое необходимо для надежной связи.

На рис. 4.15 представлены две возможные системы с обратной связью с информационной (**ИОС**) и решающей (**РОС**): **МОД₁** и **МОД₂** — модуляторы, преобразующие сигналы в форму, пригодную для передачи по каналу связи; **Кодер** — кодирующее устройство, формирующее из информационных символов код, позволяющий обнаружить ошибки, возникающие при приеме сигналов; **Декодер** — устройство, обнаруживающее ошибки в принятом сигнале; **РУ** — решающее устройство, осуществляющее демодуляцию принятого сигнала и вынесение решения о принятом символе (0 или 1).

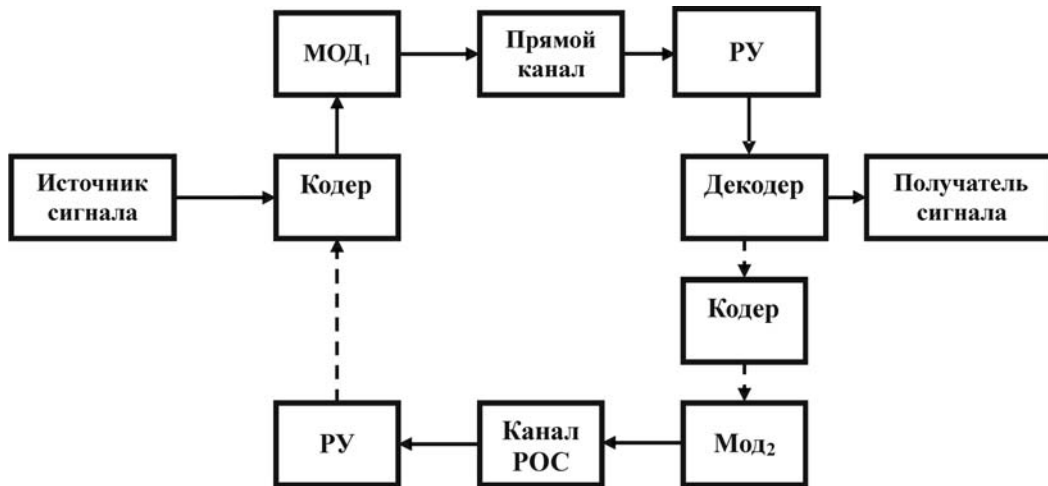


Рис. 4.15

Следует отметить, что еще до появления в 1948 г. статьи **К. Шеннона** инженеры обратили внимание на то, что обратный канал дает возможность достаточно простыми средствами существенно повысить помехоустойчивость приема сигналов.

Систему с решающей обратной связью в отечественной литературе называют также системой с переспросом, а в английской — системой **ARQ** (Automatic Request Queuing). Ее изобретатель Г. Ван Дюрэн в 1947 г. получил американский патент на эту систему [1]. Он был крупным голландским инженером и в течение 22 лет (1948—1970 гг.) являлся председателем 3-й Исследовательской комиссии Международного консультативного комитета по радио, входящего в Международный союз электросвязи (МСЭ). Система Г. Ван Дюрэна была предназначена для передачи телеграфных сигналов в коротковолновом (КВ) диапазоне. В ней применялась частотная манипуляция и специальный семизначный код, содержащий 35 различных кодовых комбинаций, каждая из которых имеет три символа 1 и четыре — 0. Поскольку в диапазоне КВ наиболее вероятны селективные замирания, то ошибки возникают при приеме знаков либо 1, либо 0, которые передавались на разных частотах. При этом в кодовых комбинациях на входе **РУ** нарушается соотношение числа символов 1 и 0. Такие ошибки просто обнаруживать в декодере (**Декодер**). При обнаружении ошибки на передающей конец линии связи посылается сигнал запроса на повторение кодовых комбинаций, принятых с ошибками. В 1951 г. в голландском журнале Г. Ван Дюрэн [1] опубликовал исследование помехоустойчивости предложенной им системы. На английском языке эти результаты были опубликованы только через десять лет [2]. Системы **ARQ** позволяли существенно повысить помехоустойчивость КВ-линий телеграфной связи и начиная с середины 50-х гг. получили широкое распространение во всем мире.

Системы с **ИОС** были изобретены в 1951 г. отечественным ученым З.М. Каневским [3]. В таких системах приемник сигналов играет пассивную роль в решении вопроса о правильности полученного решения. Приемная сторона только информиру-

ет передатчик о том, какое сообщение принято. Передатчик сравнивает переданное сообщение с полученным по обратному каналу и тем или иным способом извещает приемник о результатах сравнения, принимая необходимые меры в случае обнаружения ошибок. В отличие от систем с **РОС** в системах с **ИОС** не требуется кодировать передаваемое сообщение с избыточностью.

Основные проблемы, связанные с системами с **ОС**, которые исследовались учеными и инженерами, в следующем:

- создание эффективных алгоритмов обнаружения ошибочных символов либо кодовых комбинаций, принятых в прямом канале, и их запроса по обратному каналу;
- влияние объема памяти на передаче и приеме в прямом канале, необходимой для организации повторения блоков информации, которые должны быть переданы повторно из-за низкого качества их приема;
- влияние обратного канала на пропускную способность прямого канала;
- определение качества приема (отношение сигнал/шум либо вероятность ошибочного приема) в системах с **ОС**;
- вопросы применения корректирующих кодов в системах с **ОС**.

Теория систем с **ОС** стала интенсивно развиваться учеными разных стран начиная с середины 50-х гг. XX в. В знаменитой работе **К. Шеннона** 1948 г. было показано, что при наличии обратной связи сложные операции кодирования можно существенно упростить. В 1956 г. в другой его работе [4] было отмечено, что канал **ОС** не позволяет в принципе увеличить скорость передачи информации по прямому каналу, если он не обладает памятью. В этом же году была опубликована важная работа С.С. Чанга [5]. В этой и в его последующих работах были сформулированы основополагающие теоремы теории передачи сообщений с **ОС**. В [5] было выполнено исследование ряда алгоритмов обработки переданной по обратному каналу информации, при которых символ, посланный обратно от приемника, сравнивался с переданным символом, и если имелось различие, то этот символ повторялся или использовался какой-либо вид коррекции.

В 1957 г. известный американский ученый **П. Элайс** опубликовал исследование систем с **ИОС** [6]. В его работе было показано, что в системе с **ОС**, работающей в канале с аддитивным «белым» гауссовским шумом и ограниченной полосой частот F , на выходе которого отношение сигнал/шум равно ρ_1 , можно, не применяя сложных методов кодирования, обеспечить после демодуляции принятого сигнала отношение сигнал/шум $\rho_0 = \{\exp(\rho_1) - 1\}$. Таким образом, при $\rho_1 = 10$ дБ на выходе демодулятора получаем $\rho_0 = 43,5$ дБ, т.е. выигрыш за счет использования **ОС** значителен и превышает 30 дБ.

Ученые исследовали разные способы обнаружения тех символов, которые не могут быть на приеме определены достоверно. Одним из простейших способов является использование в прямом канале при приеме двоичных сигналов двух порогов вместо одного. Для тех символов, которые попадают в зону «стирания», т.е. по которым невозможно с высокой вероятностью принять на приеме правильное решение, в выходной последовательности появляется пробел («бланк»). В работе [7] рассмотрено несколько случаев, когда передатчик извещается о каждом «пробеле» и через канал **ОС** запрашивается повторение «стертых» символов.

Исследованию фундаментальных вопросов о влиянии **ОС** на пропускную способность прямого канала связи посвящены работы отечественных и зарубежных ученых. Отечественные ученые **Р.Л. Добрушин**, И.А. Овсеевич, **М.С. Пинскер** и А.Г. Дьячков провели исследования потенциальных возможностей получения высокого качества приема аналоговых и цифровых сигналов в системах с **ОС** [8–11]. Ими было установлено, что в каналах без памяти применение **ОС** не позволяет увеличить пропускную способность прямого канала связи, однако пропускная способность прямого канала связи с памятью может быть увеличена, но не более чем в два раза. Был предложен ряд конструктивных способов реализации систем **ARQ** [12–14], в которых с применением достаточно простых методов кодирования и декодирования достигалась высокая надежность передачи сообщений в прямом канале.

Первая в мире книга, посвященная системам с **РОС**, была написана профессором Э.Л. Блохом [15] и издана в 1963 г. В ней были обобщены многие научные результаты, полученные в этой области к тому времени. Были исследованы системы с **РОС** с неограниченным и ограниченным повторением в каналах без памяти, системы последовательного приема с памятью. В ней подробно рассмотрен важный вопрос о применении в таких системах корректирующих кодов. Профессором З.М. Каневским и под его редакцией в 1969 и 1976 гг. были опубликованы две книги [16, 17], специально посвященные вопросам построения систем с **РОС** и **ИОС**, а также методам анализа их характеристик при передаче как аналоговых, так и цифровых сообщений. Отечественные ученые В.И. Коржик и **Л.М. Финк** также провели важные исследования систем с **ОС** [18]. Ими был предложен универсальный метод кодирования для систем с **РОС** и дан анализ эффективности нескольких алгоритмов функционирования подобных систем.

Системы **ARQ** нашли практическое применение в системах метеорной связи, которые создавались как в нашей стране [19], так и за рубежом [20]. В таких системах используется прерывистый режим передачи сообщений, т.е. передача информации осуществляется лишь в те периоды времени, когда коэффициент передачи канала достаточно велик. Отечественным ученым **В.С. Мельниковым** была выполнена одна из первых и немногих теоретических работ [21], в которых рассматривались вопросы приема сигналов в радиосистеме с **ОС** при прерывистой связи. Им было показано, что при рэлеевских замираниях введение прерывистой связи позволяет весьма существенно увеличить пропускную способность канала. Подобные же задачи решались уже в 70-х гг. применительно к тропосферным многоканальным системам связи. Системы с **ОС** используются в системах спутниковой связи и высокоскоростных радиосетях передачи данных [22, 23].

Протоколы **ARQ** используют в современных сетях связи, имеющих сложную архитектуру. Они широко применяются, в частности, в пакетных радиосетях с множественным доступом, а также в сетях, имеющих кольцевую конфигурацию. Результаты исследований построения таких сетей, полученные в 80-е гг. XX в., освещены в книге известных американских ученых Д. Бертсекаса и **Р. Галлагера** [24], изданной в 1987 г. Активные исследования систем **ARQ** продолжаются и в настоящее время [25].

§ 7. Развитие теории информации для сетей связи с многими пользователями

Введение

В 1961 г. **К. Шеннон** выступил на симпозиуме с докладом «Двухнаправленные каналы связи» по проблемам математической статистики и теории вероятностей [1]. Эта была первая работа за последние десятилетия XX в., в которой обозначены проблемы передачи информации в сетях связи с многими пользователями.

Одно из направлений касается систем связи с многостанционным доступом, в которых от нескольких источников сообщений осуществляется передача к одному приемнику информации, другое — исследования широковещательных сетей, в которых один источник сообщений одновременно осуществляет передачу нескольким приемникам информации, третье — относится к передаче данных от одного передатчика к одному приемнику. Однако в отличие от традиционной схемы передачи, которая начиная с 1948 г. исследовалась К. Шенноном и многочисленными его последователями, в данном случае предполагается, что сообщение на приемник поступает через несколько ретрансляторов. И наконец, четвертое направление касается проблем передачи сообщений несколькими независимыми пользователями по каналам связи, между которыми имеются переходные помехи. Последняя проблема связана, в частности, с обеспечением электромагнитной совместимости (ЭМС) различных систем радиорелейной связи.

Результаты исследований, полученных за последние десятилетия в указанных направлениях, представлены в обзорных статьях [2–6].

7.1. Сети связи с многостанционным доступом

На рис. 4.16 в качестве примера показана сеть многостанционного доступа, в которой M земных станций одновременно передают сообщения на один спутник. Теоретические вопросы, возникающие при исследовании таких сетей, состоят в следующем:

Какая скорость передачи информации достижима в данной системе?

