

## ЛИДЕР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ

*Р. Ф. Григорьев*

Григорьев Роберт Фролович (1928-2002), полковник, профессор, действительный член Академии криптографии РФ, Заслуженный деятель науки РФ

XX век в историю цивилизации войдет как век освоения ядерной энергии, покорения космоса, создания и внедрения электронных вычислительных машин. Несомненно, что к наиболее ярким научным достижениям столетия следует также отнести информатизацию всех сторон жизни общества и связанную с ней широкую его электронизацию. Но какими бы ни были крупными достижения творческой мысли человечества, уместно всегда помнить, что наука не безлика, ее развитие непременно связано с именами ученых-первопроходцев и авторов научных открытий. Прошлый век не был исключением в этом отношении. Говоря об одном направлении развития современной науки — информатике, как материальной основе развития производительных сил и новых технологий, мы с гордостью произносим имена крупнейших ученых, ставших подлинными лидерами происходящей научно-технической революции. К ним в первую очередь следует отнести академика Колмогорова А. Н. и Н. Винера как основоположников новой науки — кибернетики, Дж. Фон Неймана и академика Лебедева как создателей ЭВМ и, наконец, академика В. А. Котельникова и К. Шеннона как творцов двух самостоятельных ветвей развития проблем передачи и обработки сообщений — теории потенциальной помехоустойчивости и теории информации. Научные достижения каждого из этих ученых составляют «золотой фонд» научного банка данных нашего века, их внедрение позволило сделать гигантский скачок в развитии цивилизации. С позиций сегодняшнего дня мы можем еще раз убедиться в справедливости знаменитого афоризма одного из величайших физиков позапрошлого столетия Л. Больцмана, утверждавшего, что самой практичной вещью, оказывающей наибольшее воздействие на прогресс общества, является хорошая научная теория.

Спектр научных интересов Академика В. А. Котельникова чрезвычайно многообразен и было бы весьма трудно, если не невозможно, раскрыть содержание всех полученных им теоретических результатов. Поэтому я ограничусь только **двумя проблемами:**

- восстановление непрерывных сигналов с ограниченным спектром при их передаче по шумящему каналу связи;
- разработки предельных методов оценки качества принимаемой информации в условиях воздействия помех.

При создании научного задела для развития новых перспективных систем связи центральное место принадлежит сформулированной В. А. Котельниковым теореме о дискретизации функций с ограниченным спектром и возможности их восстановления на приемном конце, если выборочные значения этой функции, называемые отсчетами, берутся через равные интервалы времени, обратно пропорциональные удвоенному значению ширины спектра — интервалы Котельникова.

Прошло уже более 70 лет с момента доказательства этой теоремы, но она не теряет своей свежести и актуальности, продолжает активно использоваться специалистами при создании новых систем связи. Физический смысл этой теоремы достаточно прозрачен — ограничение спектра функции представляет серьезное ограничение ее свойств, ибо устранение высокочастотных гармонических составляющих делает эту функцию более гладкой, исключает резкие всплески и выбросы. Это, в свою очередь, детерминирует способ соединения каждых двух последних точек, что и обеспечивает точное воспроизведение функции приемником. Поучительна научная история этой теоремы, которая в иностранной литературе фигурирует под названием «теоремы отсчетов», воспроизведенной Шенноном только в 1949 году в работе «Связь при наличии шума». В книге Хургина и Яковлева «Целые функции в физике и технике» указывается, что ее можно рассматривать как частный случай интерполяционного полинома Лагранжа. Однако для понимания этого факта необходимо было вскрыть математическую природу функций с ограниченным спектром и показать, что они относятся к классу целых функций конечной степени и обладают свойством аналитического продолжения. Только при этих условиях ряд Лагранжа оказывается равномерно сходящимся и гарантирует единственность разложения и представления подобных функций. Интерполяционный многочлен Лагранжа неоднократно переоткрывался в математической литературе по функциям комплексного переменного. Достаточно отметить, что это было выполнено английским математиком Уиттекером в 1915 году, являющимся вместе с Ватсоном автором двух томника «Курс современного анализа», еще позднее, в конце 20-х годов этот же результат был получен американцем Пэли, соавтором Винера по книге «Преобразование Фурье».

