

ОСНОВОПОЛОЖНИК СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНИКИ СВЯЗИ

(к 90-летию В.А. Котельникова)¹

Н.А. Кузнецов, В.И. Нейман, И.А. Овсеевич

Вступление человечества в третье тысячелетие отмечено переходом в новую общественно-экономическую формацию, получившую название информационного общества, материально-технической базой которого являются вычислительная техника и техника связи. Эти новые технические средства обеспечивают повышение производительности общественного труда в сотни раз по сравнению с производительностью труда индустриального общества точно так же, как в свое время переход к индустриальному обществу означал повышение производительности труда в сотни раз по сравнению с производительностью аграрного общества. Создание материально-технической базы нового общества началось в недрах старой формации.

Активное развитие электросвязи началось более 150 лет назад, но на протяжении первых 100 лет средства связи развивались преимущественно на принципах аналоговой техники. Появление первых ЭВМ в середине нашего столетия дало толчок освоению цифровых методов и в технике связи. Уже тогда, несмотря на отсутствие необходимой электронной элементной базы, специалисты предсказывали переход сетей связи на цифровую технику и призывали к активным разработкам этой техники, поскольку, по их мнению, значительная доля нагрузки будущих сетей связи придется на межмашинный обмен ЭВМ. Поэтому многие страны приступили к созданию цифровых сетей связи. Однако темпы этого развития не удовлетворяли специалистов по вычислительной технике, которые начали создавать собственную технику связи. В результате возникли два самостоятельных направления развития средств связи, в которых формировались свои традиции и культура, различающиеся не только подходами и техническими средствами, но и терминологией. Например то, что связисты называют цифровыми системами передачи, вычислители называют системами передачи данных, хотя у связистов «передача данных» — это лишь одна из конкретных услуг связи среди многих других. Связисты говорят «абонентские устройства», «разделение (или уплотнение)», «связь», тогда как вычислители говорят «терминалы», «мультиплексирование», «телекоммуникации». Подобных примеров можно привести очень много, и естественно ожидать, что со временем оба направления придут к консенсусу. Связисты создали сеть телефонной связи, которую успешно переводят на цифровую технику и широко интегрируют в ней другие услуги связи. Вычислители создали сеть Интернет. Обе эти сети стали глобальными и все больше взаимодействуют одна с другой. Современная техника связи широко использует в своем составе средства вычислительной техники. Особенно широкий размах это взаимодействие получает в связи с проводимой во многих странах политикой демополизации отрасли связи.

Огромный скачок человечества в новую эпоху произошел благодаря работам нескольких первооткрывателей. Одно из первых мест в плеяде этих первооткрывателей, несомненно, принадлежит академику В.А. Котельникову.

¹ Успехи современной радиоэлектроники. 1998. № 8.

О пропускной способности эфира и проволоки

В 1933 г., в эпоху торжества аналоговой техники, молодой инженер В.А. Котельников публикует статью «О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи» [1], в которой в виде строго доказанных теорем сформулировал основные положения современной цифровой техники связи.

В первом разделе этой статьи, посвященном функциям со спектром частот от 0 до f , доказаны три теоремы (теоремы I–III) о том, что такие функции можно представить рядом мгновенных значений, отсчитываемых через промежутки времени $\Delta t = 1/2f$, что такие функции можно непрерывно передавать с любой точностью при помощи чисел, следующих одно за другим через указанные промежутки, и что можно непрерывно и равномерно передавать произвольные числа со скоростью $N = 2f$ чисел в секунду при помощи функции, имеющей сколь угодно малые слагаемые на частотах, больших f . Во втором разделе доказаны четыре теоремы (IV–VII), в которых описанные идеи распространяются на функции, содержащие частоты от f_1 до f_2 . Такие функции могут передаваться аналогичным образом со скоростью $N = 2(f_2 - f_1)$ отсчетов в секунду.