Увеличивается ли общее количество информации, передаваемое в данной системе, с увеличением числа земных станций M или оно ограничено взаимными помехами между станциями?

Как должны меняться методы передачи сообщений с изменением M ?

В настоящее время ответы на эти вопросы получены в работах ряда ученых. В 1971 и 1972 гг. в результате исследований Р. Алеведе [7] и Г. Лайо [8] были установлены основные ограничения на скорость передачи сообщений от M пользователей на приемную станцию.

Особенно простой вид эти ограничения имеют, когда передача сообщений от пользователей осуществляется по гауссовскому каналу связи. В этом случае на входе приемной станции действует сигнал

$$Y(t) = \sum_{i=1}^M Y_i(t) + n(t),$$

где $Y_i(t)$ — сообщения, передаваемые отдельными пользователями, $n(t)$ — «белый» гауссовский шум. Проведенные исследования показали, что скорости передачи сообщений пользователями ограничены следующими условиями:

$$R_i < C(P/N); R_i + R_j < C(2P/N);$$

$$R_i + R_j + R_k < C(3P/N); \dots \sum_{i=1}^M R_i < C(MP/N).$$

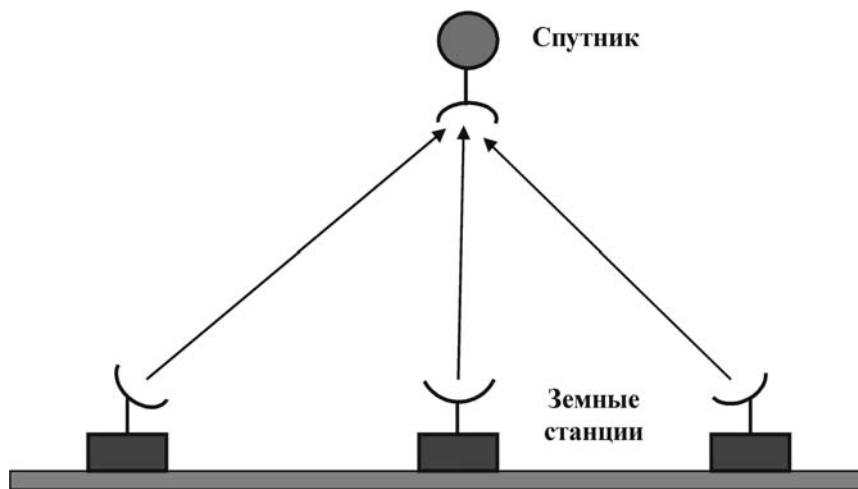


Рис. 4.16

Здесь $C(P/N) = (1/2) \ln(1 + P/N)$ — формула, определяющая пропускную способность гауссовского канала, на выходе которого отношение сигнал/шум равно P/N . Кодирование на каждой передающей станции осуществляется независимо, а для декодирования сигнала $Y(t)$ на приемной станции используется метод максимального правдоподобия. Исследования показали, что в данной системе за счет применения достаточно длинных кодов может быть достигнута сколь угодно малая вероятность ошибочного приема переданных каждой станцией сигналов, если соблюдаются указанные выше ограничения на R_i .

Выполненные в 1980–1997 гг. исследования отечественных ученых Л.А. Бассалыго, **М.С. Пинскера**, В.В. Прелова [9], Л. Вильгельмсона и К.Ш. Зигангирова [10] позволили определить пропускную способность различных видов каналов связи с многостанционным доступом.

7.2. Широковещательные сети связи

Американский ученый Т.М. Ковер был первым, кто выполнил в 1972 г. исследования вопросов передачи сообщений в широковещательных системах связи [11]. В таких сетях в общем кодере осуществляется кодирование нескольких независимых источников информации и формируется общий сигнал, посылаемый каждому

из M приемников. В этом сигнале содержатся сообщения, передаваемые от каждого источника каждому абоненту сети. На рис. 4.17 в качестве примера показана спутниковая ширококвещательная сеть связи. В настоящее время полученные результаты не имеют столь общего характера по сравнению с теми, о которых шла речь выше. Они справедливы только для сетей, в которых имеются лишь два приемника ($M = 2$).

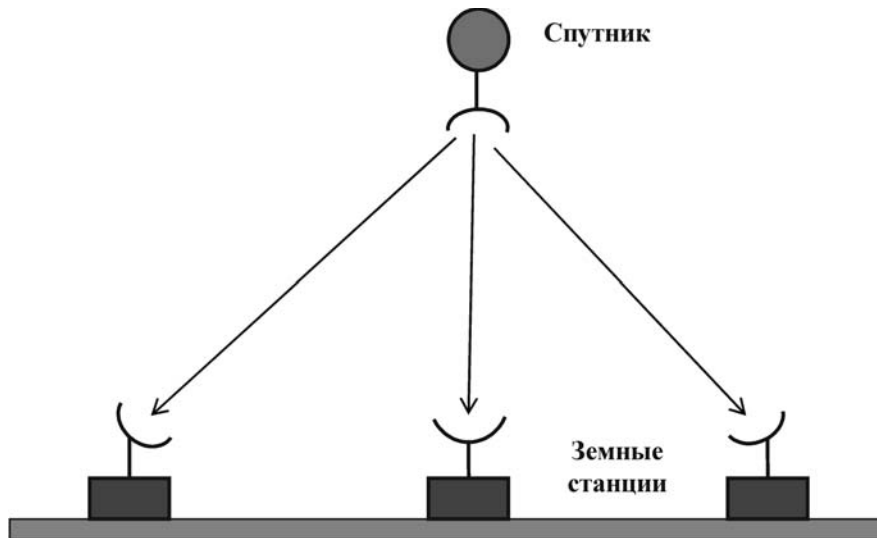


Рис. 4.17

Наиболее простой вид ограничения на скорость передачи сообщений каждому из абонентов принимают в том случае, когда информация передается по гауссовскому каналу. В данном случае сигнал, посылаемый абонентам, имеет вид:

$$Y(t) = \sum_{i=1}^2 Y_i(t).$$

На входы приемников поступают сигналы

$$U_1(t) = Y(t) + n_1(t) \text{ и } U_2(t) = Y(t) + n_2(t),$$

где $n_1(t)$ и $n_2(t)$ — гауссовские шумы мощностью N_1 и N_2 (для определенности предполагается, что $N_1 < N_2$).

Для декодирования сигнала используют два приемника. Один из них (второй), на входе которого действует шум большей мощности, осуществляет декодирование сообщения $Y_2(t)$ по методу максимума правдоподобия. При этом сигнал $Y_1(t)$ воздействует на прием сигнала $Y_2(t)$ как шум мощностью αP , и отношение сигнал/шум на входе этого приемника равно $\beta P / \alpha P + N_2$. Первый приемник также в начале декодирует сигнал $Y_2(t)$, а затем формирует его точную копию $\hat{Y}_2(t)$, которая вычитается из принятого сигнала $U_1(t)$. Таким образом, для демодуляции по методу

максимального правдоподобия сигнала $Y_1(t)$ используется сигнал $[U_1(t) - Y_2(t)] = Y_1(t) + n_1(t)$. На входе декодера этого сигнала отношение сигнал/шум равно $\alpha P/N_1$.

В рассматриваемом случае ограничения на скорость передачи данных от абонентов сети имеют следующий вид:

$$R_1 < C(\alpha P/N_1); R_2 < C(\beta P/P + N_2).$$

Здесь параметр $0 < \alpha < 1$ выбирают произвольно, $\beta = 1 - \alpha$, P — полная мощность принятого сигнала $Y(t)$. Выбор значения α определяет скорость передачи информации для каждого из абонентов сети. Мощность, затрачиваемая на передачу сигналов для первого абонента, составляет αP , а для второго — $(1 - \alpha)P$.

Отечественными учеными С.И. Гельфандом, **М.С. Пинскером** и Г.Ш. Полтыревым в середине 70-х гг. были разработаны методы определения пропускной способности широкополосных каналов связи [12–14].

7.3. Сети связи с ретрансляцией сигнала

В том случае, если затухание сигнала на линии связи между станциями 1 и 3 значительно, то передача данных с высокой надежностью возможна только при использовании ретрансляторов. На рис. 4.18 показана одна из возможных схем сети связи, в которой для передачи данных от станции 1 в 3 применяется промежуточная станция 2 на Земле и две — на спутниках-ретрансляторах.

Ретрансляция сигналов уже давно широко используется во многих системах связи (в радиорелейных, спутниковых и т.п.). Особенностью всех таких систем является то,

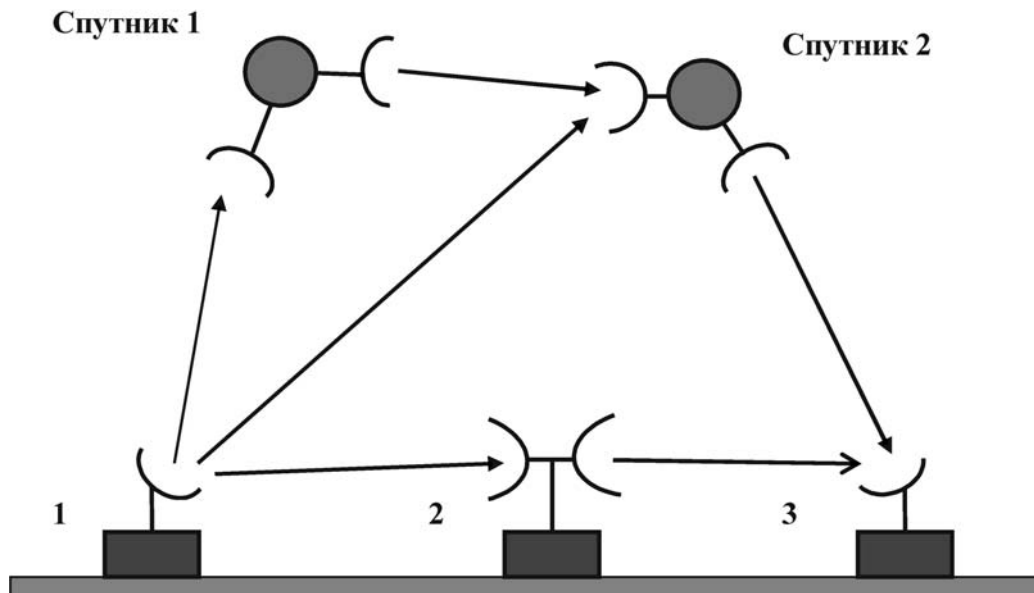


Рис. 4.18

что переданный станцией 1 сигнал принимается станцией 2, а затем ретранслируется на станцию 3 в том же виде, в котором он передан станцией 1.

В теории информации первое исследование сетей связи с использованием ретрансляции было выполнено голландским ученым Е. Ван дер Мейленом [15]. Им было установлено, что в некоторых случаях более эффективным методом передачи сигналов является последовательная передача сигнала вначале только на станцию 2, а затем обе станции 1 и 2 осуществляют совместно передачу сигналов на станцию 3.

Было установлено, в частности, что в случае, когда имеется только один ретранслятор и каналы, связывающие пункты 1, 2 и 3, являются гауссовскими, то пропускная способность канала связи $1 \rightarrow 3$ определяется формулой:

$$C = \max \left\{ C \left[\frac{P_1 + P_2 + 2\sqrt{\beta P_1 P_2}}{N_1 + N_2} \right], C(\alpha P_1 / N_1) \right\},$$

$$0 \leq \alpha \leq 1.$$

Здесь N_1 — мощность шума на входе приемника станции 2, а $(N_1 + N_2)$ — мощность шума на входе приемника станции 3, $\beta = (1 - \alpha)$. В том случае, если $P_2/N_2 \geq P_1/N_1$, то $C = C(P_1/N_1)$, в то время как в отсутствие ретранслятора пропускная способность составляла бы $C = C[P_1/(N_1 + N_2)]$. При этом $C(P_1/N_1) \gg C[P_1/(N_1 + N_2)]$, при условии, что $(N_1 + N_2) \gg N_1$, т.е. применение ретрансляции сигналов может существенно повысить пропускную способность канала связи $1 \rightarrow 3$.