Естественно, что при доказательстве своей теоремы Владимир Александрович не опирался на теорию интерполяции целых функций конечной степени и вряд ли подразумевал наличие связи между ними. Тем величественнее можно оценить аналитическое мышление автора теоремы. Главное же заключается в том, что его незаурядная инженерная интуиция позволила обратить внимание на фундаментальное значение полученного ряда в виде совокупности отсчетных значений финитных функций для теории и практики передачи информации. Можно говорить, по крайней мере, о трех ипостасях этой теоремы отсчетов.

1) Если отмечать ее прикладную сторону, то без преувеличения можно сказать, что она явилась теоретической основой для создания целого класса новых систем связи. Такие современные системы связи как кодово-импульсная модуляция, дельта модуляция, связь с предсказанием, многие разновидности широтно-импульсной модуляции и др. базируются именно на этой теореме Котельникова, обеспечивающей восстановление передаваемых сообщений по конечной совокупности дискретных отсчетов с приемлемой погрешностью. Для дважды финитных функций, одновременно ограниченных во времени и по спектру, требуемое число отсчетов оказывается пропорциональным базе сигналов — одному из фундаментальных параметров современной теории связи.

2) Методологическое значение этой теоремы, как отмечал академик А. А. Харкевич, состоит в том, что на ее основе в теорию связи проникли геометрические представления сигналов, помех и передаваемых сообщений, независимо от их характера. В настоящее время любая сложная ансамбль сигналов может быть представлен в виде множества векторов, погруженных в функциональное пространство, в котором выполняются метрические соотношения, определяемые теоремой отсчетов. Размерность этого пространства является конечномерной и равна числу членов в разложении ряда Котельникова, т. е. базе сигнала. Можно считать, что к настоящему времени геометрический стиль изложения многих вопросов теории связи стал доминирующим методом при преподавании студентам и при проведении научных исследований.

3) Наконец, техническое значение этой теоремы состоит в том, что она позволяет передачу как непрерывных, так и дискретных сообщений свести, в конечном счете, к передаче последовательности дискретных чисел, т. е. обеспечить универсализацию сигналов в идее единого цифрового потока. Именно поэтому сейчас, в связи с разработкой и внедрением цифровых систем передачи информации, интерес к данной теореме вновь возрос. Отметим также, что с позиции разведзащищенности цифровую универсализацию сигналов можно рассматривать как один из методов реализации структурной скрытности систем связи.

Научным подвигом В. А. Котельникова является создание им теории потенциальной помехоустойчивости. Впервые в истории связи ее основные проблемы были проанализированы с теоретико-вероятностных позиций. Эта работа дала мощный импульс для развития статистической теории передачи сообщений, статистического синтеза оптимальных методов обработки сигналов, разработке эффективных алгоритмов функционирования приемных устройств. Введение понятия потенциальной помехоустойчивости позволило инженерам-разработчикам заранее давать сравнительную характеристику надежности проектируемых систем с предельно достижимыми параметрами и вскрывать дополнительные ресурсы по их техническому совершенствованию. Хотя диссертация по теории потенциальной помехоустойчивости была посвящена только проблемам связи, ее научное значение далеко пере-

шагнуло эти границы. Можно с уверенностью отметить, что сегодня теоретический анализ и создание всех новых видов информационных систем, работающих при наличии шумов, базируются на теории помехоустойчивости Котельникова В. А. Сюда можно отнести системы радиолокации и радиопротиводействия, телеметрии и радионавигации, радиоэлектронной борьбы и космической радиоастрономии, а также многое другое. В истории науки обычно очень редки случаи, когда теория, разработанная для исследования одного какого-либо явления, оказывается в состоянии охватить многие другие объекты природы и человеческой деятельности. Именно таким исключением является теория потенциальной помехоустойчивости Котельникова, породившая настоящий научный бум среди специалистов различных направлений в области передачи и обработки сообщений и сигналов. Только монографическая литература по данной проблеме к настоящему времени насчитывает сотни книг и учебников, научным счет статьям идет на многие тысячи.

Центральной идеей теории потенциальной помехоустойчивости является понятие идеального приемника как такого устройства обработки принятой суммы полезного сигнала и шума, который реализует максимально достижимую вероятность правильного воспроизведения сообщения. Никакой другой приемник не может увеличить эту вероятность. Иными словами, вероятность искажения при приеме на реальный приемник может лишь достигать величины потенциальной помехоустойчивости, но не может быть меньше ее.