В 1954 г. А.А. Харкевич [2] объединил теоремы из [1, 5] в виде следующего утверждения, которое он назвал теоремой Котельникова: *функция с ограниченным спектром шириной f может быть передана на конечном интервале времени t при помощи $2ft$ дискретных отсчетов*. Хотя такая формулировка не упрощает доказательства, требующего всех тех доводов, которые приводятся в [1], она звучит более доходчиво для инженерно-технических работников, больше заинтересованных в понимании существа дела, чем в математических тонкостях доказательства. Обычно в современной технической литературе приводят теорему Котельникова именно в такой формулировке с доказательством лишь первой теоремы из [1]. Затем просто обсуждают условия применимости теоремы Котельникова. Например, подчеркивается, что она основывается на предположениях об ограничении полосы частот сигнала значением f , об отсчетах с помощью амплитудно-модулированных импульсов бесконечно малой длительности и об идеальном фильтре низкой частоты, воспроизводящем сигнал на приемном конце. Невыполнение любого из этих предположений приводит к специфическим искажениям, называемым соответственно помехами наложения, апертурным эффектом и интерполяционным шумом. Подчеркивается также, что граничную частоту f нужно рассматривать как предельное значение, а не как активную рабочую частоту сигнала. Если бы, например, на протяжении некоторого отрезка времени t сигнал содержал только частоту f , то такой сигнал не мог бы быть однозначно передан с помощью $2ft$ отсчетов. Заметим в связи с этим, что в качестве международного стандарта частота не 6200 и даже не 6800, а 8000 Гц.

Второй фундаментальный результат статьи [1] состоит в утверждении того, что для передачи дискретных сообщений необходимая полоса частот может быть сделана сколь угодно малой без ущерба для качества или скорости передачи за счет увеличения мощности. В отличие от дискретной передачи N отсчетов аналогового сигнала, которые могут принимать произвольные значения, при передаче N чисел дискретного сообщения значения этих чисел выбираются из наперед известного набора. Таким образом, увеличение мощности означает обеспечение необходимого числа градаций, которое зависит не просто от мощности передаваемого сигнала, а от отношения мощности сигнала к допустимой мощности помехи.

Особенностью этой работы является то, что в ней не просто получены фундаментальные научные результаты, но и сделаны важные практические выводы о направлениях дальнейших разработок по повышению пропускной способности эфира и проволоки — от таких рекомендаций, как совершенствование аналоговых систем передачи с одной боковой полосой, до освоения новых диапазонов радиоволн. Это была программа, которая в последующие годы блестяще претворялась в жизнь, в том числе Институтом радиотехники и электроники АН СССР под руководством самого В.А. Котельникова. После изобретения «беспроволочного телеграфа» (как официально назвал радио в 1908 г. Нобелевский комитет) на протяжении всего XX в. шла целенаправленная работа по освоению все новых и новых диапазонов волн вплоть до оптического. Затем беспроводная техника вновь вернулась к проводам, но теперь уже не металлическим, а стекловолоконным. Волоконно-оптические сети связи предоставляют неограниченный возобновляемый ресурс систем передачи по проволоке, и проблема тесноты в эфире, как казалось, потеряла актуальность, но, как увидим ниже, ненадолго.