7.4. Каналы связи с переходными помехами

В 5.1 (глава 3) излагалась история развития теории оптимального приема сигналов, когда возможно возникновение взаимных помех между независимо работающими линиями связи. Там же отмечалось, что такие условия приема характерны для систем радиорелейной и спутниковой связи, и рассмотрены результаты исследований по синтезу оптимальных компенсаторов помех и определению их помехоустойчивости в случаях, когда для передачи сигналов применяются разные виды модуляции.

На рис. 4.19 в качестве примера показано, как подобные помехи могут возникать на промежуточных радиорелейных станциях.

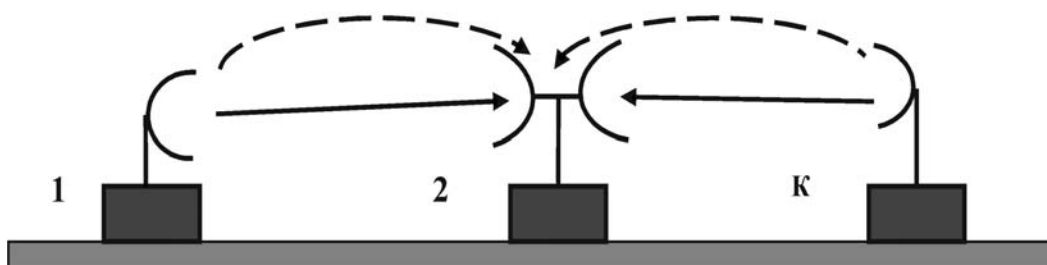


Рис. 4.19

Данная проблема была исследована методами теории информации А. Карлеалом [16] в 1975 г. Определение методами теории информации пропускной способности каналов связи $1 \rightarrow 2$ и $3 \rightarrow 2$ в данном случае является сложной математической задачей. В [3] было показано, что в случае, когда уровень одной из переходных помех весьма значителен, применение кодирования позволяет почти полностью избавиться от влияния переходных помех на качество приема полезных сообщений.

Это достигается за счет надежного декодирования сильного сигнала и формирования точной копии соответствующей ему переходной помехи. Сформированная копия вычитается из принимаемой смеси полезного сигнала и переходной помехи, в результате чего практически исключается влияние помехи на прием полезного сигнала. Данный результат согласуется с теми, которые были получены для этого случая методами оптимального приема сигналов.

Проблема приема сигналов в гауссовских каналах, в которых действуют переходные помехи, была рассмотрена в 1976 г. П. Бергмансом [17].

§ 8. Хронология основных этапов развития теории информации

8.1. Основы теории информации

1. Метод сокращения избыточности телеграфных сообщений (1837 г. — С. Морзе).
2. Первое исследование спектра сигналов с амплитудной модуляцией, показавшее, что в этом спектре имеется не только центральная, но и боковые частоты (1916 г. — М.В. Шулейкин).
3. Первое исследование спектра сигналов с частотной модуляцией (1922 г. — Дж. Р. Карсон).
4. Первые работы по теории связи, в которых были определены ограничения скорости передачи сигналов телеграфии по каналам связи с заданной полосой частот (1924 г. — Г. Найквист, К. Купфмюллер).
5. Введение логарифмической меры информации, содержащейся в сообщении (1928 г. — Р. Харгли).
6. Строгое доказательство теоремы отсчетов (1932 г. — В.А. Котельников; 1948 г. — К. Шеннон).
7. Создание основ теории линейной селекции сигналов (1935 г. — Д.В. Агеев; 1952 г. — Л.А. Заде).
8. Исследования методов передачи дискретных сообщений (1935 г. — В.И. Сифоров).
9. Изобретение вокодера, сокращающего избыточность речевого сигнала (1939 г. — Г. Дадли).
10. Исследования спектров сигналов при импульсных методах модуляции (1946—1948 гг. — Я.Д. Ширман, П.Г. Тагер).
11. Введение в теорию связи понятия комплексного аналитического сигнала, действительная часть которого представляет сам сигнал, разработка теории аналитического сигнала (1946—1983 гг. — Д. Габор, С. Тетельбаум, Л.М. Финк, В.И. Коржик, Д.Е. Вакман, Е. Бедросян и Г.Б. Велкер).

12. Создание теории информации (1948 г. — К. Шеннон).
13. Вывод формулы, определяющей пропускную способность гауссовского канала связи (1948 г. — К. Шеннон, Н. Винер; 1949 г. — В. Таллер).
14. Разработка методов случайного кодирования и вычисления зависимости вероятности ошибки при оптимальном приеме случайно выбранного кода (1950 г. — С.О. Райс; 1955 г. — А. Файнштейн; 1959 г. — К. Шеннон; 1962 г. — Р.Л. Добрушин; 1967 г. — К. Шеннон, Р. Галлагер и Э. Берлекамп).
15. Разработка математически строгих доказательств теорем кодирования для разных моделей дискретных и непрерывных источников сообщений, а также каналов связи и других результатов теории информации, установленных К. Шенноном (1953 г. — Б. МакМилан; 1953 и 1956 гг. — А.Я. Хинчин; 1957 и 1969 гг. — А.Н. Колмогоров; 1958 г. — А. Файнштейн; 1961 г. — Дж. Вольфовиц).
16. Математически строгое обоснование понятия взаимной информации и разработка методов ее вычисления (1956 г. — А.Н. Колмогоров, И.М. Гельфанд и А.М. Яглом; 1961 г. — Р.Л. Добрушин; 1960–1963 гг. — М.С. Пинскер).
17. Разработка методов вычисления ε -энтропии для разных источников сообщения (1956 г. — А.Н. Колмогоров; 1963 и 1994 гг. — М.С. Пинскер; 1965 и 1967 гг. — Т. Дж. Гоблик; 1969 г. — Б.С. Цыбакова; 1987 г. — Л.А. Бассальго, Р.Л. Добрушин; 1970 г. — Т. Бергер и Я. Зив).
18. Вычисления пропускной способности векторных гауссовских каналов, каналов связи с замираниями уровня принимаемого сигнала, асинхронного канала связи с синхросимволом, каналов связи с памятью, с негауссовским шумом, каналы с выпадением символов (1958 г. — Л.П. Цареградский; 1963–1968 гг. — И.А. Овсеевич; 1965 и 1970 г. — Б.С. Цыбаков; 1969 г. — Р.Л. Добрушин и М.С. Пинскер; 1966–1993 гг. — В.В. Прелов).
19. Разработка проблем теории информации с привлечением положений статистической термодинамики и теории оптимальных статистических решений, создание теории ценности хартлиевского, больцмановского и шенноновского количеств информации (1965–1975 гг. — Р.Л. Стратонович).

8.2. Теория кодирования источников сообщений

8.2.1. Кодирование дискретных источников сообщений

1. Создание субоптимального алгоритма построения неравномерного кода (1948 г. — К. Шеннон, Р. Фано).
2. Доказательство теоремы, определяющей условия, которым должны удовлетворять длины кодовых комбинаций, для однозначной декодируемости неравномерного префиксного кода (1949 г. — Л. Крафт).
3. Разработка метода кодирования длин серий одинаковых символов (1951 г. — А.Е. Лаеммель; 1958 г. — И.И. Цуккерман; 1959 г. — Э.Л. Блох).
4. Создание оптимального алгоритма построения неравномерного кода (1952 г. — Д. Хаффмен).

5. Создание нового направления теории кодирования дискретных источников — «универсальное кодирование» (1965 г. — А.Н. Колмогоров).
6. Создание универсальных кодов, избыточность которых минимальна для целого класса источников сообщений (1966 г. — Б.М. Фитингоф).
7. Развитие методов «универсального кодирования» (1960—1990 гг. — В.И. Левенштейн, Б.Я. Рябко, Р.Е. Кричевский, В.К. Трофимов, Ю.М. Штарьков, В.Ф. Бабкин, Р. Галлагер, П. Элайс, Л. Дэвисон и Я. Зив).
8. Разработка адаптивного метода кодирования источника (1968 г. — Р.Е. Кричевский; 1973 г. — Т.М. Ковер).
9. Разработка эффективного алгоритма универсального кодирования источника, получившего широкое распространение (1976—1978 гг. — Я. Зив и А. Лемпель).

8.2.2. Кодирование аналоговых источников сообщений

1. Изобретение импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) (1938 г. — А. Ривс).
2. Первое исследование точности восстановления аналоговых сигналов при их преобразовании в цифровые методом ИКМ (1944 г. — В.Р. Беннет).
3. Изобретение дельта-модуляции (ДМ) (1946 г. — Е. Делорейн, С. Ван Миеро и Б. Дерьявич; 1949 г. — Л.А. Коробков; 1952 г. — Ф. Де Яджер).
4. Исследования помехоустойчивости системы передачи сообщений с помощью ИКМ (1948 г. — Б. Оливер, Дж. Пирс и К. Шеннон; 1949 г. — С.В. Бордич).
5. Применение метода предсказания текущих значений сигнала на основе его предшествующих отсчетов для кодирования источника сообщений (1950 г. — П. Элайс).
6. Изобретение дельта-ИКМ (ДИКМ) (1952 г. — К.К. Катлер).
7. Первое исследование точности восстановления аналоговых сигналов при их преобразовании в цифровые методом ДИКМ (1952 г. — Г. Ван де Вег).
8. Теоретические и экспериментальные исследования и оптимизация различных алгоритмов ИКМ, ДМ и ДИКМ (1960—1975 гг. — А.И. Величкин, М.Д. Венедиктов, Дж. Макс и Дж. Е. Эбейт и Дж. Б. О'Нейл).
9. Разработка метода кодирования источников аналоговых сообщений с преобразованием аналогового сигнала (1956 г. — Г. Крамер и М. Масью; 1962—1963 гг. — Дж. Хуанг и П.М. Шалсейс).
10. Разработка метода оптимального векторного квантования источников аналоговых сообщений (1956 г. — Г. Штейнхаус; 1958 г. — М. Шуценберг; 1963 г. — В.Н. Кошелев).
11. Доказательство того, что задача оптимального векторного кодирования источника аналогична задаче оптимального декодирования сигнала, принятого на фоне шума, и исследование возможностей использования для кодирования источника сообщения блочных и решетчатых кодов (1979 г. — Э.Д. Витерби и Дж. К. Омуре).
12. Разработка апертурных алгоритмов сжатия данных, содержащихся в непрерывных сообщениях (1962 г.).

8.2.3. Кодирование речевых сигналов и сигналов звукового вещания

1. Теоретические исследования и разработка вокодерной техники (1939–1980 гг.).
2. Разработка аналоговой 48-канальной системы TASI, в которой паузы речи использовались для увеличения в два раза пропускной способности каналов связи (1956 г.).
3. Разработка цифровой системы, аналогичной системе TASI (1978 г. — В.П. Кокоскин; 1983 г. — Б.Я. Рябко и Б.Р. Звонкович).
4. Разработка системы NICAM для сокращения избыточности сигналов звукового вещания (1980 г.).
5. Разработка включенной в стандарт MPEG системы MUSICAM, которая основана на использовании метода преобразования сигнала и предназначена для сокращения избыточности сигналов звукового вещания (1989 г.).

8.2.4. Кодирование источников видеосообщений

1. Первое исследование спектра ТВ-сигнала, установившее, что он имеет линейчатую структуру (1934 г. — П. Мертц и Ф. Грей).
2. Открытие возможности частотного уплотнения ТВ-сигнала дополнительной информацией, передаваемой на поднесущей, частота которой выбирается между гармониками строчной частоты (1934 г. — Р. Дом).
3. Разработка аналоговых систем ТВЧ, использующих линейчатость структуры спектра ТВ-сигнала, — MUSA (1985 г. — Япония) и HD-MAC (1987 г. — Франция).
4. Разработка международного стандарта MPEG для сжатия сигналов изображения, представленных в цифровой форме (1995 г.).

