

## ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

ТЕОРИЯ ПЕРЕДАЧИ  
ИНФОРМАЦИИ

Доктор  
физико-математических наук  
Р. Л. ДОБРУШИН,  
доктор  
технических наук  
Б. С. ЦЫБАКОВ

Теорию передачи информации можно определить как науку, занимающуюся исследованием и оптимизацией алгоритмов кодирования и декодирования информации в целях создания экономных и надежных способов ее передачи по каналам связи и хранения в запоминающих устройствах. Она возникла из потребностей радиосвязи, радиолокации, телефонии, телевидения, вычислительной техники и составляет теоретический фундамент для построения систем связи. В центре внимания этой теории — проблема оптимального (с точки зрения скорости, надежности и эффективности) использования имеющихся технических средств для передачи, преобразования, распределения и хранения информации.

В отличие от большинства наук теория передачи информации имеет точные годы рождения — 1946—1948, когда вышли в свет работы академика В. А. Котельникова «Теория потенциальной помехоустойчивости» и американского ученого К. Шеннона «Математическая теория связи». До этого времени специалисты по технике связи располагали множеством разрозненных методов модуляции и демодуляции, рядом рецептов оценки и улучшения качества передачи информации, набором разнообразных способов приема сигналов. Однако весь этот арсенал средств базировался не на использовании внутренних характеристик передаваемой информации, а лишь на технических особенностях аппаратуры, используемой для ее передачи. Тогда еще не были ясны лежащие в основе всех этих методов общие идеи, не установлено, как и в каких терминах формулировать понятие оптимального метода передачи информации. Названные работы заложили основы общей теории передачи информации, выявили принципиальные ограничения, обусловленные статистической природой помех, указали на фундаментальную роль кодирования и важность использования статистических методов теории вероятностей при построении оптимальных приемников.

К. Шенноном была найдена граница скорости передачи информации по каналу связи (пропускная способность канала), которую нельзя превзойти при достаточно надежной передаче ни при каких способах кодирования

и декодирования и к которой в то же время можно сколь угодно точно приблизиться за счет их соответствующего выбора. Пропускная способность канала была выражена в статистических терминах через вновь введенную математическую характеристику совместного распределения вероятностей двух случайных величин, названную количеством информации. Она равна максимуму количества информации в сигнале на выходе канала относительно сигнала на его входе, где максимум берется по всем возможным распределениям вероятностей сигнала на входе. Количество информации в свою очередь выражается через другую величину, издавна использовавшуюся в статистической физике, — энтропию и представляет собой разность между энтропией сигнала на выходе канала и его условной энтропией, если известен сигнал на входе.

Ввиду фундаментальной важности понятия «количество информации» этот раздел науки стали называть теорией информации. Годы ее становления совпали с периодом, когда была осознана огромная роль всех форм информации для жизни человеческого общества, и представители многих областей знания пришли к заключению, что, наконец, найдена теоретическая основа для решения самых разнообразных проблем, в формулировку которых входит слово «информация» в его обычной общелексической трактовке. Конечно, как теперь очевидно, такой подход был несколько легкомыслен. Информация — это очень емкое и многообразное понятие, исследуемое с разных сторон разными науками. Например, такая развитая и обладающая большими традициями в области приложений наука, как математическая статистика, целиком посвящена изучению методов обработки и извлечения информации и по существу имеет не меньшее право именоваться теорией информации. Наивно ожидать, что можно придумать единый для всех ситуаций способ количественного измерения информации; во всяком случае, целесообразность применения шенноновской меры информации требует обоснования для каждой конкретной ситуации.

Новую науку, сформировавшуюся в результате многолетней работы по развитию и приложению идей В. А. Котельникова и К. Шеннона, большинство специалистов предпочитает теперь называть не теорией информации, а теорией передачи информации, чтобы само название отражало основную сферу адекватного применения ее идей.

Теоретические исследования в области теории передачи информации показали, что во многих ситуациях скорость передачи информации по каналам связи может быть в принципе повышена во много раз (по сравнению с традиционными методами ее передачи), однако они не давали алгоритмического способа построения методов кодирования и декодирования для практической реализации такой возможности, а лишь доказывали его существование. Правда, при случайном выборе кода достаточно большой длины в основном всегда возникает «почти оптимальный код», так что хорошие коды можно строить методом Монте-Карло. Но здесь появляется другая трудность. Методы реализации этих случайных и потому очень сложных по своей структуре кодов должны также быть очень сложными и потому не пригодными для реальных применений, где кодирование и декодирование нужно вести в реальном темпе передачи. Лишь немного облегчал дело введенный американскими учеными Д. Слепяном и П. Элайсом новый класс групповых и сверхточных кодов, для которых существуют довольно простые алгоритмы кодирования, так как при этом вовсе не решается гораздо более сложная проблема декодирования информации.

