

ИсТ

АКАДЕМИЯ

СОВРЕМЕННЫХ

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ

ТЕХНОЛОГИЙ

ИсТ Исторические аспекты развития телекоммуникаций

ИсТ.13 История развития техники радиосвязи и вещания, теории связи. Часть 1. Теория связи
(количество частей – 1, число страниц - 13)

ИсТ.13

Введение

... Алиса рассмеялась.

- Это не поможет! - сказала она. - Нельзя поверить в невозможное!

- Просто у тебя мало опыта, - заметила Королева. - В твоём возрасте я уделяла этому полчаса каждый день! В иные дни я успевала поверить в десяток невозможностей до завтрака!

**Льюис Кэрролл,
"Алиса в стране чудес"**

В XX столетии произошел поразительный прогресс в области радиосвязи и вещания. В начале и даже в середине этого века в возможность такого прогресса невозможно было поверить, так как он выглядел бы фантастикой и его не смог бы предсказать никто даже из самых проницательных ученых.

Действительно, в интересных воспоминаниях знаменитого американского инженера Х. С. Блэка, изобретателя усилителей с обратной связью и разработчика многоканальных систем связи, упоминается, что в 40-х годах специалисты лаборатории Белла ему "советовали не тратить время на разработку девятиканальных систем, поскольку максимум того, что когда-либо потребуют эксплуатационники, - это три канала". Время не оправдало прогнозов практиков, и сегодня созданы системы для передачи десятков и сотен тысяч высокоскоростных каналов.

В 1945 году, когда только начиналось освоение диапазона частот до 10 ГГц, академик Б. А. Введенский писал: "Ёмкость диапазона УКВ огромна. Действительно, если во всем диапазоне длинных, средних и коротких волн могут быть размещены 3000 телефонных каналов, то в диапазоне УКВ от 10 м до 3 см можно разместить 1000000 телефонных и 1500 телевизионных каналов!.. Появляется возможность организации в диапазоне УКВ практически неограниченного количества каналов связи". Академик Б. А. Введенский в 1945 году не мог предположить, что открывающиеся возможности развития радиосистем всего через полвека окажутся почти полностью исчерпанными. Сегодня диапазон частот ниже 10 ГГц весьма сильно перегружен действующими радиосистемами, и сейчас активно осваивается диапазон частот до 60 ГГц.

В начале века только в некоторых крупных городах существовал телеграф, и поэтому возможности установления связи между корреспондентами были весьма ограничены. Сегодня уже сотни миллионов людей на Земле имеют возможность

пользоваться сотовой связью, передавая речь и данные; за последнее десятилетие появились сотни миллионов пользователей сети Интернет, и их число продолжает очень быстро увеличиваться; миллиарды людей пользуются услугами сетей звукового и телевизионного вещания.

Однако поражают не только результаты этого прогресса, но и тот колоссальный объем творческой и созидательной работы, который за прошедшие сто лет был выполнен десятками и, возможно, сотнями тысяч ученых и инженеров разных стран мира. То, что создано ими за прошедшее столетие, стало возможно только в результате совместных согласованных усилий. История развития человеческой культуры, частью которой является история техники, ясно показывает, что у живущих на Земле людей есть общая цель и смотрят они в будущее в одном направлении.

Лев Николаевич Толстой понимал под "религиозным чувством... ясное представление того, что должно быть" и что "это представление служит руководством в жизни" конкретного человека. Среди ученых и инженеров - создателей современной техники и теории связи можно назвать сотни имен, которые, несомненно, обладали таким чувством, так как избрали смыслом своей жизни труд, в рамках своей профессии, результат которого должен дать вклад в бесконечное развитие человеческого общества в целом. Их творческая энергия, их озарения, их духовный подвиг бессмертны, так как они не только обусловили прогресс науки и техники в XX столетии, но и открыли возможность бесконечного ряда последующих экспериментов и научных открытий.

