**История развития теории оптимального приема многопозиционных сигналов**

М. А. Быховский

"Кто делает упорные усилия, чтобы взойти на вершину совершенства, тот никогда не восходит на нее один, но всегда ведет за собой, как доблестный вождь, бесчисленное воинство".

Св. Тереза Авильская

В статье дан краткий очерк истории открытия теории потенциальной помехоустойчивости - одной из интеллектуальных вершин в области телекоммуникаций. Эта вершина была покорена несколькими учеными - российским академиком В. А. Котельниковым и американскими и английскими учеными А. Зигертом, Д. Мидлтоном, П. Вудвортом и И. Дейвисом.

Приведенные в эпиграфе слова святой Терезы - монахини, жившей в XVI веке в Испании, как нельзя лучше характеризуют тот процесс, который был инициирован в электросвязи этими людьми.

Созданная теория открывала новую обширную область научных исследований, имеющих важное практическое значение. Тысячи специалистов, повинуясь своему творческому инстинкту и как бы услышав призыв великого итальянского поэта Данте Алигьери:

"Тот малый срок, пока еще не спят

Земные чувства, их остаток скудный

Отдайте постиженью новизны...

Вы созданы не для животной доли,

Но к доблести и к знанью рождены..."

последовали за первооткрывателями в эту область, связав с ней свою профессиональную судьбу. Результатом многочисленных исследований во вновь открытой области, выполненных за последние 50 лет, явился огромный прогресс в развитии техники телекоммуникаций.

В этой статье дан краткий очерк истории развития одного из разделов этой теории, относящегося к приему дискретных сигналов в канале без замираний.

**Прием сигналов в каналах с постоянными параметрами и в каналах с неопределенной фазой двухпозиционные сигналы**

Как уже упоминалось в [1], в первой работе В. А. Котельникова [2] по теории потенциальной помехоустойчивости рассматривались задачи приема сигналов в канале с постоянными и точно известными параметрами. Котельников рассматривал по существу системы приема сигналов, в которых применяется синхронное детектирование.

Однако синхронный прием возможен лишь в том случае, когда система синхронизации весьма точно отслеживает все изменения фазы принимаемого сигнала. Последнее предположение, строго говоря, неправомерно, так как любой системе фазовой автоподстройки частоты свойственны флуктуации и скачки фазы формируемого на ее выходе опорного сигнала. До середины 50-х годов проблема реализации синхронного приема сигналов оставалась нерешенной. Для передачи дискретных сообщений на практике применялись сигналы с амплитудной и частотной модуляцией (AM и ЧМ), прием которых осуществлялся путем их 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.

По-видимому, первой работой, в которой содержались результаты исследований вопросов приема сигналов в канале с неопределенной фазой, явилась фундаментальная статья американских ученых У. Петерсона, Т. Бирдзолла и У. Фокса, в которой были приведены 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 [3], в которой рассмотрел одну специфическую задачу некогерентного приема широкополосных сигналов и сопоставил помехоустойчивость когерентного и некогерентного приема таких сигналов.

Всесторонние исследования вопросов приема сигналов в канале связи с неопределенной фазой сигналов выполнил в середине 50-х годов выдающийся российский ученый Л. М. Финк. Он нашел структуру оптимальных демодуляторов и получил формулы, определяющие их помехоустойчивость. Полученные им результаты вошли в его широко известную в СССР монографию, первое издание которой было опубликовано в 1963 г., а второе [4] - в 1970 г. 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 ЧМ с использованием частотного дискриминатора. Подобные исследования были выполнены также американскими учеными В. Р. Бенетом и Дж. А. Залтцем.

Возможность повышения помехоустойчивости приема сигналов в результате применения синхронного детектирования была осознана инженерами еще задолго до появления теории Котельникова. В течение многих лет, начиная с 30-х годов этого века, ученые и инженеры пытались реализовать принципы когерентного приема сигналов ФМ. В книге [5] 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, посвященная вопросам фазовой селекции сигналов. Первую практическую схему синхронного приема осуществил в 1932 г. французский инженер О. Бельсиз [9].