8.3. Теория кодирования канала связи

1. Создание блочных линейных кодов, корректирующих одиночные ошибки (1948 г. — Р. Хэмминг).
2. Создание блочных линейных не dvoичных кодов (1949 г.— М. Дж. Голей).
3. Исследования возможностей коррекции ошибок кодами заданной длины (1952 г. — Е.Н. Гильберт; 1954 г. — П. Элайс; 1960 г. — М. Плоткин; 1957 г. — Р.Р. Варшамов).
4. Создание итерированных кодов (1954 г. — П. Элайс).
5. Создание линейных кодов с мажоритарным декодированием (1954 г. — И.С. Рид и Д.Е. Маллер).
6. Первое исследование помехоустойчивости приема с мягким решением для кода Вагнера (1954 г. — Р. Сильверман и М. Болсер).
7. Создание сверточных кодов (1955 г. — П. Элайс, Л.М. Финк и В.И. Шляпоберский).
8. Применение математической теории групп для построения и исследования линейных кодов (1953 г. — З. Киясу; 1956 г. — Д. Слепян).
9. Исследование линейных переключающих схем с точки зрения теории линейных фильтров и применение генераторов с регистром сдвига для получения кодов, исправляющих ошибки (1955–1956 гг. — Н. Цирлер; С.В. Голомб и Д.А. Хаффмен).

10. Первые исследования циклических кодов (1957 г. — Е. Преиндж).
11. Открытие метода последовательного декодирования (1957 г. — Дж. Возенкрафт).
12. Разработка алгебраического метода исправления пачки ошибок в блочных кодах (1958 г. — М.А. Эпштейн).
13. Развитие методов исправления одной или нескольких пачек ошибок в блочных кодах (1959–1963 гг. — Н.А. Абрамсон, П.А. Файер и Дж. Дж. Стоун).
14. Создание кодов Боуза, Рой-Чоудхури, Хоквингема (БЧХ) (1959 г. — А. Хоквингем; 1960 — Р.К. Боуз и Д.К. Рой-Чоудхури).
15. Создание эффективных линейных блочных кодов (1960 г. — И.С. Рид и Г. Соломон).
16. Исследование помехоустойчивости приема сигналов в канале с группированием ошибок при использовании метода перемежения информационных символов (1960 г. — А.А. Харкевич и Э.Л. Блох; 1970 г. — Дж. Л. Рамсей).
17. Исследование эффективности метода последовательного декодирования (1961 г. — Дж. Возенкрафт и Б. Рейффен).
18. Исследования методов мажоритарного декодирования блочных кодов как при жестком, так и при мягком решениях демодулятора (1963 г. — Дж. Л. Месси).
19. Совершенствование алгоритма последовательного декодирования (1963 г. — Р.М. Фано; создание стэк-алгоритма 1966 г. — К.Ш. Зигангиров; 1969 г. — Ф. Джелинек).
20. Исследования циклических кодов с мажоритарным декодированием (1965 г. — В.Д. Колесников и Е.Т. Мирончиков).
21. Создание каскадных кодов (1965 г. — Д. Форни).
22. Разработка алгоритма декодирования сверточных кодов по максимуму правдоподобия, который широко применялся в разных системах связи (1967 г. — Э. Витерби).
23. Создание кодов Гоппы, более эффективных по сравнению с кодами БЧХ (1970 г. — В.Д. Гоппа).
24. Разработка алгоритмов мягкого декодирования блочных кодов (1971–1972 гг. — Е. Велдон и Д. Чейз).
25. Создание альтернативных кодов, более общих по сравнению с кодами Гоппы (1974 г. — Г.Г. Хелгерт).
26. Исследования каскадных кодов, показавшие, что они позволяют эффективно корректировать как независимые, так и пакетные ошибки, возникающие в канале связи, и что с помощью таких кодов можно получить степенной рост сложности алгоритмов кодирования и декодирования (1976–1982 гг. — Э.Л. Блох и В.В. Зяблов).
27. Создание решетчатой кодовой модуляции — сигнально-кодовой конструкции, объединяющей свойства корректирующих кодов и методов модуляции сигналов (1982 г. — Г. Унгербок).
28. Исследования помехоустойчивости различных методов приема сигнально-кодовых конструкций в гауссовском канале связи (1982–1991 гг. — С.Л. Портной, В.В. Зяблов, В.В. Гинзбург и В.Л. Банкет).
29. Создание турбокодов (1993 г. — К. Берроу и А. Главью).

8.4. Системы с обратной связью

1. Изобретение системы с решающей обратной связью (ОС) (1947 г. — Г. Ван Дюрен).
2. Первые теоретические исследования эффективности систем с ОС при разных алгоритмах обработки принимаемых сигналов и методах организации канала ОС (1948 г. — К. Шеннон; 1956 г. — К. Шеннон, С.С. Чанг).
3. Изобретение системы с информационной обратной связью (1951 г. — З.М. Каневский).
4. Исследование эффективности передачи информации в системах с информационной ОС (1957 г. — П. Элайс).
5. Исследование фундаментальных вопросов, связанных с влиянием ОС на пропускную способность прямого канала связи (1958–1971 гг. — Р.Л. Добрушин, И.А. Овсеич, М.С. Пинскер и А.Г. Дьячков).
6. Одно из первых теоретических исследований приема сигналов в радиосистеме с решающей ОС при прерывистой связи (1959 г. — В.С. Мельников).
7. Публикация первой в мире книги, посвященной системам с решающей ОС (1963 г. — Э.Л. Блох).
8. Исследования вопросов помехоустойчивости и эффективности систем с ОС (1964–1976 гг. — З.М. Каневский).
9. Разработка универсального метода кодирования для систем с решающей ОС и анализ эффективности нескольких алгоритмов функционирования подобных систем (1975 г. — В.И. Коржик и Л.М. Финк).
10. Разработка протоколов для систем с решающей ОС в пакетных радиосетях с множественным доступом, в сетях, имеющих кольцевую конфигурацию, и в других современных сетях связи, имеющих сложную архитектуру (1987 г. — Д. Бертсекас и Р. Галлагер).

8.5. Сети связи с многими пользователями

1. Первая работа, в которой были поставлены проблемы теории информации для сетей связи с многими пользователями (1961 г. — К. Шеннон).
2. Исследование ограничений на скорость передачи сообщений от M пользователей в сетях связи с многостанционным доступом (1971–1972 гг. — Р. Алсведе, Г. Лиано).
3. Первые исследования проблем передачи сообщений в ширококвещательных системах связи (1972 г. — Т.М. Ковер).
4. Исследование методами теории информации проблем оптимальной передачи сообщений в случае, когда имеются взаимные помехи между независимо работающими линиями связи (1975 г. — А. Карлейал; 1976 г. — П. Бергманс).
5. Первое исследование сетей связи, в которых используется ретрансляция сигналов (1977 г. — Ван дер Меулен).
6. Разработка методов определения пропускной способности ширококвещательных каналов связи (1977–1980 гг. — С.И. Гельфанд, М.С. Пинскер, Г.Ш. Полтырев).
7. Разработка методов определения пропускной способности каналов связи с многостанционным доступом (1982 г. — Л.А. Бассалыго, М.С. Пинскер, В.В. Прелов; 1997 г. — Л. Вильгельмсон, К.Ш. Зигангиров).

Литература к главе 4

§ 1

1. *Carlson J.R.* Notes on the theory of modulation // Proc. IRE. 1922. V. 10.
2. *Шулейкин М.В.* Об условиях применения генератора высокой частоты для радиотелефонии // Изв. по минному делу. 1916. № 49.
3. *Gabor D.A.* Theory of communication // J. IEE. 1946. V.93. Pt. III. P. 439.
4. *Nyquist H.* Certain factors affecting telegraph speed // BSTJ. 1924. V. 3.
5. *Küpfmüller K.* Transient phenomena in wave filters // Elek. Nuch. Tech. 1924. V. 7.
6. *Котельников В.А.* О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи / Материалы по радиосвязи к 1-му Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции связи. Всесоюзный энергетический комитет. 1933.
7. *Агеев Д.В.* Основы теории линейной селекции // Науч.-техн. сб. ЛЭИС. № 10. 1935.
8. *Быховский М.А.* Круги памяти // Сер. изданий «История электросвязи и радиотехники». М.: Мобильные коммуникации. 2000. Вып. 1.
9. *Hartley R.V.L.* Transmission of information // BSTJ. July 1928. V. 7.
10. *Сифоров В.И.* Исследование методов радиоприёма, основанных на селекции по амплитуде, фазе и продолжительности действия. Л.: ЛЭТИ. 1936. № 10.
11. *Wiener N.* The interpolation, extrapolation and smoothing of stationary time series. N.Y.: Wiley. 1949.

§ 2

1. *Shannon C.E.* A mathematical theory of communication // BSTJ. 1948. №3.
2. *Wiener N.* Cybernetics. N.Y.: Wiley. 1948.
3. *Tuller W.G.* Theoretical limitation on the rate of transmission of information // Proc. IRE. 1949. V. 37.
4. *Фано Р.М.* Теоретические ограничения полосы согласования произвольных импедансов. М.: Сов. радио, 1965.
5. *Lan Jen Chu, Adler R.B., Fano R.M.* Electromagnetic Energy Transmission and Radiation. N.Y.: Wiley. 1960.
6. *Lan Jen Chu, Adler R.B., Fano R.M.* Electromagnetic Field, Energy and Forces. N.Y.: Wiley. 1968.
7. *Fano R.M.* / Technical Rep. № 65. The Research Laboratory of Electronics. MIT. 1949.
8. *Fano R.M.* Class Notes for Transmission of Information. Cambridge, Mass.: MIT Press. 1952.
9. *Fano R.M.* Transmission of Information. N.Y.: MIT Press and Wiley. 1961.
10. *Fano R.* Heuristic Discussion of Probabilistic Decoding // IEEE Trans. IT-9. 1963. P. 64–74.

§ 3

1. *Gabor D.* Communication Theory Past, Present and Prospective // Proc. Symp. Information Theory. 1950.
2. *Cherry E.* A History of the Theory of Information // Proc. Inst. El. Eng. 1951.
3. Progress in Information Theory in the USA. 1957–1960. P. Elias, A. Gill, R. Price // IRE Trans. on Information Theory. July 1961.
4. *Zadeh L.* Report on Progress in Information Theory in the USA // IEEE Trans. on Information Theory. October 1963.
5. *Сифоров В.И., Цыбаков Б.С.* Развитие теории информации в СССР // Техническая кибернетика. 1963. № 5.
6. *Gilbert E.N.* Information Theory after 18 years // Science. April 1966. V. 15.