Библия рассказывает, что всего один век после потопа люди жили, когда "вся земля была - язык один и слова одни". Через сто один год после потопа люди впали в грех самовозвеличивания и стали возводить до самых небес Вавилонскую башню, затеяв деятельность ради деятельности. В наказание Всевышний разделил человечество на народы и языки. Тысячелетия, прошедшие после потопа, человечество шло через вражду, непонимание и жестокие войны к постижению той простой истины, что у людей нет причин для ненависти друг к другу, что все они - команда одного корабля: планеты Земля, несущейся в космическом пространстве. И хочется верить, что XXI век станет веком объединения всех живущих на Земле людей. Предпосылки для такого объединения созданы многовековыми достижениями всей человеческой культуры, и в частности, изобретениями и открытиями в области электросвязи, сделанными в XX столетии.

Прогнозы показывают, что в начале XXI века значительная часть жителей Земли получит возможность, используя современную технику связи, мгновенно связываться друг с другом, получать, используя всемирную сеть Интернет, интересующую информацию из многочисленных банков данных, формируемых в разных странах, решать возникающие деловые проблемы, создавать локальные компьютерные и производственные сети связи. Вновь возникнет утраченная тысячи лет тому назад глобальная возможность общения всех живущих на Земле людей. В XXI веке возникнет Глобальное Информационное Общество, которое будет создаваться при активной государственной поддержке всех стран в кооперации с такими международными организациями, как Международный союз электросвязи, Международная организация стандартизации и Всемирная торговая организация. В Информационном Обществе будут приняты во внимание интересы и потребности всего человеческого сообщества.

Подобно тому, как в результате открытия в XVI веке книгопечатания произошло широкое распространение новых гуманистических идей и научных знаний, вызвавших глубочайшие изменения в жизни нашей цивилизации, создание Глобального Информационного Общества окажет огромное стимулирующее влияние на развитие экономики, культуры, социальных и политических институтов во всех странах нашей планеты.

Рассмотрим основные этапы впечатляющей истории развития техники радиосвязи и вещания, теории связи за прошедшие сто лет, а также перспективы развития этих областей в первом десятилетии XXI века.

Теория связи

Перед чем останавливаешься и замираешь в священном трепете и безмолвном уважении - это перед миром мысли. Ибо мир мысли - единственная реальность в том водовороте привидений и призраков, который зовется реальным миром.

Иво Андрич

Электросвязь относится к сфере высоких технологий и ее развитие в значительной степени обусловлено достижениями в области теории связи. Конечно, многие важные изобретения и системы были предложены и созданы инженерами, исходя из соображений интуитивного характера еще до появления строгой теории. Весьма часто многие из выдвинутых идей, которые сегодня

воспринимаются специалистами как азбучные истины, опережали время и оказывались востребованными только спустя десятилетия после своего рождения. Фундаментальные положения современной теории связи формировались постепенно в результате жарких и продолжительных дискуссий между учеными. Однако в итоге полученные в этой теории результаты в значительной степени определили колоссальный прогресс в области электросвязи, достигнутый в XX столетии.

Можно выделить несколько разделов теории связи, оказавших существенное влияние на создание систем радиосвязи и вещания в XX столетии: теория сигналов (теория модуляции), к которой относятся спектральный анализ, теория аналитического сигнала и теорема отсчетов; статистическая радиотехника; теория потенциальной помехоустойчивости и теория информации. Эти разделы определяют фундаментальные законы передачи и приема аналоговых и цифровых сигналов в различных каналах связи и дают адекватный математический язык для описания этих законов.

Теория сигналов

Первые теоретические исследования в области связи сформировали важнейшие и общепринятые сегодня понятия, касающиеся спектров сигналов. Впервые существование боковых полос частот в спектре амплитудно-модулированных (АМ) колебаний установил в 1916 году русский ученый, а впоследствии советский академик М. В. Шулейкин.

Концепция спектра колебаний, излучаемых в эфир, в течение почти пятнадцати лет вызвала ожесточенные дискуссии между учеными. Противником ее использования был, в частности, такой крупный специалист в области радиосвязи, как изобретатель вакуумного диода Дж. А. Флеминг. Значительный вклад в утверждение этой концепции сделал известный американский ученый Дж. Р. Карсон, впервые определивший и исследовавший спектр ЧМ сигналов. Советские ученые академик Л. И. Мандельштам и член-корреспондент АН СССР С. М. Рытов дали четкую и физически ясную трактовку основных понятий спектрального анализа и способствовали их внедрению в обиходный инженерный язык.