Разрешите остановиться на некоторых особенностях этой диссертации.

1. Тематически диссертация охватывает все стороны современной статистической теории связи, опирающейся на такие разделы математической статистики, как теория проверки гипотез и теория оценивания неизвестных параметров. И здесь, при разработке теории потенциальной помехоустойчивости, вновь повторилась та же ситуация, которая уже складывалась вокруг теоремы отсчетов. К началу 30-х годов трудами таких математиков, как Пирсон, Нейман, Фишер и Вальд — этой своего рода «могучей кучки» в области статистики, уже были заложены основы статистических критериев для проверки гипотез и оценок параметров. Однако В. А. Котельников, как истинный гроссмейстер в шахматах, нашел свой путь создания новой теории. Связующим мостом всех разделов диссертации, посвященных как приему дискретных сообщений, так и непрерывных колебаний, включая оценивание ожидаемых значений их параметров, явился единый для них критерий идеального наблюдателя, геометрическая трактовка которого сводится к нахождению в пространстве принятых реализаций линейного расстояния между результирующим сигналом на входе приемника и одной из сигнальных точек источника сообщений. Квадрат этого расстояния между сигнальными точками в функциональном пространстве получил название котельниковской меры их близости. Чем больше это рас-

стояние между сигнальными точками, тем выше помехоустойчивость приема, тем меньше вероятность ошибочных решений.

2) Одним из неожиданных выводов диссертации является тот факт, что величина котельниковского расстояния не зависит от формы используемых сигналов и даже их мощности. Оно определяется только так называемой эквивалентной энергией сигналов и ее отношением к спектральной плотности помехи. Этот вывод, впервые сделанный в диссертации, противоречил сложившимся традиционным представлениям о том, что качество приема зависит лишь от отношения мощности сигнала к мощности помехи. Этот факт был, пожалуй, одним из самых непредсказуемых парадоксов теории помехоустойчивости Котельникова. Его значение наиболее полно было понято лишь спустя 20–25 лет, к концу шестидесятых годов. Оказалось, что оба энергетических параметра — отношение мощностей сигнала и помехи, а также отношение энергии сигнала к спектральной плотности помехи, взаимосвязаны между собой через уже известную базу сигнала, равную числу слагаемых в ряде Котельникова. Более того, база в этой связке выступает как обменный параметр, позволяющий уменьшать отношение мощности сигнала к мощности помехи при неизменном значении их энергетических характеристик. Появление в 60-х годах широкополосных систем связи с шумоподобными сигналами, мощность которых может быть значительно меньше мощности помехи, это результат практического применения данного обменного соотношения. Для военных и специальных радиосистем его использование связано также с обеспечением энергетической скрытности их функционирования, т. е. реализацией одного из важнейших тактико-технических требований к подобного рода специальным системам передачи информации.

3) Следует отметить, что примерно в это же время Шенноном была опубликована большая статья «Математическая теория связи» (1948 г.), которая заложила основы теории информации как самостоятельной науки. Она же стала и отправной точкой для теории кодирования. Не противопоставляя эти два выдающихся научных труда, которые, более того, являются взаимодополняющими, хотелось бы, тем не менее, отметить их различие хотя бы в следующих трех аспектах.

Во-первых, в своей содержательной части предметом теории потенциальной помехоустойчивости является проблема повышения предельной надежности связи как меры ее качества. У Шеннона центральное место занимает понятие пропускной способности, которое охватывает проблему эффективности связи как одну из ее главных количественных характеристик. Таким образом, в этих 2-х работах объектами исследований являются, хотя и базисные, но различные проблемы передачи информации. Только их последующий синтез уже в середине пятидесятих годов привел к образованию новой научной дисциплины — статистической теории связи, которая стала основным профилирующим курсом во всех учебных институтах радиотехники, электроники связи и автоматики. Одной из первых книг, в которой

была предпринята попытка синтезирования основных идей Котельникова и Шеннона, стала монография академика Харкевича «Очерки общей теории связи», изданная у нас в 1955 г. и переведенная во многих странах. Американцы сделали это несколько позднее, выпустив в 1960 г. двухтомник Миддлтона «Введение в статистическую теорию связи».