7. *Kautz W. and Levitt K.* A Survey of Progress in Coding Theory in the Soviet Union // IEEE Trans. on Information Theory. January 1969.
8. *Wyner A.* On Coding and Information Theory // SIAM Review. July 1969.
9. *Wyner A.D.* Another Look at the Coding Theorem of Information Theory // Proc. IEEE. June 1970.
10. *Dobrushin R.L.* Survey of Soviet research in information theory // IEEE Trans. on Information Theory. 1972. № 6.
11. *Pierce J.* The Early Days of Information Theory // IEEE Trans. on Information Theory. January 1973.
12. *Slepian D.* Information Theory in the Fifties // IEEE Trans. on Information Theory. March 1973.
13. *Viterbi A.* Information Theory in the Sixties // IEEE Trans. on Information Theory. May 1973.
14. *Wolf J.* A Survey of Coding Theory: 1967-1972 // IEEE Trans. on Information Theory. July 1973.
15. *Lucky R.* A Survey of the Communication Theory Literature: 1968–1973 // IEEE Trans. on Information Theory. November 1973
16. *Wyner A.* Recent Results in the Shannon Theory // IEEE Trans. on Information Theory. January 1974.
17. *Kailath T.* A View of Three Decades of Linear Filtering Theory // IEEE Trans. on Information Theory. March 1974.
18. *Jacobs I.* Practical Applications of Coding // IEEE Trans. on Information Theory. May 1974.
19. *Цыбаков Б.С.* Теория информации. Достижения последних лет // Техническая кибернетика. 1974. № 4.
20. *Wyner A.D.* Recent result in the Shannon theory // IEEE Trans. on Information Theory. 1974. № 1.
21. *Van der Meulen E.* A Survey of Multiway Channels in Information Theory 1961–1976. January 1977.
22. *El-Gamal and Cover T.* Multiple User Information Theory // Proc. IEEE. December 1980.
23. *Gallager R.* A Perspective on Multiaccess Channels // IEEE Trans. on Information Theory. March 1985.
24. *Csiszar I.* Information Theory and Ergodic Theory // Problems of Control and Information Theory. 1987.
25. *Kieffer J.* A Survey of the Theory of Source Coding with a Fidelity Criterion // IEEE Trans. on Information Theory. September 1993 .
26. *Verdú S.* The Development of Information Theory. — Chapter in From Statistical Physics to Statistical Inference and Back. J.P. Nadal and P. Grassberger. Boston: Kluwer Academic. 1994.
27. *Verdú S.* Fifty years of Shannon theory // IEEE Trans. on Information Theory. 1998. № 6.
28. *Прелов В.В.* Теория информации в Институте проблем передачи информации // Радиотехника. 1999. № 12.
29. *McMillan B.* The basic theorems of information // Ann. Math. Statist. June 1953. V. 24.
30. *Feinstein A.* Foundation of Information Theory. N.Y.: McGraw-Hill. 1958.
31. *Wolfowitz J.* Coding theorems of information theory. N.Y.: Shringer. 1961.
32. *Колмогоров А.Н.* Теория передачи информации / Сессия АН СССР по научным проблемам автоматизации производства; 20 октября 1956. М.: АН СССР. 1957.
33. *Колмогоров А.Н.* О логической основе теории информации и теории вероятностей // Проблемы передачи информации. 1969. № 3.
34. *Хинчин А.И.* Понятие энтропии в теории вероятностей // Успехи мат. наук. 1953. Т. 8.

35. Хинчин А.И. Об основных теоремах теории информации // Успехи мат. наук. 1956. Т. 11. Вып. 1.
36. Гельфанд И.М., Колмогоров А.Н., Яглом А.М. К общему определению количества информации / Докл. АН СССР. 1956. Т. 3. № 4.
37. Добрушин Р.Л. Общая формулировка основной теоремы Шеннона в теории информации // Успехи мат. наук. 1959. Т. 14. № 3.
38. Добрушин Р.Л. Математические вопросы шенноновской теории оптимального кодирования информации // Проблемы передачи информации. 1961. Вып. 10.
39. Пинскер М.С. Информация и информационная устойчивость случайных величин и процессов // Проблемы передачи информации. 1960. Вып. 7.
40. Пинскер М.С. Источники сообщений // Проблемы передачи информации. 1963. Вып. 14.
41. Пинскер М.С. Гауссовские источники // Проблемы передачи информации. 1963. Вып. 14.
42. Стратонович Р.Л. Теория информации. М.: Сов. радио, 1975.
43. Цыбаков Б.С. О пропускной способности дискретного по времени гауссовского канала с фильтром // Проблемы передачи информации. 1970. Т. 6. № 3.
44. Цареградский Л.П. О пропускной способности стационарных каналов с конечной памятью // Теория вероятностей и ее применения. 1958. Т. 3.
45. Прелов В.В. Теория информации в Институте проблем передачи информации // Радиотехника. 1999. № 12.
46. Wyner A.D. The capacity of the band — limited Gaussian channel // BSTJ. March 1966. V. 45.
47. Rice S.O. Communication in the presence of noise — Probability of error for two encoding schemes // BSTJ. 1950. № 1.
48. Feinstein A. Error bounds in noisy channels with memory // IRE Trans. on Information Theory. 1956. № 1. PGIT -1.
49. Добрушин Р.Л. Оптимальные бинарные коды для малых скоростей передачи информации // Теория вероятностей и ее применения. 1962. Т. 7. № 2.
50. Shannon C.E., Gallager R.G., Berlekamp E. Lower bounds to error probability for coding on discrete memoryless channels // Information and Control. 1967. V. 10.
51. Gallager R.G. Low Density Parity Check Codes, Monograph. Cambridge, Mass.: MIT Press. 1963.
52. Gallager R.G. Information Theory and Reliable Communication. N.Y.: Wiley. 1968.
53. Bertsekas D.P. and Gallager R.G. Data Networks. N.J.: Prentice-Hall. 1987.
54. Gallager R.G. Discrete Stochastic Processes. Boston: Kluwer Academic. 1996.
55. Цыбаков Б.С. Эпсилон-энтропия векторного сообщения // Проблемы передачи информации. 1969. Т. 5. № 1.
56. Бассальго Л.А., Добрушин Р.Л. Эпсилон-энтропия гиббсовского поля // Проблемы передачи информации. 1987. Т. 23. № 1.
57. Пинскер М.С., Прелов В.В. Скорость создания информации в стационарных гауссовских каналах при передаче слабых сигналов // Проблемы передачи информации. 1994. Т. 30. № 4.
58. Gobblick T.J. Theoretical limitations on the transmission of data from analog sources // IEEE Trans. on Information Theory. October 1965. V. IT-11.
59. Gobblick T.J. Holsinger J.L. Analog sources digitization: A comparison of theory and practice // IEEE Trans. on Information Theory. April 1967. V. IT-13.
60. Ziv J. The behavior of analog communication systems // IEEE Trans. on Information Theory. September 1970. V. IT-16.
61. Shamai S., Verdú S., Zamir R. Systematic lossy source/channel coding // IEEE Trans. on Information Theory. March 1998. V. IT-44.
62. Berger T. Rate distortion theory. Englewood Cliffs. N.J.: Prentice-Hall. 1970.

§ 4

4.1

1. *Huffman D.A.* A method for the construction of minimum-redundancy codes // Proc. IRE. 1952. № 9.
2. *Kraft L.C.* A device for quantizing, grouping and coding amplitude modulated pulses. Cambridge, Mass: M.S. Thesis. MIT. 1949.
3. *Laemmel A.E.* Coding processes for bandwidth reduction in picture transmission. Rep. R246-251. / Polytechnic Institute of Brooklyn. August 1951.
4. *Цуккерман И.И.* О передаче координат элементов телевизионного изображения // Радиотехника. 1958. №4.
5. *Блох Э.Л.* О передаче неравномерной бинарной последовательности равномерным кодом // Электросвязь. 1959. № 1.
6. *Колмогоров А.Н.* Три подхода к определению понятия «количество информации» // Проблемы передачи информации. 1965. № 1.
7. *Фитингоф Б.М.* Оптимальное кодирование при неизвестной и меняющейся статистике сообщений // Проблемы передачи информации. 1966. № 2.
8. *Кричевский Р.Е.* Связь между избыточностью и достоверностью сведений об источнике // Проблемы передачи информации. 1968. № 3.
9. *Cover T.M.* Enumerative source coding // IEEE Trans. on Information Theory. 1973. V. 18. № 1.
10. *Левенштейн В.И.* Об избыточности и замедлении раздельного кодирования натуральных чисел // Проблемы кибернетики. 1968. Вып. 20.
11. *Рябко Б.Я.* Кодирование источника с неизвестными, но упорядоченными вероятностями // Проблемы передачи информации. 1979. № 2.
12. *Рябко Б.Я.* Сжатие информации с помощью стопки книг // Проблемы передачи информации. 1980. № 4.
13. *Elias P.* Interval and decency rank source encoding: two on-line adaptive variable-length schemes // IEEE Trans. 1987. V. IT-33. № 1.
14. A locally adaptive data compression scheme (J.L. Bentley et al). CACM. 1986. V. 29. № 4.
15. *Ziv J., Lempel A.* A universal algorithm for sequential data compression // IEEE Trans. on Information Theory. 1978. V. IT-24. № 5.

4.2

1. Pat. 852 183. A.H. Reeves (French). October 3. 1938.
2. *Bennet W.R.* Spectra of quantized signals // Bell Syst. Tech. J. July 1948. V. 27.
3. *Oliver B.M., Pierce J., Shannon C.E.* The philosophy of PCM // Proc. IRE. November 1948. V. 36.
4. *Бородич С.В.* О помехоустойчивости систем связи с импульсно-кодовой модуляцией // Радиотехника. 1949. № 5.
5. *Max J.* Quantizing for minimum distortion // IRE Trans. on Information Theory. 1960. V. IT-6. № 1.
6. *Величкин А.И.* Оптимальные характеристики квантующих устройств // Радиотехника. 1963. № 2.
7. Pat. 932 140. B. Derjavitsh, E.M. Deloraine, V. Mierlo. August 1946.
8. А. с. № 106036. кл. 21a4. Способ передачи электрических сигналов. Л.А. Коробков / Бюлл. изобр. 1957. № 4.
9. Pat. 2 605 361. Differential quantization of communication signals. C.C. Cutler (US). July 29. 1952.

10. *De Jager F.* Delta modulation. a method of PCM transmission using a one-unit code // Philips Res. Repts. 1952. V. 7.
11. *Elias P.* Predictive coding I. and II // IRE Trans. on Information Theory. March 1955. V. IT-1.
12. *Van de Weg.* Quantizing noise of a single integration delta modulation system with an N-digit code // Philips Res. Repts. 1953. V. 8.
13. *O'Neal J.B.* A bound on signal-to-quantizing noise ratios for digital encoding systems // Proc. IEEE. March 1967. V. 55.
14. *Cattermole K.W.* Principles of Pulse Code Modulation. London: Hiffe Books. 1969.
15. *Величкин А.И.* Теория дискретной передачи непрерывных сообщений. М.: Сов. радио, 1970.
16. *Гуревич В.Э., Лопушин Ю.Г., Рабинович Г.В.* Импульсно-кодовая модуляция в многоканальной телефонной связи. М.: Связь, 1973.
17. Дельта-модуляция. Теория и применения / М.Д. Венедиктов, Ю.П. Женевский, В.В. Марков, Г.С. Эйдус. М.: Связь, 1976.
18. *Харатишвили И.Г.* Дифференциальная импульсно-кодовая модуляция в системах связи. М.: Радио и связь, 1982.
19. *Deloraine E.M., Reeves A.H.* The 25th anniversary of pulse code modulation // IEEE Spectrum. May 1965.
20. *Kramer H.P., Mathews M.V.* A linear coding for transmission a set of correlated signals // IRE Trans on Information Theory. September 1956. V. IT-2.
21. *Huang J. Schultheiss P.M.* Block quantization of correlated Gaussian random variable // IEEE Trans. Com. September 1963. COM-11.
22. *Свириденко В.А.* Анализ систем со сжатием данных. М.: Связь, 1977.
23. *Pratt W.K.* Digital image processing. N.Y.: Wiley. 1978.
24. *Steinhaus H.* Sur la division des corp materials en parties // Bull. Acad. Polon. Sci. 1956. V. 4. P. 801–804.
25. *Schutzenberger M.P.* On the quantization of finite dimensional messedge // Inform. Contr. 1958. V. 1. P. 153–158.
26. *Кошелев В.Н.* Квантование с минимальной энтропией // Проблемы передачи информации. 1963. Вып. 14.
27. *Viterbi A.D., Omura J.K.* Principles of digital communication and coding. N.Y.: McGraw-Hill. 1979.
28. *Gray R.M., Neuhoff D.I.* Quantizatin // IEEE Trans. on Information Theory. October 1998. V. IT-44.
29. *Hulme J.R. Schomburg R.S.* A data bandwidth compressor for space vehicle telemetry / National Telemetry Conf. Washington. May 1962.
30. *Davisson L.D.* Data compression using straight line interpolation // IEEE Trans. on Information Theory. 1968. 14. № 3.