Значительное количество теоретических работ было выполнено для нахождения спектра частотно-модулированных (ЧМ) колебаний. Это связано с тем, что начиная с 30-х годов и почти до самого конца XX века на базе ЧМ создавались системы вещания и огромное количество систем радиосвязи самого разного назначения. Важные исследования в данном направлении были выполнены Дж. Р.

Карсоном и Е. И. Манаевым, установившими формулы для ширины полосы частот, занимаемой ЧМ сигналом, С. В. Бородичем и Р. Г. Меджерстом, определившими спектр ЧМ сигнала для случая, когда по радиорелейной или спутниковой линии связи передается сигнал многоканальной телефонии. При этом модулирующий сигнал представляет собой случайный гауссовский процесс с ограниченным спектром.

Ученые многих стран провели многочисленные исследования, направленные на определение спектров сигналов, модулированных по амплитуде, фазе и частоте цифровыми сигналами, а также спектров сигналов, применяемых в системах связи с импульсными видами модуляции (фазово-импульсной, широтно-импульсной и т. д.).

Поскольку в электросвязи используются сигналы с ограниченным спектром, для их адекватного математического представления во временной области было введено важное понятие аналитического сигнала (АС), основанного на использовании преобразования Гильберта. Широкое использование АС в теории связи началось с 1962 года, после работ американского ученого Е. Бедрояна. Однако впервые АС был введен в теорию модуляции в 1951 году советским ученым И. С. Тетельбаумом, предложившим оптимальную амплитудно-фазовую модуляцию, о которой будет подробнее сказано в следующем разделе.

На основе АС американским ученым Г. Б. Велкером была построена оригинальная теория модуляции, в рамках которой, помимо традиционных, дано описание таких видов модуляции, как однополосная ЧМ и асимметричная амплитудная модуляция, называемая также совместимой АМ с одной боковой полосой частот (совместимая ОБП), и ряда других. Особенностью сигналов совместимой ОБП является то, что они, с одной стороны, имеют в два раза более узкий спектр по сравнению с обычной АМ, а с другой - их можно принять на обычный приемник АМ вещания с амплитудным детектором.

Советским ученым Д. Е. Вакманом было дано определение амплитуды, фазы и частоты АС и было показано, как можно создать соответствующие устройства, выделяющие эти составляющие из широкополосного низкочастотного сигнала. Такие устройства находят применение в измерительной технике. Советские ученые Л. М. Финк и В. И. Коржик обобщили понятие АС на случай, когда передаваемый по каналу сигнал имеет конечную длительность.

Одним из важнейших результатов теории сигналов является теорема отсчетов, которая в России носит имя Котельникова, а в США - Найквиста - Шеннона. Эта

теорема определяет, что любая функция, имеющая спектр, ограниченный частотой F_B , однозначно определяется мгновенными значениями, взятыми через интервалы времени, кратные $1/2F_B$. Данная теорема, установленная в 1932 году, лежит в основе многих идей, на основе которых начиная с 40-х годов XX века стали создаваться импульсные и цифровые системы связи.

Теореме отсчетов посвящены сотни работ, в которых были сделаны ее обобщения на следующие случаи:

для многомерных функций (случай, характерный, например, для телевизионных сигналов);

для функций, отсчеты которых берутся в произвольные моменты времени;

для функций, у которых берутся отсчеты как самой функции, так и ее производной;

для стохастических функций и т. п.

Значительный вклад в обобщение теоремы отсчетов внесли советские и американские ученые (СССР - Д. В. Агеев, Н. К. Игнатьев, А. А. Харкевич, Я. Г. Хургин и В. П. Яковлев; США - А. Популис, Д. А. Линден и Н. М. Абрамсон, Д. Миддлтон, А. В. Балакришнан и др.).

В середине XX века широкое распространение получили многоканальные системы, в которых в качестве переносчиков сообщений, передаваемых в отдельных каналах, используются ортогональные гармонические колебания или отдельные интервалы времени (системы с частотным или временным уплотнением). В 1935 году советский ученый Д. В. Агеев заложил основы общей теории линейной селекции сигналов. Профессор Д. В. Агеев исследовал возможности применения в качестве переносчиков других, в том числе и неортогональных, функций. Его работа предвосхитила некоторые более поздние идеи применения широкополосных сигналов в многоканальных системах связи, выдвинутые в 50-х годах и продвинутое до практического внедрения.