Во-вторых, обе теории различаются степенью своей практической реализуемости. Теория помехоустойчивости Котельникова представляет собою конструктивный сплав статистического синтеза и анализа реальных систем связи. Ее основные выводы и рекомендации без особых усилий могут быть «материализованы» при проектировании и внедрении новых систем связи. Теория информации Шеннона, несмотря на ее большую важность и значимость, тем не менее, в своей изначальной трактовке носит менее конструктивный характер. Подавляющее большинство ее теорем относятся к категории теорем существования и поэтому не содержат конкретных указаний по их практической реализации. Для этого достаточно сослаться на монографии по кодированию самих американских специалистов. Питерсон (1961 г.): «В настоящее время трудно оценить конструктивность подхода с использованием случайных кодов». И далее: «Несомненно было бы очень интересно с теоретической точки зрения найти явный способ построения кодов, обладающих по крайней мере теми свойствами, на существование которых указывают найденные границы их корректирующих возможностей». Мак-Вильямс и Слоэт (1977 г.): «Теорема Шеннона о существовании хороших кодов, к сожалению, была доказана только вероятностными методами и ничего не говорит о том, как построить эти коды. И в настоящее время мы не знаем, как найти такие коды. Хотя, конечно, для практических целей хочется иметь код, который можно легко кодировать и декодировать». Наконец, еще одна ссылка на Г. Блейхаута (1984 г.): «Шеннон в своей теореме на указал, как найти подходящие коды, а лишь доказал их существование. В 50-е годы много усилий было потрачено на попытки построения в явном виде классов случайных кодов, позволяющих получить обещанную сколь угодно малую вероятность ошибки, но результаты были скудными. В следующем десятилетии решению этой увлекательной задачи уделялось меньше внимания; вместо этого исследователи предприняли атаку по поиску регулярных методов кодирования взамен вытекающих из теорем теории информации роли случайных кодов».

У нас в СССР на недостаточную конструктивность шенноновской теории было обращено внимание еще в конце 50-х, начале 60-х годов. В 1962 г. на ученом совете ИРЭ АН СССР под председательством В. А. Котельникова состоялась защита докторской диссертации Флейшмана на тему «Конструктивные методы оптимального кодирования для каналов с шумами». В ней, пожалуй, впервые были показаны уязвимые места теории информации, и была предпринята попытка построения оптимальных кодов с помощью комбинаторного аппарата. Известно,

что в этом соревновании идей случайного и структурного кодирования, предпочтение оказалось на стороне алгебраических методов, которые стали господствующими при поиске новых путей построения оптимальных кодов и их декодирования.

Наконец, в третьих, по нашему мнению, это несовершенство теории информации кроется в ее методологической основе. Многие ее теоремы, в том числе и одна из центральных — об асимптотической равновероятности длинных последовательностей марковского источника сообщений, представляют непосредственные результаты закона больших чисел, выраженные в терминах этой теории, в том числе энтропии. Асимптотический подход к теоремам кодирования не позволил, на наш взгляд, сохранить конструктивное ядро теории, в связи с чем они и приняли характер теорем существования, выражающих их результаты на языке «эпсилон».

В отличие от асимптотической идеологии Шеннона, автор теории потенциальной помехоустойчивости заложил в нее конечные параметры, в виде предельной вероятности ошибочного приема, не связанной с методологией бесконечно малых величин. Подобный подход обеспечил большую конструктивность теории, которая завоевала высокий авторитет в научной и инженерной среде. Попутно следует заметить, что у Флейшмана, как у математика, все же появился соблазн рассмотреть предельный случай идеального приемника Котельникова в предположении, что при ограниченных энергетических ресурсах, число сигналов, как аналогов шенноновских равновероятных типичных последовательностей, неограниченно возрастает. Ему оказалось достаточно одной страницы текста, чтобы из формулы Котельникова для вероятности ошибки конечного числа ортогональных равновероятных сигналов получить основной результат шенноновской теоремы для канала с шумом. Думается, что это мог бы без особых усилий сделать и сам автор диссертации. Но, будучи прагматиком и имея за плечами практический опыт разработки и эксплуатации систем связи, он остался на почве реальных возможностей, что только повысило научный престиж всей теории потенциальной помехоустойчивости.