4.3

1. *Kunt M., Jonsen O.* Block Coding of Graphics: A Tutorial Review // IEEE Proc. 1980. № 7.
2. *Yasuda Y.* Overview of Digital Facsimile Coding Techniques in Japan // Proc. IEEE. 1980. № 7.
3. *Hanter R., Robinson A.H.* International Digital Facsimile Coding Standards // Proc. IEEE. 1980. № 7.
4. *Dudley H.* Remaking speech // J. Acoust. Soc. Am. 1939. V. 11. P. 169–177.
5. Вокодерная телефония. Методы и проблемы / А.Ш. Акбулатов, С.П. Баронин, В.И. Куля и др. // Под ред. А.А. Пирогова. М.: Связь, 1974.
6. *Markel J.D., Gray A.H.* Linear Prediction of Speech. Berlin N.Y.: Springer-Verlag. 1976.

7. *Bullington K., Fraser J.* Engineering Aspects of TASI // Bell Syst. Tech. Journal. March 1959. V. 38.
8. А. с. № 575781. СССР. Устройство статистического уплотнения системы с временным уплотнением каналов / В.П. Кокошкин.
9. Анализ метода интерполяции речевых сигналов / В.Р. Звонкович, В.П. Кокошкин, П.В. Сафонов и др. // Электросвязь. 1985. № 7.
10. *Кричевский П.Е.* Сжатие и поиск информации. М.: Радио и связь, 1989.
11. *Boxer A.J.* NICAM 728 – Digital Two-Channel Sound for Terrestrial Television // IEEE Trans. Consumer Electronics. August 1987.
12. *Dehery Y. F., Lever M. and Urcun P.* AMUSICAM source codec for digital audio broadcasting and storage / Proc. of the IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing. 1991. P. 3605–3608.
13. *Mertz P., Gray F.* A theory of scanning and its relation to the transmitted signals in telephotography and television // Bell Syst. Tech. J. 1934. V. 13. № 7.
14. *Dome R.* Frequency – interlaced color television // Electronic. 1934. V. 23. № 3.
15. *Дерюгин Н.Г.* Спектр мощности и функция корреляции телевизионного сигнала // Электросвязь. 1957. № 7.
16. *Ninomiya Y.* The Japanese scene (digital HDTV) // IEEE Spectrum. 1995. V. 32. № 4.
17. *Schäfer R.* Precautions to be Taken for CIELAB Coding in a Compatible HD-MAC System. EUREKA 95-Project 1 / Doc. EU95-1/059. September 1987.
18. *Pratt W.K.* Digital image processing. N.Y.: Wiley. 1978.
19. *Ely S.R.* MPEG Video: A simple introduction // EBU Review (Technical). 1995. № 266.
20. *Ольховский Ю.Б., Новоселов О.Н., Мановцев А.П.* Сжатие данных при телеизмерениях. М.: Сов. радио, 1971.
21. *Бабкин В.Ф., Крюков А.Б., Штарьков Ю.М.* Сжатие данных. Аппаратура для космических исследований. М.: Наука, 1972.
22. Система сжатия данных на борту АМС «Марс-3» / М. Васильев, В.Ф. Николаев, Б.С. Новиков и др. // Вопросы кибернетики. Сжатие данных. М.: Наука, 1974.
23. Бортовая телеметрическая аппаратура космических летательных аппаратов / С.М. Переверткин, А.Б. Кантор, Н.Ф. Бородин и др. М.: Машиностроение, 1977.

§ 5

1. *Rice S.O.* Communication in the presence of noise-probability of error for two encoding schemes // BSTJ. January 1950. V. 29.
2. *Shannon C.* Probability of error for optimal codes in a gaussian channel // BSTJ. 1959. V. 38.
3. *Hamming R.W.* Error detecting and error correcting codes // BSTJ. April 1950. V. 29.
4. *Golay M.J.* Notes on digital coding // Proc. IRE. June 1949.
5. *Reed S.A.* Class of multiple error-correcting codes and the decoding schemes // IRE Trans. IT-4. September 1954.
6. *Muller D.E.* Application of Boolean algebra to switching circuit design and error detection // IRE Trans. EC-3. 1954. № 1.
7. *Slepian D.* A class of binary signaling alphabets // BSTJ. January 1956.
8. *Kiyasu Z.* Research and development data Tokyo: Electrical Commun. Lab. Nippon Tele. Corp. 1953. № 4.
9. *Golomb S.W.* Sequences with randomness properties / Final Rep. Contract № W36-039SC-54-36611. Baltimore: Glen L. Martin Co. 1955.
10. *Zeiler N.* Several binary-sequence generators / Techn. Rep. 95. Lexington, Mass.: MIT Lincoln Lab. September 1955.
11. *Huffman D.A.* Linear circuit viewpoint on error-correcting codes // IRE Trans. IT-2. 1956. P. 20–28.

12. *Huffman D.A.* The synthesis of linear sequential coding networks. in: Information Theory. Academic Press. N.Y.: 1956. P. 77–95.
13. *Prange E.* Some cyclic error-correcting codes with simple decoding algorithms / AFCRC-59-164. Bedford, Mass.: Air Force Cambridge Res. Center. April 1958.
14. *Bose R.C., Ray-Chaudhuri D.K.* On class of error correcting codes // Information and Control. 1960. №3.
15. *Hocquenghem A.* Codes Correcteurs d'Erreurs // Chiffres. September 1959. V. 2.
16. *Reed I.S., Solomon G.* Polynomial codes over certain finite fields // J. Soc. Indust. Appl. Math. 1960. V. 8. P. 300–304.
17. *Peterson W.W., Weldon E.J.* Error-correcting codes. Cambridge, Mass.: MIT Press. 1972.
18. *Гонна В.Д.* Новый класс линейных корректирующих кодов // Проблемы передачи информации. 1970. № 3.
19. *Helgert H.H.* Alternant codes // Information and Control. 1974. V. 26. P. 369–381.
20. *Massey J.I.* Threshold decoding. Res. Monograph 20. Cambridge, Mass.: MIT Press. 1963.
21. *Колесник В.Д., Мирончиков Е.Т.* Декодирование циклических кодов. М.: Связь, 1968.
22. *Золотарев В.В.* Использование устойчивости пороговых декодеров для уменьшения вероятности ошибок декодирования / IV Международный симпозиум по теории информации. Тезисы докл. М.: Наука, 1976. Ч. 2.
23. *Брауде-Золотарев Ю.М., Золотарев В.В.* Оптимизация порогового декодирования // Труды НИИР. 1979. № 1.
24. *Золотарев В.В., Овечкин Г.В.* Эффективные алгоритмы помехоустойчивого кодирования для цифровых систем связи // Электросвязь. 2003. № 9.
25. *Elias P.* Coding for noisy channels // IRE ConV. Rec. March 1955. Pt. 4.
26. А. с. № 145911. Способ повышения устойчивости приема радиотелеграфной связи по двухканальной ДЧТ радиолинии / Л.М. Финк, В.И. Шляпоберский // Бюлл. изобр. 1962. № 23.
27. *Hagelbarger D.W.* Recurrent codes: easily mechanized burst-correcting binary codes // BSTJ. 1959. V. 38.
28. *Wozencraft J.M.* Sequential decoding for reliable communication / Nat. IRE ConV. Rec. 1957. Pt. 2. P. 11–25.
29. *Wozencraft J.M., Reiffen B.* Sequential decoding. N.Y.: MIT Press and Wiley. 1961.
30. *Зизангиров К.Ш.* Процедуры последовательного декодирования. М.: Связь, 1974.
31. *Viterbi A.J.* Error bounds for convolution codes and asymptotically optimum decoding algorithm // IEEE Trans. IT-13. 1967.
32. *Epstein M.A.* Algebraic decoding for a binary erasure channel / Rep. 340. Cambridge, Mass.: MIT Res. Lab. of Electronics. 1958.
33. *Abramson N.* A class of systematic codes for non-independent errors // IRE Trans. 1959. IT-5.
34. *Fire P.* A class of multiple-error-correcting binary codes for non-independent errors / Rep. RSL-E-2. Mountain View: Sylvania Reconnaissance Systems Lab. 1959.
35. *Stone J.J.* Multiple burst error correction // Information and Control. 1963. V. 4. № 1.
36. *Блох Э.Л., Харкевич А.А.* Кодирование, устойчивое по отношению к замиранию (антифединговое кодирование) // Электросвязь. 1960. № 4.
37. *Ramsey J.L.* Realization of optimum interleavers // IEEE Trans. IT-16. 1970.
38. *Elias P.* Error – free coding // IRE Trans. IT-4. September 1954.
39. *Forney D.* Generalized minimum distance decoding // IEEE Trans. IT-12. 1966. P. 125 – 131.
40. *Блох Э.Л., Зяблов В.В.* Линейные каскадные коды. М.: Наука, 1982.
41. *Berrou C., Glavieux A., Thitimasjshima P.* Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo codes // Proc. IEEE Int. Conf. on Communications. May 1993.

42. *Silverman R.A., Balser M.* Coding for constant-data-rate systems. Pt. 1 // Proc. IRE. 1954. V. 42. № 9. Pt. 2; Multiple-error-correcting codes // Proc. IRE. 1955. V. 43. № 6.
43. *Epstein M.A.* Algebraic decoding for a binary erasure channel. Cambridge Mass.: MIT Res. Lab. of Electronics Rep. 340. 1958.
44. *Weldon E.J.* Decoding binary block codes on Q-ary output channels // IEEE Trans. IT-17. November 1971.
45. *Chase D.A.* A class of algorithms for decoding block codes with channel measurement information // IEEE Trans. IT-18. January 1972.
46. *Каган Б.Д., Финк Л.М.* Метод последовательного приема в целом для кодов, допускающих мажоритарное декодирование // Электросвязь. 1967. № 1.
47. *Каган Б.Д., Финк Л.М.* К вопросу о субоптимальном приеме в целом для кодов, допускающих мажоритарное декодирование // Электросвязь. 1968. № 5.
48. *Ungerboeck G.* Trellis coding with expanded channel-signal sets / Intern. Symposium on Information Theory. October 1977.
49. *Зяблов В.В., Коробков Д.Л., Портной С.Л.* Высокоскоростная передача сообщений в реальных каналах. М.: Радио и связь, 1991.
50. *Варшамов Р.Р.* Оценка числа сигналов в кодах с коррекцией ошибок / ДАН СССР. 1957. Т. 117. № 5.
51. *Gilbert E.N.* A comparison of signaling alphabets // BSTJ. 1952. V. 31.
52. *Plotkin M.* Binary codes with specified distance // IRE Trans. IT-6. 1960.

§ 6

1. Pat. №263136980. 1947; Tijdschr. Ned. Radiogenoot / H.C.A. Van Duuren (US) / 1951. 1 P. 53–67.
2. *Van Duuren H.C.A.* Error probability and transmission speed on circuits using error detection and automatic repetition of signals // IRE Trans. on Commun. Systems. 1961. V. CS-9. № 1.
3. А. с. №№ 15930, 15931. З.М. Каневский. 1951.
4. *Shannon C.* The zero capacity of noisy channel // IRE Trans. on Information Theory. 1956. V. IT-2 № 3.
5. *Chang S.S.L.* The theory of information feedback systems // IRE Trans. on Information Theory. 1956. V. IT-2. № 3.
6. *Elias P.* Channel capacity without coding / IRE ConV. Rec. 1957. V. 49. Pt. 2.
7. *Harris B., Haupschein A., Schwatz L.S.* Optimum decision feedback circuit / IRE ConV. Rec. 1957. Pt. 2. P. 3–10.
8. *Добрушин Р.Л.* Передача информации по каналу с обратной связью // Теория вероятностей и ее применение. 1958. Т. 3. № 4.
9. *Овсиевич И.А.* Пропускная способность случайных каналов с обратной связью и согласование источников с такими каналами // Проблемы передачи информации. 1968. Вып. 4.
10. *Пинскер М.С., Добрушин Р.Л.* Память увеличивает пропускную способность // Проблемы передачи информации. 1969. Вып. 5.
11. *Пинскер М.С., Дьячков А.Г.* Об оптимальном линейном методе передачи по гауссовскому стационарному каналу без памяти с полной обратной связью // Проблемы передачи информации. 1971. Т. 7. № 2.
12. *Schalkwijk J.P.M., Kailath T.* A coding schemes for additive noise channel with feedback // IEEE Trans. on Information Theory. 1966. V. IT-12. № 4.
13. *Пинскер М.С.* Вероятность ошибки при блоковой передаче по гауссовскому каналу без памяти с обратной связью // Проблемы передачи информации. 1968. Вып. 4.