Важные изобретения и исследования в области синхронного приема дискретных сигналов были сделаны советскими учеными А. А. Пистолькорсом, В. И. Сифоровым, Е. Г. Мамотом и Д. В. Агеевым в 1933-1935 гг. Однако реализовать синхронный прием сигналов с фазовой модуляцией (ФМ) не удавалось, так как не были найдены способы устранения "обратной работы" при формировании опорного сигнала, необходимого для реализации когерентного детектирования.

В 1954 г. в России профессором Н. Т. Петровичем было сделано важное изобретение, позволившее применить идеи синхронного приема на практике [5]. Суть этого изобретения состояла в том, что текущая 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-фазовая модуляция" (ОФМ).

Российский ученый Ю. Б. Окунев (ЛЭИС) в 1966 г. обобщил разностный 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 передача сигналов осуществляется с движущегося на большой скорости объекта (с борта самолета или спутника) и возникает эффект Доплера. Им же была исследована помехоустойчивость приема таких сигналов.

В течение почти десяти лет многими учеными велись исследования помехоустойчивости приема сигналов ОФМ. Были рассмотрены разные алгоритмы приема и получены формулы, определяющие вероятность ошибочного приема, изучено группирование ошибок, свойственное этому методу передачи сигналов, рассмотрены вопросы реализации устройств для их приема. Исследовалась также двойная относительно-фазовая модуляция (ДОФМ) - метод передачи, при котором фаза передаваемого сигнала от посылки к посылке изменяется на 45°.

В России многие важные результаты, относящиеся к приему сигналов ОФМ и ДОФМ, были получены Л. М. Финном [4], Н. П. Хворостенко [6] и американским ученым К. Р. Каном.

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 [7] обобщены основные, полученные к тому времени теоретические и практические результаты, касающиеся систем передачи и приема сигналов с ОФМ.

Важные результаты в этом направлении получены американскими учеными К. Р. Каном и К. В. Хелстромом, которые первыми исследовали вопросы помехоустойчивости синхронного приема в условиях, когда фаза опорного сигнала, подаваемого на синхронный детектор, испытывает флуктуации из-за действия шумов. С. Штейн предложил обобщенную методологию анализа помехоустойчивости приема сигналов в каналах с неопределенной фазой, которая применима к сигналам как с ЧМ, так и с ОФМ. Методы передачи и приема дискретных сигналов ОФМ и ДОФМ нашли весьма широкое применение во многих системах связи.

Весьма важная разработка синхронной системы связи, названной "Кинеплекс", была выполнена в 1954-1956 гг. американской фирмой Collins Radio. В этой системе, которая явилась значительным достижением в технике связи, была применена ОФМ. В полосе частот одного телефонного канала формировался многочастотный сигнал, состоящий из 20 несущих колебаний, расположенных с интервалом ПО Гц [8]. 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 1 ГГц, передавать информацию со скоростью 0, 6 бит/с. В работе Лаутона была исследована помехоустойчивость приема сигналов в этой системе.

Системы, подобные "Кинеплексу", для передачи данных по коротковолновым линиям связи были разработаны и в России [7, 9].

В 80-х гг. Европейским институтом стандартизации на принципах, заложенных в системе "Кинеплекс", были разработаны стандарты на цифровые системы звукового и телевизионного вещания, которые в XXI веке во всех странах Европы придут на смену действующим сегодня аналоговым системам.

С конца 60-х гг. цифровые системы с ОФМ и ДОФМ начинают широко применяться в спутниковых и радиорелейных линиях связи.

В 60-х гг. в США был изобретен метод передачи сигналов, названный ЧМ с непрерывной фазой [10]. 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 ±90°. Особенностью ЧМ с непрерывной фазой, по сравнению с методами передачи, основанными на скачкообразном изменении фазы сигнала, является высокая компактность спектра сигнала, передаваемого по каналу связи. Это облегчает решение проблем электромагнитной совместимости систем связи, в которых для передачи информации используются смежные частотные каналы. Метод ЧМ с непрерывной фазой применяется в системах спутниковой связи. Кроме того, он используется для передачи сигналов в получивших глобальное распространение сотовых системах подвижной связи стандарта GSM, услугами которых ежедневно пользуются десятки миллионов людей во многих странах мира.