В 1948 г. К. Шеннон, используя практический опыт шифрования связи в годы второй мировой войны, опубликовал свою классическую работу [3], в которой представил законченную теорию связи. Основными положениями его работы были введенные им количественная мера информации и теория кодирования источников сообщений и каналов, а также два описанных выше результата (теорема отсчетов и передача дискретных сообщений), полученные им независимо от В.А. Котельникова. В частности, по Шеннону, аналоговая передача на одной боковой полосе (например, телефонная связь или телевидение, о которых писал В.А. Котельников), содержит большую избыточность, которая может быть устранена надлежащим кодированием источника сообщений. Такое сжатое сообщение становится более уязвимым для помех, поэтому в него нужно внести некоторую теоретически обоснованную избыточность, которая могла бы гарантировать кодовую защиту сообщения при его передаче по каналу связи. Изложенные соображения лежат в основе теоремы Шеннона, утверждающей, что произведение ширины полосы частот, времени передачи и характеристики отношения мощностей сигнала и помехи определяет максимальное количество информации, которое может быть передано по каналу связи, и его пропускная способность в принципе не может превысить указанное количество информации. Работа Шеннона сыграла выдающуюся роль в формировании современной теории связи и развитии техники связи нашего столетия. Впоследствии в ходе развития советско-американских контактов работа [1], в свое время опубликованная в малодоступном издании, была переведена и стала доступной англоязычному читателю. Это способствовало международному признанию В.А. Котельникова как одного из творцов современной теории связи, ключевыми положениями которой являются теоремы Котельникова и Шеннона.

Для того чтобы предсказанные К. Шенноном возможности сверхсжатия информации (прежде всего телефонных сигналов и телевидения) получили реальное воплощение, имелись, по меньшей мере, два серьезных препятствия: чрезвычайно сложная аппаратная реализация и чрезвычайный дефицит полосы частот. Обе эти проблемы были решены в 90-х годах. С одной стороны, сложность аппаратной реализации свелась просто к технологии производства микроэлектронной элементной базы, которая достигла высокого совершенства. С другой стороны, новое обострение проблемы тесноты в эфире возникло в связи с массовой потребностью в беспроводном доступе подвижных абонентов как к телефонной сети, так и к сети Интернет. Необходимые аппаратные средства были созданы достаточно

быстро ввиду большого объема знаний об источниках сообщений, которые были накоплены в ходе теоретических исследований источников речи и изображений на протяжении многих лет. Сегодня задача о пропускной способности эфира и проволоки успешно решена главным образом на основе широкого использования возобновляемого ресурса проводных (волоконно-оптических) линий связи для создания мощных стационарных магистральных сетей в сочетании с использованием невозобновляемого ресурса радиочастот (с оговоркой о возможностях их пространственного разделения, на которое указывал еще Котельников в [1]) для беспроводного доступа абонентов.

Потенциальная помехоустойчивость

В 1947 г. (приблизительно тогда же, когда защищал свою работу и К. Шеннон) В.А. Котельников представил ученому совету Московского энергетического института свою новую работу — докторскую диссертацию на тему «Теория потенциальной помехоустойчивости». Эта работа привлекла широкий интерес специалистов, однако была опубликована в виде отдельной книги лишь в 1956 г. [4, 5]. Если К. Шеннон развил теорию связи в направлении создания основ кодирования, рассчитанных на более далекое будущее, то В.А. Котельников дал исчерпывающую разработку теории модуляции и приема сигналов, рассчитанную на перспективу ближайших десятилетий. В условиях неизбежного действия помех в каналах связи передаваемый сигнал искажается. Поэтому задачей приемника является классификация принимаемых сигналов с целью установления их соответствия конкретным сообщениям. В.А. Котельников ввел понятие идеального приемника, который при установлении такого соответствия в наименьшей степени подвержен влиянию помех, и нашел, каким должно быть это соответствие, чтобы искажения были минимальными. Помехоустойчивость, которая характеризуется этими минимально возможными искажениями, и получила название потенциальной. Она может быть получена и в реальном приемнике, если он близок к идеальному, но не может быть превзойдена. Сравнивая потенциальную помехоустойчивость при различных способах передачи, можно легко выяснить, от каких основных факторов она зависит, и наметить пути ее повышения в конкретных случаях. Этот подход последовательно применяется в книге при рассмотрении различных видов сигналов и флуктуационных помех. Как и у К. Шеннона, в [4] подробно исследуются процессы передачи цифровых сообщений (а в [4] они были названы дискретными), дискретных сообщений (названных в [4] отдельными значениями параметров) и непрерывных сообщений (названных колебаниями). Теория потенциальной помехоустойчивости Котельникова как в целом, так и отдельные идеи (например, о корреляционном приеме) оказала огромное влияние на развитие радиотехники в нашей стране.