14. *Зигангиров К.С.* Верхние границы для вероятности ошибки в каналах с обратной связью // Проблемы передачи информации. 1970. № 2.
15. *Блох Э.Л.* Помехоустойчивость систем связи с переспросом // Проблемы передачи информации. 1963. Вып. 13.
16. *Каневский З.М.* Передача сообщений с информационной обратной связью. М.: Связь, 1969.
17. Передача информации с обратной связью / З.М. Каневский, М.И. Дорман, Б.В. Токарев и др. М.: Связь, 1976.
18. *Коржик В.И., Финк Л.М.* Помехоустойчивое кодирование дискретных сообщений в каналах со случайной структурой. М.: Связь, 1975.
19. Радиолинии ионосферного рассеяния метровых волн / Под ред. Н.Н. Шумской. М.: Связь, 1973.
20. *Forsyth P.A., Vogan E.L., Hansen D.R., Hines C.O.* The principles of JANET — A meteor — burst communication system. Proc. IRE. 1957. № 12.
21. *Мельников В.С.* Оценка средней скорости телеграфирования при прерывной работе радиосвязи с частотной модуляцией // Радиотехника. 1959. № 4.
22. *Sastry A.R.K.* Improving automatic repeat request (ARQ) performance on satellite channels under high error rate conditions // IEEE Trans. on Com. 1975. V. COM-23.
23. *Moeneclaey M., Bruneel H.* Efficient ARQ scheme for high error rate channels // Electronic Letter. 1984. V. 20. P. 986—987.
24. *Bertsekas D.P., Gallager R.* Data Networks. N.J.: Prentice-Hall. 1987.
25. *Modiano E.* An adaptive algorithm for optimizing the packet size used in wireless ARQ protocols // Wireless Networks. 1999. № 5.

§ 7

1. *Shannon C.E.* Two — way communication channels // Proc. 4-th Berkeley Symp. Math. Statist. and Prob. 1961. V. 1.
2. *Wyner A.D.* Recent results in the Shannon theory // IEEE Trans. IT-18. January 1974.
3. *Van der Meulen E.C.* A survey of multi-way channels in information theory: 1961–1976 // IEEE Trans. on Information Theory. January 1977. IT-23.
4. *Gamal A.E., Cover T.M.* Multiple user information theory // Proc. IEEE . 1980. V. 68. № 12.
5. *Gallager R.G.* A perspective on multi-access channels // IEEE Trans. on Information Theory. March 1985. IT-31.
6. *Прелов В.В.* Теория информации в Институте проблем передачи информации // Радиотехника. 1999. № 12.
7. *Ahlsvede R.* Multi-way communication channels / Proc. 2nd Int. Symp. Information Theory. Armenian SSR: Tsahkadsor. 1971. P. 103 — 135.
8. *Liao H.* A coding theorem for multiple access communications // Proc. Int. Symp. Inform. Theory. Asilomar. CA. 1972.
9. *Бассальго Л.А., Пинскер М.С., Прелов В.В.* Пропускная способность при нулевой ошибке и наличии общей информации для детерминированных каналов с множественным доступом // Проблемы передачи информации. 1982. № 1.
10. *Вильгельмсон Л., Зигангиров К.Ш.* Об асимптотической пропускной способности одного многопользовательского канала // Проблемы передачи информации. 1997. № 21.
11. *Cover T.M.* Broadcast channels // IEEE Trans. on Information Theory. January 1972. IT-20.
12. *Гельфанд С.И.* Пропускная способность одного ширококвещательного канала // Проблемы передачи информации. 1977. № 3.
13. *Пинскер М.С.* Пропускная способность ширококвещательных каналов без шумов // Проблемы передачи информации. 1978. № 2.

14. *Пинскер М.С., Полтырев Г.Ш.* Пропускная способность стационарного гауссовского широкополосного канала. Методы передачи и обработки информации. М.: Наука, 1980.
15. *Van der Meulen E.C.* Three-terminal communication channels // *Adv. Appl. Prob.* 1971. V. 3 P. 120–154.
16. *Carleial A.B.* A case where interference does not reduce capacity // *IEEE Trans. on Information Theory*. September 1975. IT-21.
17. *Bergmans P.P.* The Gaussian interference channel // *IEEE Int. Symp. on Information Theory*. Sweden. Ronneby: 1976. P. 21–24.

Заключение

Каждая теория является зданием, воздвигнутым ценой бесчисленных усилий многих поколений исследователей. В среднем вклад каждого — это малый камень для строительства целого. В создание и развитие теории связи внесли вклад тысячи ученых. К их числу относятся американские учёные Найквист и Хартли, немецкий и английский учёные Купфмюллер и Габор, отечественные учёные Агеев и Финк и ряд других исследователей, о которых рассказывается в этой книге. Однако общее количество исследователей, работавших в данной области, и число опубликованных ими научных работ весьма велико.

Следует отметить, что ряд важнейших результатов теории связи был получен в работах, выполненных независимо и примерно в одно и то же время учеными в разных странах, и далеко не всегда проводимые ими исследования были направлены на решение практически значимых задач. Часто этими людьми двигали внутренние импульсы, их творческий инстинкт и любовь к Истине.

Особое положение в истории науки занимают несколько учёных — Андрей Колмогоров, Владимир Котельников, Стефан Райс, Давид Миддлтон, Клод Шеннон и Норберт Винер. Именно их труды заложили фундамент теории связи и в значительной степени обусловили тот огромный прогресс в области телекоммуникаций, который происходит начиная с 70-х гг. XX в.

Теория связи, очерки истории создания и развития которой представлены в этой книге, позволяет сегодня на основании результатов теоретического анализа решать многочисленные задачи практики. Решение сложнейших проблем передачи сообщений по разнообразным каналам связи и развитие современной техники связи были бы невозможны без основных положений этой теории, разработанных в середине XX в. Однако ценность теории определяется не только тем, что она помогает решать прикладные задачи.

Огромное значение теоретических работ состоит в том, что их положения становятся доступными и быстро усваиваются тысячами людей, не наделенных свыше той мощной интуицией, которая присуща лишь немногим первооткрывателям. Эти люди получают возможность в учебных заведениях усвоить основные принципы своей профессии и включиться в процесс созидательной деятельности. Теория таким образом становится сильнейшим катализатором, ускоряющим прогресс Человечества. Создателей теорий, на идеях которых базируется этот прогресс, можно с полным основанием отнести к *УЧИТЕЛЯМ*, которые прокладывают Человечеству дорогу в будущее. Они делают возможным людям, освоив эти новые идеи, продолжить то дело, которое было ими начато. Многие люди получают шанс открыть в себе «искру божью» — свою человеческую сущность. Реализуя свои творческие способности, они вносят свой вклад в этот прогресс. Таких людей в мире — многие и многие тысячи. Ведь душа каждого человека таит в себе заряд созидания. В поэтической форме об этом замечательно сказано знаменитым российским поэтом Иосифом Бродским:

*Каждый пред Богом наг,
Жалок, наг и убог.*

*В каждой музыке Бах,
В каждом из нас Бог.*

Выдвинутые *ПЕРВОПРОХОДЦАМИ* идеи теории связи инициировали массовое научное творчество — потоки новых идей. Этот нарастающий поток придает жизни современного общества колоссальный динамизм, и корабль нашей цивилизации несетя вперед в будущее с невиданной прежде скоростью. Нет сомнений, что это будущее принесет Человечеству счастье и процветание.

Именной указатель

А

Абрамсон Н. 86
Агапов И.Ф. 100
Агеев Д.В. 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 117
Акима Г. 262
Акинфиев Н.Н. 315
Амиантов И.Н. 155, 156, 260
Андронов А.А. 214, 218
Андронов И.С. 158
Армстронг Э. 132
Алсведе Р. 296, 345, 355

Б

Бабкин В.Ф. 302
Баггероэр А.Б. 269
Балакришнан А.В. 237
Банкет В.Л. 238
Баранкин Е.В. 262
Баронин С.П. 315
Бассальго Л.А. 346
Баттачария А. 262, 277
Беверейдж Г. 240
Белло Ф. 247
Бельсиз О. 232
Бельфиоре К. 250
Беннет В. 163, 232, 272
Бергер Т. 351
Бергманс П. 350, 355
Берлекамп Э. 297
Берроу К. 336
Бертсекас Д. 344
Бирдзолл Т. 232
Блох Э.Л. 172
Богданович Б.М. 212
Боде Г.В. 115, 194
Болсер М. 353
Большаков И.А. 92, 93
Бородич С.В. 94, 124, 130
Боуз Р. 187, 324

Брауде-Золотарев Ю.М. 326
Брун Ф. 260
Бунимович В.И. 31, 32, 33, 34, 35, 49, 99, 106, 109
Буссганг Дж. 212
Быховский М.А. 20, 96, 138
Бьюси Р.С. 73

В

Вайнер А. 307
Вайнштейн Л.А. 257
Вальд А.А. 86
Ван де Вег 310
Ван дер Меулен 355
Ван Дюрен Г. 342
Ван Кампен Н.Г. 210
Ван Метер Д. 108, 229
Ван Миеро С. 352
Ван Трис Г. 36, 37, 38, 39, 144
Ван Флек Дж. Г. 47, 108, 119, 120, 133
Варшамов Р.Р. 353
Величкин А.И. 155
Верду С. 296
Винер Н. 36, 38, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 58, 73, 76, 118, 119, 125, 134, 140
Витерби Э.Д. 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 93
Витт А.А. 214
Возенкрафт Дж. М. 58, 64, 65
Вольф Дж. 323
Вольфовиц Дж. 63
Вонг Е. 47
Вудворт Ф. 83

Г

Галлагер Р.Г. 193
Гельфанд С.И. 64
Гильберт Е.Н. 69, 340
Гинзбург В.В. 238

Глазер Б. 237
Гоблик Т. Дж. 300
Голомб С.В. 324
Голубев Г.К.
Гоппа В.Д. 354
Горбунов А.К. 295
Грейам Дж. 212
Гренандер У. 256
Грин П.Е. 173
Грогински Г. 276

Д

Дадли Г. 77
Данилов Л.В. 220
Дарлингтон С. 276
Дашевский М.Л. 219
Дворк Б.М. 223
Де Хаас А. 240
Де Яджер Ф. 352
Делорейн Е. 309
Дерьявич Б. 309
Дерюгин Н.Г. 317
Детинов А.Н. 270
Деч Р. 93, 211
Джалинек А. 307
Джекобс И. 51, 55, 65
Джексон Дж. Л. 226
Джелинек Ф. 64
Джонсон Дж. 114
Ди Торо М. Дж. 250
Дмитриев В.П. 278
Добрушин Р.Л. 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 71, 74
Дорофеев В.М. 145
Дроуилхел П.Р. 248, 274
Дуб Дж. 141
Дьячков А.Г. 344
Дэвисон Л. 352

З

Заде Л. 29, 73, 217
Заездный Л.М. 278
Закаи М. 262
Залтц Дж. 163, 272

Звонкович Б.Р. 316
Зейдман Л. 262
Зив Я. 302
Зигангиров К.Ш. 51, 64, 329
Зигерт А. 83
Золотарев В.В. 362
Зубаков В.Д. 262
Зяблов В.В. 172