**М-позиционные сигналы**

Оптимальные системы связи с М-позиционными сигналами (М-сигналами) (ортогональными и симплексными) впервые были предложены и исследованы В. А. Котельниковым. Значение теории приема М-сигналов состоит в том, что в системах связи, где они используются, можно достичь тех предельных характеристик качества приема, на которые впервые в 1948 г. указал создатель теории информации [11], крупнейший современный ученый в области связи К. Шеннон. Он показал, что в оптимально построенной системе связи возможна безошибочная передача информации в том случае, если выполняется условие

R = (ln М)/Т < С = F ln (1 + Рs/Рn),

где R - скорость передачи М-сигнала, Т - время передачи (стремящееся к бесконечности), С - пропускная способность канала связи, F - полоса частот канала связи, Рs и Рn - мощности полезного сигнала и шума, действующего в канале.

Доказательство этого положения в [11] не носило конструктивного характера, так как не указывались способы передачи и приема сигналов в такой системе связи.

В 1950 г. знаменитый американский ученый С. О. Раис - один из создателей современной статистической радиотехники, опубликовал работу, в которой рассмотрел оптимальный прием М-сигналов в TV-мерном пространстве (N = 2FT). Поскольку методы построения оптимального ансамбля М-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 весьма важную зависимость: Рош = f(R,С,N). Статьей Раиса был наведен мост между теорией оптимального приема и теорией информации. Эта статья сыграла весьма важную роль в их дальнейшем развитии. Работа Раиса показывала, что теория потенциальной помехоустойчивости может служить инструментом для конструктивного доказательства положений теории информации, касающихся пропускной способности каналов связи. Результаты Раиса были развиты рядом крупных ученых.

В 1955-1958 гг. известные советские ученые Э. Л. Блох, академик А. А. Харкевич и Н. К. Игнатьев, используя математическую теорию плотнейшего заполнения TV-мерного пространства равными шарами, нашли ряд оптимальных ансамблей М-сигналов, позволяющих передавать сообщения в каналах с белым гауссовским шумом. В 1959-1963 гг. Шеннон, А. В. Балакришнан и Д. Слепян опубликовали работы, в которых были развиты методы вычисления зависимости Pош = f(R,C,N) сделаны важные выводы о потенциальной помехоустойчивости оптимального приема М-сигналов. Многочисленные результаты, связанные с проблемой передачи и приема М-сигналов, полученные до 1966 г., были отражены в книге известных советских специалистов К. А. Мешковского и Н. Е. Кириллова [12].

Проблема вычисления вероятности ошибочного приема для М-сигналов весьма сложна в математическом плане, и до 70-х гг. продолжаются исследования, в которых развиваются методы получения достаточно точных оценок зависимости Pош = f(R,С,N) для таких сигналов. Наиболее важные результаты в этом направлении получены американскими учеными А. Г. Нутталлом, исследовавшим помехоустойчивость когерентного и некогерентного приема равно коррелированных М-сигналов, и Галлагером [13], разработавшим метод оценки сверху Pош при приеме М-сигналов. Другой эффективный метод оценки сверху Pош при приеме произвольных М-сигналов разработан в [14]. В этой работе рассмотрен ряд примеров его применения для конкретных систем связи, работающих в каналах с замираниями и без замираний.

В конце 50-х - начале 60-х гг. продолжались исследования помехоустойчивости приема ортогональных и биортогональных М-сигналов в TV-мерном пространстве (М = N и М = 2N соответственно) и М-сигналов в двухмерном пространстве. Применение М-сигналов при М > 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.

Л. М. Финком и B. C. Котовым получены результаты, определяющие потенциальную помехоустойчивость приема четырехпозиционных сигналов с ЧМ [сигналов ДЧТ-двуканального частотного телеграфирования (модуляции)] в каналах с неопределенной фазой при произвольном законе флуктуации 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.