Статистическая радиотехника

Современная теория связи базируется на математическом аппарате теории вероятностей и случайных процессов. Специфика задач радиотехники привела к разработке статистической радиотехники - методов решения специфических вероятностных задач, связанных с обработкой сигналов в устройствах связи.

Развитие в годы Второй мировой войны радиолокации и необходимость в максимальной степени повысить чувствительность локационных приемников, работающих в условиях действия случайных шумов, стимулировали теоретические исследования, связанные с обработкой случайных сигналов в приемных устройствах, содержащих как линейные фильтры, так и нелинейные элементы, такие как детекторы, частотные дискриминаторы, ограничители и т. д. Первое фундаментальное исследование, которое положило начало широкому применению статистических методов к разнообразным проблемам обработки сигналов в присутствии случайных шумов, было опубликовано в 1944 году одним из крупнейших и разностороннейших американских ученых С. О. Райсом.

Статистическая радиотехника интенсивно развивалась многими учеными. Основные ее результаты были получены в течение двадцати лет после публикации работы Раиса. Пользуясь разработанным математическим аппаратом, современный инженер может исследовать самые сложные алгоритмы обработки как аналоговых, так и цифровых сигналов и расчетным путем определить качество приема. Это дает мощное средство для проектирования современных систем.

Значительный вклад в развитие статистической радиотехники внесли советские и американские ученые (СССР - В. И. Бунимович, Р. Л. Стратонович, Б. Р. Левин, В. С. Пугачев, В. И. Тихонов; США - Д. Миддлтон, Дж. Ф. Баррет, А. Дж. Зигерт и др.).

Апофеозом исследований в области теории связи, выполненных до 40-х годов, стали созданные в середине 40-х годов теория потенциальной помехоустойчивости Котельникова и теория информации Шеннона.

Теория потенциальной помехоустойчивости

Многочисленные исследования различных методов передачи и приема сигналов начали проводиться с середины 30-х годов. Членом-корреспондентом Академии наук СССР В. И. Сифоровым выполнены фундаментальные исследования разных методов передачи цифровых сигналов с амплитудной, фазовой и частотной манипуляцией; американскими и советскими учеными исследована помехоустойчивость систем приема ЧМ сигналов; В. И. Сифоровым определена помехоустойчивость оптимального приема импульсных сигналов.

Весьма значительное влияние на развитие теории связи оказали работы выдающихся математиков XX века А. Н. Колмогорова и Норберта Винера, которые разработали теорию экстраполяции, интерполяции и сглаживания

случайных процессов. Результаты этой теории сегодня составляют основу оптимальных методов обработки принимаемых сигналов в системах связи.

В 1947 году знаменитым советским ученым академиком В. А. Котельниковым была разработана фундаментальная теория потенциальной помехоустойчивости. Эта теория дала инженерам инструмент для синтеза оптимальных устройств обработки принимаемых сигналов на фоне шумов и помех, на ее основе были разработаны методы оценки качества приема аналоговых и цифровых сигналов в различных каналах связи. С возникновением этой теории появилась возможность создания оптимальных систем связи на твердом теоретическом основании, а не на неопределенных интуитивных представлениях, как это было до ее создания. Идеи этой теории служили руководством при создании многих современных систем связи. Ряд таких систем упоминается ниже в соответствующих разделах.

Независимо в это же время к этим идеям пришли также американские и английские ученые А. Дж. Зигерт, М. Вудворт, И. Л. Дейвис и Д. Миддлтон, которые внесли оригинальный и весьма значительный вклад в развитие этой теории и способствовали ее широкому распространению среди специалистов.

В ранних работах данная теория применялась для синтеза и анализа систем, работающих в канале связи без замираний. Однако в большинстве радиоканалов имеет место многолучевое распространение радиоволн, обуславливающее замирания уровня сигналов в месте приема. В последующие годы развитие теории происходило по следующим направлениям:

теория приема дискретных сигналов в каналах с замираниями и многолучевостью;

теория приема сигналов с аналоговой модуляцией, когда в месте приема оценке подлежит не информационный параметр, а информационный процесс;

марковская теория оптимального приема сигналов.