В классических работах по помехоустойчивости не рассматривались нерегулярные искажения сигналов, возникающие при распространении радиоволн в условиях пересеченной местности или городских застроек. Но именно эти явления приходится учитывать при создании систем беспроводного доступа абонентов к сетям связи. С одной стороны, происходящее в этом случае отражение радиоволн и, как следствие, их многолучевое распространение полезно, поскольку позволяет радиоволнам огибать препятствия, но с другой — оно вызывает растягивание задержки сигнала и замирания. Кроме того, при быстром движении абонента (например, в автомобиле), приходится считаться с эффектом Доплера. Преодолеть все эти трудности удастся благодаря цифровой

технике, которая позволяет реализовать новые принципы кодирования, модуляции и выравнивания характеристик каналов.

Если первое поколение сотовых телефонов строилось на основе аналоговых систем передачи с частотной модуляцией, то во втором поколении переход на цифровую технику позволил применить такие новые решения, как более эффективные модели повторного использования частот, временное разделение каналов между собой и разделение во времени процессов передачи и приема в дуплексном канале, эффективные методы борьбы с замираниями и искажениями сигналов, включая переключение частотных каналов в процессе сеанса связи, эффективное кодирование речевых сигналов с засекречиванием передачи, более эффективные методы модуляции, программное управление процессами формирования логических каналов связи и управления, современные протоколы связи и принципы управления с помощью интеллектуальной сети, строгое документирование сеансов связи.

Следующее за этим третье поколение позволяет более гибко решать задачи предоставления каналов подвижным абонентам (в том числе с учетом различных требований к скорости передачи) за счет широкополосных систем передачи и кодового разделения. В системах с частотным или временным разделением каналов качество связи определяется качеством предоставляемых каналов и нагрузкой, которая ограничивается пучком наличных каналов (если все они заняты, абонент получает отказ). В системе с кодовым разделением ограничение накладывается на помехи. Хотя здесь и существует ограниченное число кодов, а также фиксированное число аппаратных средств формирования каналов, до этих ограничений дело обычно не доходит. Фактическое ограничение пропускной способности возникает из-за того, что все соединения, одновременно использующие весь выделенный спектр частот, могут создавать взаимные помехи. В результате достигается «мягкое» управление пропускной способностью в том смысле, что рост числа пользователей (сверх определенной границы) сопровождается плавным ухудшением качества связи. Третье поколение систем беспроводного доступа обычно относят к системам универсальной персональной связи, предполагающим переход от понятия «подвижного терминала» к понятию «подвижного абонента». В системе сотовой связи второго поколения номер присваивается телефонному аппарату (обычно путем помещения в этот аппарат электронной пластиковой карты, оформленной на конкретного абонента). В системе же универсальной персональной связи электронная карта является носителем личного номера абонента, присутствие которого может регистрироваться не только в сотах подвижной связи, но и у любого аппарата стационарных сетей. Эпоха цифровой техники приносит в нашу жизнь все больше технических новшеств, которые не могли бы состояться без самоотверженного труда основоположников этого научно-технического направления. Наш юбиляр занимает среди них достойное место.

Литература

1. *Котельников В.А.* О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи. Всесоюзная энергетическая комиссия: Материалы к Первому Всесоюзному съезду по вопросам реконструкции дела связи и развития слабочной промышленности // Радиотехника. 1995. № 4–5. С. 42–55.
2. *Харкевич А.А.* Очерки общей теории связи. М.: ГТТИ, 1954.
3. *Шеннон К.* Работы по теории информации и кибернетике. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
4. *Котельников В.А.* Теория потенциальной помехоустойчивости. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956.
5. *Котельников В.А.* Собрание научных трудов. Т. 1, 2. М.: Физматлит, 2009.