Следует особо выделить работы Кана [15], Компопиана и Глазера [16] и Смита [17], в которых в 60-х гг. были предложены и исследованы весьма важный класс двухмерных М-сигналов с амплитудно-фазовой (ФАМ-сигналы) и квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ-сигналы). Такие сигналы, при выполнении условия М >> N, позволяют намного эффективнее использовать полосу частот канала связи, отведенную для их передачи, по сравнению с сигналами ЧМ и ФМ. Сигналы КАМ весьма просты в реализации, и при М = 16...256 они нашли широкое применение в современных цифровых системах связи и, в частности, радиорелейной.

В это же время разворачиваются обширные исследования по синтезу N-мерных М-сигналов, позволяющих с высокой эффективностью использовать полосу частот канала связи и имеющих высокую помехоустойчивость приема. По существу происходит синтез идей теории модуляции и теории кодирования.

Американский ученый Слепян [18] был одним из первых, кто предложил метод построения ансамбля сигналов для случая, когда N и М имеют произвольные значения и М >> N. Все сигналы этого ансамбля получаются из одного в результате перестановок его символов. Этот метод Слепян назвал перестановочной модуляцией. Он показал возможность достижения высокой помехоустойчивости приема сигналов при их передаче этим методом.

В США И. Ридом и С. Шольцем, В. К. Линдсеем и М. К. Симоном в общем виде исследована помехоустойчивость приема "в целом" ансамбля М-сигналов, в которых отдельные сигналы содержат L ортогональных компонентов. Каждый из них может иметь АГ-кратную ФМ (М = LK).

Ленинградским ученым В. В. Гинзбургом были предложены новые сигнально-кодовые конструкции М-сигналов (СКК), в которых применялись многократная ФМ и различные виды корректирующих кодов. Новый подход к созданию СКК, основанный на использовании определенного правила двоичного представления сигнальных точек при разбиении используемого ансамбля сигналов на вложенные подансамбли с увеличивающимся минимальным расстоянием, был предложен Унгербоеком [19].

Интенсивные теоретические исследования СКК были выполнены в 80-х гг. советскими учеными В. Л. Банкетом, В. В. Зябловым и С. Л. Портным. Ими 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 вошли в книги [20, 21].

**Заключение**

Прошло немногим более 50 лет с момента зарождения теории потенциальной помехоустойчивости и теории информации, у истоков которых стоят два выдающихся современных ученых В. А. Котельников и К. Е. Шеннон. В открытую ими новую область устремились сотни ученых, и сегодня виден тот колоссальный прогресс, который достигнут благодаря их усилиям.

Можно, по-видимому, утверждать, что именно в области теории оптимального приема М-сигналов были получены наиболее значительные для прогресса в области телекоммуникаций результаты, который без нее был бы недостижим. Эти результаты, являющиеся итогом коллективного интернационального труда многих исследователей, состоят в следующем:

сконструированы двухмерные сигналы (ЧМ с непрерывной фазой, ФАМ и КАМ-сигналы) и исследована их помехоустойчивость;

исследована помехоустойчивость приема ортогональных сигналов и двухмерных М-сигналов с ФМ;

разработаны методы оценки Pош в системах приема М-сигналов, которые позволили оценивать помехоустойчивость приема различных ансамблей сигналов и обоснованно выбирать соответствующие ансамбли для конкретных систем связи;

разработаны методы синтеза сигнально-кодовых конструкций, применение которых в системах связи позволяет достичь предельных характеристик, определяемых законами теории потенциальной помехоустойчивости и теории информации.

На примере истории развития этих теорий отчетливо можно видеть, как ноосфера - сфера идей активно взаимодействует с жизненной сферой, в которой эти идеи воплощаются в конкретные материальные объекты, изменяющие условия существования миллионов людей на Земле. Названные выше результаты в короткое время послужили основой для разработки и внедрения принципиально новых систем телекоммуникаций, с которыми человечество входит в XXI век.

Поистине прав был Данте, когда в XV веке писал:

"Все, что умрет, и все, что не умрет, -

Лишь отблеск Мысли, коей Всемогущий

Своей Любовью бытие дает."