Таким образом построение достаточно эффективных (по скорости передачи) и надежных методов кодирования и декодирования, обладающих

приемлемыми по сложности алгоритмами, стало генеральным направлением в развитии теории передачи информации. В первоначальной постановке задача передачи информации по каналу связи имеет вероятностную трактовку, и это неизбежно, ибо, как показывает теория, лишь присутствие статистически описываемых шумов в канале связи ограничивает возможности передачи информации по реальным непрерывным каналам. Однако математические трудности, связанные с рассмотрением задачи в вероятностной обстановке, привели к созданию ее «суррогатного», чисто комбинаторного варианта, в котором статистические требования, предъявляемые к характеристикам метода передачи, имитируются в упрощенном комбинаторном виде при помощи так называемого «кодового расстояния». Эта комбинаторная постановка задачи асимптотически точно совпадает с основной вероятностной, если уровень шумов в дискретном канале связи мал.

Поиски хороших по кодовому расстоянию кодов для дискретных каналов привели к возникновению большого раздела теории передачи информации — теории кодирования. Этот красивый и сложный по своим методам раздел прикладной математики, основанный на применении глубоких алгебраических методов к решению чисто комбинаторных задач, достиг серьезных успехов. Разработанные здесь циклические коды, включающие такие известные, как коды Хемминга и Боузе — Чоудхури — Хоквингема, довольно широко внедрены в практику техники связи. Они удобны в ситуациях, где нужно достичь существенного уменьшения вероятности ошибки без использования сложной вычислительной техники. Особенно полезны введенные Дж. Месси (США), В. Д. Колесником и Е. Т. Мирончиковым (СССР) классы циклических кодов, допускающих мажоритарное декодирование, т. е. декодирование, основанное на многократном применении очень простой операции решения по большинству голосов.

Однако циклические коды, по-видимому, как и все другие, построение которых не включает случайного выбора или достаточно сложного перебора, не позволяют вести передачу со скоростями, близкими к пропускной способности канала. Поэтому важным этапом в развитии теории передачи информации было введение американским ученым Д. Возенкрафтом последовательных методов декодирования информации, близких по своим идеям к известным методам последовательного анализа в математической статистике. Последовательное декодирование ведется в перемешном темпе, причем основное время отводится декодированию наиболее зашумленных участков сообщения, что делает средний темп декодирования достаточно высоким при сохранении должной надежности процесса. В развитие методов последовательного декодирования существенный вклад внесли сотрудники Института проблем передачи информации АН СССР. В частности, один из наиболее популярных ныне вариантов предложен К. Ш. Зигангировым, а М. С. Пинскер показал, что при некотором видоизменении эти методы позволяют вести передачу со скоростью, сколь угодно близкой к пропускной способности канала.

Методы последовательного декодирования нашли применение в системах связи, в которых одновременно требуется достичь высокой помехоустойчивости и большой скорости передачи. В одной из первых экспериментальных линий с последовательным декодированием в стандартном телефонном канале средняя скорость передачи составляла 7500 *бит/сек* при вероятности ошибки  $10^{-9}$  (обычные телефонные стандарты, не использующие кодирование, рассчитаны на скорость лишь до 1200 *бит/сек* при вероятности ошибки  $10^{-5}$ ). Применяющиеся в спутниковой радиосвязи последовательные декодеры при отношении сигнал/шум 4,9 *дБ* имеют скорость передачи  $3 \cdot 10^6$  *бит/сек* при вероятности ошибки  $10^{-5}$ .

Методы последовательного декодирования используются при решении задач экономного представления данных (т. е. экономной записи массивов цифровой информации) и хранения информации в запоминающих устройствах ЭВМ.