Сразу после создания теории потенциальной помехоустойчивости были выполнены многочисленные исследования вопросов приема цифровых сигналов в каналах с многолучевым характером распространения радиоволн. Была определена помехоустойчивость приема для всех известных методов передачи сигналов по таким каналам, найдены оптимальные методы разнесенного приема сигналов, открыта возможность создания широкополосных систем связи, в которых замирания сигналов устраняются путем разделения на приеме отдельных лучей. Все упомянутые достижения теории находили практическое

применение в разработках многих цифровых систем связи, создаваемых для работы в каналах с многолучевым распространением радиоволн и замираниями сигналов.

Наиболее значительный вклад в эти исследования в 1954-1975 годах внесли советские и американские ученые.

В области приема аналоговых сигналов было развито два направления: гауссовская и марковская теории оптимальной нелинейной фильтрации (демодуляции) сообщений.

В первом из них математической моделью сообщений служили случайные гауссовские процессы с заданным спектром. Первое исследование в данном направлении было выполнено в 1953 году в США Ф. В. Леганом и Р. Дж. Парксом. В СССР несколько позже подобные исследования опубликовали И. А. Большаков и В. Г. Репин. На основе гауссовской теории оптимальной демодуляции были синтезированы оптимальные демодуляторы для разных методов модуляции и определена их потенциальная помехоустойчивость.

Второе важное направление теории оптимальной демодуляции основывалось на описании информационных сообщений с помощью марковских случайных процессов. Это направление было открыто в 1960 году одним из крупнейших советских теоретиков в области статистической радиотехники Р. Л. Стратоновичем, учеными США Р. Е. Калманом и Р. Бьюси, рассмотревшими случай оптимальной линейной фильтрации сообщений, и Г. Дж. Кушнером, исследовавшим проблемы нелинейной фильтрации. В последующие годы оно получило серьезное развитие и применение ко многим практическим проблемам.

Результаты, полученные на основе теории оптимальной демодуляции, в последующие годы использовались для синтеза различных демодуляторов аналоговых сигналов. В конце 60-х годов значительный практический интерес представляло создание оптимальных демодуляторов ЧМ сигналов с низким порогом, обеспечивающих высокое качество приема при предельно низком уровне принимаемого сигнала. Такие демодуляторы применялись в спутниковых и тропосферных системах связи. В этом направлении советскими и американскими учеными было выполнено значительное количество теоретических и экспериментальных работ.

Теория информации

Основоположником теории информации является знаменитый американский ученый Клод Шеннон. Опубликованная им в 1948 году работа "Математическая теория связи" содержала огромное число совершенно неожиданных и плодотворных идей, развитием которых в последующие годы занимались тысячи ученых многих стран. Шеннон ввел понятие информации, содержащейся в подлежащих передаче по каналу связи сообщениях, обобщив идеи Хартли. Этот американский ученый в 1928 году предложил в качестве меры информации I , содержащейся в M сообщениях, использовать логарифмическую функцию $I = \log(M)$. Обобщение Шеннона состояло в том, что он впервые стал рассматривать статистическую структуру передаваемых сообщений и действующих в канале шумов и, кроме того, рассматривал не только конечные, но и непрерывные множества сообщений. Созданная им теория информации дает ключ к решению двух основных проблем теории связи: устранение избыточности источника сообщений и кодирование сообщений, передаваемых по каналу связи с шумами.

Решение первой проблемы позволяет устранить избыточность из сообщения, подлежащего передаче, и достичь высокой эффективности использования канала связи. В качестве примера достигаемой эффективности можно отметить, что современные, широко применяемые на практике методы устранения избыточности из сигнала телевизионного вещания (ТВ) позволяют в полосе одного аналогового ТВ канала в наземной сети вещания передавать до шести цифровых ТВ программ с коммерческим качеством.

Решение второй проблемы позволяет при заданном отношении сигнал/шум в месте приема, определяющем пропускную способность канала связи, передать по нему сообщения со сколь угодно высокой достоверностью. Для этого необходимо использовать помехоустойчивые коды, а скорость передачи информации по этому каналу должна быть меньше его пропускной способности.