Действительно, Мысль нескольких первооткрывателей теории потенциальной помехоустойчивости и теории информации породила у многочисленных их последователей мощный поток идей. Эти идеи, в свою очередь, получили материальное воплощение в вызывающем изумление прогрессе техники связи, произошедшем за последние годы.

Выше были упомянуты лишь некоторые исследователи, внесшие, по мнению автора, наиболее значительный вклад в развитие идей первооткрывателей. Однако общее число исследователей и опубликованных ими работ в рассматриваемом в данной статье направлении весьма велико. Следует отметить, что ряд результатов был получен в работах, выполненных независимо примерно в одно и то же время разными учеными в разных странах, и далеко не всегда проводимые исследования были направлены на решение практически значимых задач. Весьма часто этими людьми двигали внутренние импульсы, их творческий инстинкт и любовь к Истине.

В нашем раздираемом противоречиями мире может показаться поразительной сама возможность согласованного выполнения столь огромной созидательной научной работы обширным коллективом 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. Однако это подтверждает глубокую истину Библии о единстве всех живущих на Земле людей, их помыслов, устремлений к добру и совершенству.

Рассмотренная выше история убедительно свидетельствует, что в нашем Мире непреложно действует установленный Всевышним закон созидательной сущности человека, стремящегося не к разрушению, а к совершенствованию себя и совершенствованию этого Мира.

**Список литературы**

Быховский М. А. Очерк истории создания теории потенциальной помехоустойчивости // Электросвязь. - 1998. - № 5.

Котельников В. А. Теория потенциальной помехоустойчивости. - М.: Госэнергоиздат, 1956.

Котельников В. А. Сигналы с максимальной и минимальной вероятностями обнаружения // Радиотехника и электроника. - 1959. - № 3.

Финн Л. М. Теория передачи дискретных сообщений. - М.: Сов. радио, 1970.

Петрович Н. Т. Передача дискретной информации в каналах с фазовой манипуляцией. - М.: Сов. радио, 1965.

Хворостенко Н. П. Статистическая теория демодуляции дискретных сигналов. - М.: Связь, 1968.

Заездный Л. М., Окунев Ю. Б., Рахович Л. М. Фазо-разностная модуляция. - М.: Связь, 1967.

Doezl M., Heald E., Martin D. Binary Data Transmision Techniques for Linear Systems // Proc. IRE. V. 45. - 1957. - May.

Институт военной связи. История и современность (1923-1998). - Мытищи, 1998.

De Buda R. Coherent Demodulation of Frequency-Shift Keying with Low Deviation Ratio // IEEE Trans. COM-20. - 1972. - № 6.

Shannon C. Mathematical Theory of Communication // BSTJ. - 1948. - Vol. 27. - № 3.

Мешковский К. А., Кириллов Н. Е. Кодирование в технике связи. - М.: Связь, 1966.

Gallager R. G. A Simple Derivation of the Coding Theorem and Some Applications // IEEE Trans. IT-11. - 1965. - Jan.

Быховский М. А. Оценка вероятности ошибочного приема в многопозиционных системах связи // Труды НИИР. - 1973. - № 4.

Cahn С. R. Combined Digital Phase and Amplitude Modulation Communication Systems // IRE Trans. CS-8. - 1960. - Sept.

Campopiano C. N., Glazer B. C. A Coherent Digital Amplitude and Phase Modulation Sheme // IRE Trans. CS-10. - 1962. - March.

Smith J. G. Odd-Bit Quadrature Amplitude Shift Keying // IEEE Trans. COM-23. - 1975. - March.

Slepian D. Permutation Modulation. // Proc IEEE. - 1965. - № 3.

Ungerboeck G. Chanel Coding with Multilevel Phase Signal // IEEE Trans. Inform. Theory. - 1981. - № 1.

Зюко А. Г., Фалько А. И., Панфилов И. П., Банкет В. Л., Иващенко Л. В. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации. - М.: Радио и связь, 1985.

Зяблов В. В., Коробков Д. Л., Портной С. Л. Высокоскоростная передача сообщений в реальных каналах. - М.: Радио и связь, 1991.