

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. Заслуживает также внимания 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 Допплера. 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. Экерслеем [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.

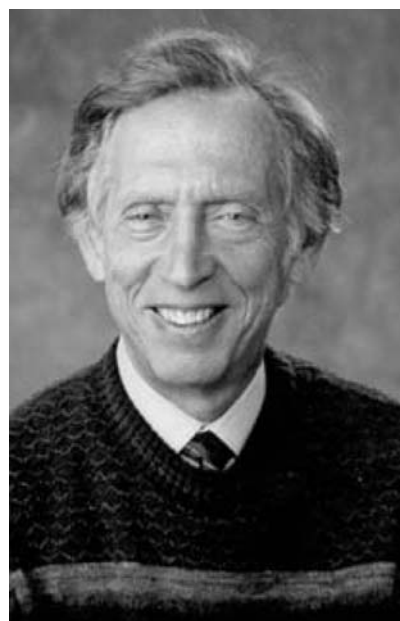
Идеи использования обратной связи по решению для измерения параметров канала связи появились еще в 50-х гг. Адаптивные системы разнесенного приема, в которых применялась обратная связь по решению, были исследованы в работах Дж. К. Хэнкока и В.К. Линдсея [6] и Дж. Г. Проакиса, П.Р. Дроуилхела и **Р. Прайса** [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^* .