В оригинальных работах Шеннона была доказана принципиальная возможность решения указанных проблем, что явилось в конце 40-х годов откровением для специалистов. Эта работа, как и работы в области потенциальной помехоустойчивости, породила целую лавину исследований, продолжающихся уже более пятидесяти лет. Советские и американские математики (СССР - А. Н. Колмогоров, А. И. Хинчин, Р. Л. Добрушин, М. С. Пинскер; США - А. Фейнштейн, Р. Галлагер, Дж. Вольфовиц) дали строгую трактовку этой теории.

Современные цифровые системы связи создаются с учетом фундаментальных законов передачи сообщений, установленных Шенноном. В соответствии с положениями теории информации в этих системах из сообщения, до его передачи по каналу связи, устраняется избыточность, а затем оно кодируется с использованием помехоустойчивых кодов. На основе этой теории были разработаны алгоритмы, позволившие значительно сократить избыточность факсимильных, речевых и телевизионных сообщений.

Огромное количество исследований, результаты которых упомянуты в приведенных ниже разделах, было посвящено созданию различных конструкций помехоустойчивых кодов и разработке достаточно простых методов их декодирования. На основании выполненных за последние полвека исследований созданы Рекомендации МСЭ по применению методов кодирования источников и помехоустойчивого кодирования в современных системах цифровой связи.

Хронология

1916 год	Исследование спектра сигналов с амплитудной модуляцией, показавшее, что в этом спектре имеется не только центральная, но и боковые частоты (Россия - М. В. Шулейкин).
1922 год	Первое исследование спектра сигналов с частотной модуляцией (США - Дж. Р. Карсон).
1928 год	Первые работы по теории связи (США - Г. Найквист, Р. Хартли).
1932 год	Строгое доказательство теоремы отсчетов (СССР - В. А. Котельников, США - К. Шеннон (1948 г.).
1935 год	Создание основ теории линейной селекции сигналов (СССР - Д. В. Агеев).
1935 год	Исследования методов передачи дискретных сообщений (СССР - В. И. Сифоров).
1946 год	Исследования помехоустойчивости приема импульсных сигналов (СССР - В. И. Сифоров).
1947 год	Создание теории потенциальной помехоустойчивости (СССР - В. А. Котельников, США - А. Зигерт, Д. Миддлтон; Великобритания - П. Вудворт и И. Дейвис).
1946-1948 годы	Исследования спектров сигналов при импульсных методах модуляции (СССР - Я. Д. Ширман, П. Г. Тагер).
1948 год	Создание теории информации (США - К. Шеннон).
1949-	Создание конструктивных методов построения помехоустойчивых кодов и методов

1991 годы	декодирования (США, СССР, Франция).
1951- 1983 годы	Разработка теории аналитического сигнала (СССР -С. И. Тетельбаум, Л. М. Финк, В. И. Коржик, Д. Е. Вакман; США - Е. Бедроян, Г. Б. Велкер).
1953- 1975 годы	Развитие теории помехоустойчивого приема дискретных сообщений (СССР - Л. М. Финк, В. С. Мельников, Д. Д. Кловский, Н. П. Хворостенко, И. С. Андронов, М. А. Быховский, Н. Е. Кирилов; США - Г. Л Турин, И. Н. Пирс и С. Штейн, Р. Прайс и П. Е. Грин, В. К. Линдсей, П. А. Белло).
1953- 1975 годы	Развитие гауссовской теории оптимальной демодуляции аналоговых сообщений (США - Д. С. Йоула, Ф. В. Леган и Р. Дж. Парке, Г. Ван Трис; СССР - И. А. Большаков и В. Г. Репин (1965 г.)).
1949- 1975 годы	Развитие теории информации (США - А. Фейнштейн, Р. Галлагер, Дж. Вольфовиц; СССР - А. Н. Колмогоров, А. И. Хинчин, Р. Л. Добрушин, М. С. Пинскер, Р. Л. Стратонович).
1960- 1975 годы	Развитие марковской теории оптимальной демодуляции аналоговых сообщений (СССР - Р. Л. Стратонович, В. И. Тихонов, Н. К. Кульман, М. С. Ярлыков; США - Р. Е. Калман и Р. Бьюси, Г. Дж. Кушнер, Г. Л. Ван Трис, В. Л. Снайдер и др.).

Автор: д.т.н., профессор Быховский М.А.