И

Игнатъев Н.К. 237

Й

Йоула Д.К. 145, 154

К

Кабаяши Г. 250
Каган Б.Д. 363
Кадота Т.Т. 322
Калман Р.Е. 73, 146
Кан К. 233
Каневский З.М. 355
Кантор Л.Я. 28
Карлейал А. 355
Карсон Дж. Р. 209
Катлер К.К. 309
Кеннеди Р. 245
Кетель Е. 275
Кириллов Н.Е. 172
Кловский Д.Д. 158, 243
Ковер Т.М. 346
Колесников В.Д. 354
Колмогоров А.Н. 45, 46, 49, 60, 62, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 74, 140
Компопиан К. 237
Коржик В.И. 162
Коробков Д.Л. 251
Коробков Л.А. 359
Котельников В.А. 26, 32, 34, 36, 45, 49, 58, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 100, 106, 108, 113, 118, 140
Котов В.С. 164
Кошелев В.Н. 360
Крамер Г. 312

Крамер Г.А. 256
Крафт Л. 301
Кричевский Р.Е. 352
Кросби М. 133, 209, 218
Кубо Р. 210
Куликов Е.И. 257
Кульман Н.К. 157
Купфмюллер К. 285, 350, 366
Куштуев А.И. 315
Кэйлас Т. 307

Л

Лаеммель А.Е. 351
Лакки Р. 251
Ландау Г. Дж. 322
Лаутон Дж. 234
Левенштейн В.И. 352
Левин Б.Р. 34, 89, 90, 92, 93, 95, 99, 109
Леган Ф. 145
Лезин Ю.С. 223
Лемпель А. 352
Леонтович М.А. 32, 153
Ли Ю.В. 46, 73, 226
Лиאו Г. 355
Линдсей В. 144, 238, 242
Липцер Р.Ш. 210, 219

М

МакВилиамс Ф.
МакМилан Б. 293
Маколей К. 277
Макс Дж. 309
Малахов А.Н. 144
Маллер Д.Е. 321
Мамот Е.Г. 233
Мандельштам Л.И. 133, 222
Масью М. 352
Медхэрст Р.Г. 94, 181, 218
Мельников В.С. 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103
Месси Дж. Л. 325
Мешковский К.А. 172
Миддлтон Д. 31, 33, 36, 45, 47, 49, 83, 93, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 119, 125, 133

Миронов М.А. 146
Мирончиков Е.Т. 354
Мирча А. 124, 211
Морзе С. 285
Муравьев В.Е. 315

Н

Найквист Г. 111, 112, 113, 114, 115, 117
Николаев Б.И. 249
Норт Д.О. 108, 133, 227
Нутталл А. 237

О

Обрезков Г.В. 144
Овсеевич И.А. 138
Окунев Ю.Б. 162
Оливер Б. 194
Омура Дж. 54, 250
Остин М. 250

П

Парк Дж. 250
Паркс Р. 145
Паско Р. 332
Пестряков В.Б. 77, 92, 133
Петерсон А.П. 88
Петерсон Г. 240
Петрович Н.Т. 99, 133, 234
Пинскер М.С. 62, 63, 64, 71, 73
Пирогов А.А. 360
Пирс Дж. 194
Пирс И.Н. 158
Пистолькорс А.А. 79, 129, 133
Питерсон У. 325
Плоткин Н. 340
Понтрягин Л.С. 153
Портной С.Л. 279
Прайс Р. 158
Прейндж Е. 354
Прелов В.В. 65
Проакис Дж.Г. 248
Пугачев В.С. 109

Р

Рагазини Дж. 73, 217, 226
Райс С.О. 31, 33, 36, 45, 49, 76, 94, 106, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 140
Рамсей Дж.Л. 354
Рао К.Р. 256
Рахович Л.М. 233
Рейнал Дж. 122, 214, 218
Рейффен Б. 58, 64
Репин В.Г. 146
Ривс А.Г. 308
Рид И.С. 187
Риссанен Дж. 332
Родер Г. 133, 219
Розевиг В.Д. 215
Рой-Чоудхури Д. 187, 324
Рыгов С.М. 222
Рябко Б.Я. 352

С

Сапожков М.А. 315
Сверлинг П. 256
Сигерт А. Дж. 214
Сильверман Р. 337
Симон М. 238
Сифоров В.И. 47, 59, 77, 117, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138
Слепян Д. 49, 122, 123, 187
Смирнов В.А. 130
Смит Дж. 237
Снайдер Д. 146, 271
Солодовников В.В. 226
Соломон Г. 187
Сосулин Ю.Г. 92, 143
Софман Л.Б. 295
Стоун Дж. 329
Стратонович Р.Л. 34, 36, 45, 73, 76, 92, 93, 94, 106, 139, 140

Т

Таллер В. 351
Тартаковский Г.П. 92

Тафтс Д.В. 250
Тихонов В.И. 34, 94, 106, 149, 270
Томас Дж. 47
Трифонов А.П. 257
Трофимов В.К. 302
Трофимов Ю.К. 315
Туриш Дж. Л. 158, 223, 244

У

Унгербок Г. 238, 273, 354

Ф

Файер П. 329
Файнштейн А. 195, 294, 351
Фалькович С.Е. 92
Фано Р.М. 27, 64
Фельдман Г.Б. 240
Финк Л.М. 25, 27, 100, 158
Фитингоф Б.М. 302
Фокс Р.Ф. 210
Фокс У. 232
Фомин А.Ф. 256
Фомин А.Я. 94, 214
Форни Д. 54, 250, 332, 333, 354
Фрай Т. 180, 209
Фрис Г.Т. 240

Х

Харисов В.Н. 154, 270
Хартли Р. 113, 117
Хаффмен Д. 292
Хворостенко Н.П. 158, 235
Хегельбергер Д. 327
Хелстром К.В. 53, 119
Хелгерт Г.Г. 325, 354
Хинчин А.Я. 45, 62, 71, 72, 177
Хмельницкий Е.А. 274
Ховард Дж. 260
Хоквингем А. 187
Хуанг Дж. 312
Хэмминг Р. 49, 184
Хэнкок Дж. 248, 250, 274, 275

Ц

Цареградский Л.П. 351
Цирлер Н. 324
Цуккерман И.И. 301
Цыбаков Б.С. 63

Ч

Чанг Р. 250
Чанг С.С. 343
Чейз Д. 338

Ш

Шалсейс П.М. 312
Шахгильдян В.В. 144, 215
Шеннон К. 36, 45, 47, 49, 58, 62, 63, 73, 82, 83, 113, 118, 119, 120, 122, 123, 125, 134, 140, 195
Шляпоберский В.И. 164, 353
Шольц 238
Шоттки В. 114

Штарьков Ю.М. 172
Штейн С. 158
Штейнхаус Г. 312
Шулейкин М.В. 284
Шумская Н.Н. 99, 104
Шуценберг М. 312

Щ

Щукин А.Н. 23, 100

Э

Элайс П. 49, 164, 195
Эпштейн М.А. 329
Эрман Л. 212
Эспозито Р. 108

Я

Яглом А.М. 46, 71, 73
Янг Г. 260
Ярльков М.С. 146, 270

Список сокращений

Русские аббревиатуры

АМ	– амплитудная модуляция
АМн	– амплитудная манипуляция
АПН	– Академия педагогических наук
АН	– Академия наук
АТС	– автоматическая телефонная станция
БИКМ	– блочная ИКМ
БЧХ	– коды Боуза, Рой-Чоудхури, Хоквингема
ВВИА	– Военно-воздушная инженерная академия им. проф. Н.Е. Жуковского
ВКАС	– Военная Краснознамённая академия связи
ВЧ	– высокие частоты; высокочастотный
ГПИ	– Горьковский политехнический институт
ГТОП	– гауссовская теория оптимального приема
ДЕК	– декодер
ДИКМ	– дельта ИКМ
ДКП	– дискретное косинус-преобразование
ДМ	– дельта-модуляция
ДН	– диаграмма направленности
ДОФМ	– двойная относительно фазовая модуляция
ЕАСС	– единая автоматизированная сеть связи
ДЧТ	– двухканальное частотное телеграфирование (манипуляция)
ИВИМ	– интервально-временная импульсная модуляция
ИКМ	– импульсно-кодовая модуляция
ИОС	– информационная обратная связь
ИППИ	– Институт проблем передачи информации (РАН)
ИРПА	– Институт радиовещательного приёма и акустики
ИРЭ	– Институт радиотехники и электроники (РАН)
КА	– космический аппарат
КАМ	– квадратурно-амплитудная модуляция
КВ	– короткие волны; коротковолновый
КП	– компенсатор помех
КОД	– кодирующее устройство
КУ	– Калифорнийский университет
ЛВВИА	– Ленинградская военно-воздушная инженерная академия
ЛПДИ	– лаборатория передачи дискретной информации
ЛСПИ	– лаборатория систем передачи информации
ЛЭИС	– Ленинградский электротехнический институт связи
МГУ	– Московский государственный университет
ММС	– манипуляция минимального частотного сдвига

МОД	– модулятор
МСИ	– межсимвольные искажения
МСЭ	– Международный союз электросвязи
МТИ	– Массачусетский технологический институт
МТОП	– марковская теория оптимального приема
МТУСИ	– Московский технический университет связи и информатики
МЭ	– мажоритарный элемент
МЭИ	– Московский энергетический институт
МЭИС	– Московский электротехнический институт связи
НАСА	– Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (США)
НИИР	– Научно-исследовательский институт радио
НТОРЭС	– Научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова
ОБП	– одна боковая полоса
ОКБ	– особое конструкторское бюро (МЭИ)
ОМПД	– оптимизированный многопороговый декодер
ОС	– обратная связь
ОСР	– обратная связь по решению
ОСЧ	– обратная связь по частоте
ОФМ	– относительная фазовая манипуляция
ОЭИС	– Одесский электротехнический институт связи
ПГАТИ	– Поволжская государственная академия телекоммуникаций и информатики
РАН	– Российская академия наук
РКМ	– решетчатая кодовая модуляция
РОС	– решающая обратная связь
РРЛ	– радиорелейные линии
РС	– коды Рида–Соломона
РТС	– радиотехнические системы
РТФ	– радиотехнический факультет
РЧС	– радиочастотный спектр
РЭС	– радиоэлектронное средство
СВЧ	– сверхвысокие частоты
СК	– свёрточные коды
СКК	– сигнально-кодовые конструкции
ТВ	– телевидение; телевизионный
ТВЧ	– телевидение высокой четкости
УКВ	– ультракороткие волны
УРСИ	– Международный научный радиосоюз
ФАМ	– фазово-амплитудная модуляция
ФАПЧ	– фазовая автоподстройка частоты
ФИМ	– фазово-импульсная модуляция
ФМ	– фазовая модуляция
ФМн	– фазовая манипуляция
ЦНИИС	– Центральный научно-исследовательский институт связи

ЦРВ	– цифровое радиовещание
ЦРЛ	– Центральная радиолaborатория
ЧМ	– частотная модуляция
ЧМн	– частотная манипуляция
ЧУ	– частотное уплотнение
ШИМ	– широтно-импульсная модуляция
ШПС	– широкополосная передача сигналов
ЭМС	– электромагнитная совместимость
ЮКУ	– Южнокалифорнийский университет

Английские аббревиатуры

ARQ	– Automatic Request Queuing (метод передачи цифровых сигналов с автозапросом)
AIEE	– American Institute of Electrical Engineers
CDMA	– (Code Division Multiple Access (кодовое уплотнение каналов)
DAB	– Digital Audio Broadcasting (цифровое звуковое вещание)
ETSI	– European Telecommunications Standards Institute
HD-MAC	– High Definition Multiplexed Analogue Component
IEEE	– Institute of Electrical and Electronics Engineers
JPL	– Jet Propulsion Laboratory (лаборатория реактивных двигателей)
MPEG	– Moving Picture Expert Group
MUSA	– Multiple Sub-Nyquist Sampling Encoding
NICAM	– Near Instantaneous Companded Audio Multiplex
VSAT	– Very Small Aperture Terminal (антенны с малой апертурой)