Важное направление теории передачи информации — разработка алгоритмов сжатия подлежащих передаче данных, т. е. алгоритмов, основанных на ликвидации содержащейся в этих данных избыточности. В последние годы интерес к этому направлению стимулируется рядом новых технических проблем, в числе которых — экономное представление данных, предназначенных для хранения в банках информации; устранение избыточности при передаче сообщений из космоса и со спутников, в частности при передаче сведений о природных ресурсах; экономное представление цветных и черно-белых телевизионных изображений в целях их передачи по коаксиальному кабелю. Проведенные работы не только продемонстрировали потенциальные возможности сжатия данных, но и позволили создать практически удобные и несложные в реализации алгоритмы, осуществляющие такое сжатие. Эффективность предлагаемых алгоритмов определяется статистической структурой исходных данных. В настоящее время разработаны адаптивные алгоритмы, не зависящие от этой структуры. Для сокращения избыточности в телевизионных изображениях созданы эффективные методы разностной импульсно-кодовой модуляции и пространственной фильтрации, с помощью которых на экспериментальных установках можно передавать всего лишь 1 бит (вместо 7–8) на один элемент изображения при высококачественном воспроизведении. Эти методы находят применение не только при передаче телевизионного изображения по кабелю, но также в видеофонных системах, в промышленном телевидении, при передаче изображения из космоса.

Новым направлением, инициатива в развитии которого принадлежит ученым Института проблем передачи информации АН СССР, представляются начатые в последние годы работы по асимптотической оптимизации методов кодирования и декодирования информации по параметрам, характеризующим сложность алгоритмов кодирования и декодирования. Здесь особенно интересны недавние работы В. В. Зяблова и М. С. Пинскера, предложивших метод декодирования с весьма низкой асимптотической сложностью, основанный на классе низкоплотностных кодов Р. Галлагера (США).

Большое значение имеют исследования, касающиеся уточнения и расширения области применимости фундаментальных теорем о потенциальных границах возможных скоростей передачи информации и о вероятности ошибок. Важным представляется, что для большинства каналов, интересных с практической точки зрения, вероятность ошибки для оптимального кода убывает экспоненциально с ростом его длины. При этом показатель экспоненты, являющийся функцией от скорости передачи, быстро возрастает при убывании последней в области скоростей, меньших пропускной способности канала. Это говорит о том, что, применяя оптимальное кодирование, можно сделать ошибки весьма малыми уже при умеренных длинах кодов (как правило, порядка ста или нескольких сотен символов). При сравнении конкретных кодов с оптимальными широко используются результаты Р. Р. Варшамова, полученные им в 50-х годах. Интересные новые границы для возможностей исправления ошибок установлены недавно В. Н. Левенштейном и В. М. Сидельниковым.

Большую роль в становлении теории передачи информации как самостоятельного и содержательного раздела математики сыграли работы академика А. Н. Колмогорова и члена-корреспондента АН СССР А. Я. Хинчина. В этих работах была заложена стройная схема теории, которую те-

перь часто называют математической теорией информации. Развитые ими общие и абстрактные концепции все в большей мере усваиваются и специалистами более прикладного профиля.

Много внимания сейчас уделяется распространению идей теории передачи информации на более широкий класс моделей, описывающих разнообразные ситуации, возникающие в практических приложениях. В частности, изучаются системы с обратной связью, многоканальные системы, системы с ошибками в синхронизации сигналов и т. п. При исследовании каналов с обратной связью установлено, что она увеличивает пропускную способность прямого канала, если в нем действуют коррелированные по времени шумы, и не увеличивает, если шумы имеют независимый характер. Найдены простые и явные методы кодирования для дискретных и непрерывных каналов с обратной связью, приводящие к наименьшей ошибке. При этом неожиданно оказалось, что иногда (в непрерывном гауссовском случае) оптимальным кодером является линейный фильтр. Наконец, обнаружены многообещающие глубокие связи между теорией каналов с обратной связью и теорией автоматического управления, а также рядом математических вопросов предсказания и фильтрации случайных процессов. Значительный вклад в это направление работ внесли И. А. Овсевич, А. Н. Ширяев, М. С. Пинскер, К. Ш. Зигангиров и др. (Институт проблем передачи информации, Математический институт им. В. А. Стеклова АН СССР).

Теория передачи информации позволила поставить проблему синхронизации систем связи как часть общей проблемы выбора метода передачи информации. Разработаны коды, с помощью которых можно одновременно исправлять ошибки и ликвидировать возникающую десинхронизацию. Теоретически изучены предельные возможности таких кодов (В. И. Левенштейн). Теоретико-информационные методы синхронизации находят прямое применение в радиолокации, системах отсчета времени, измерительной аппаратуре и теории автоматов.

До последнего времени большая часть исследований по теории передачи информации была посвящена дискретным каналам. Поскольку этот подход предполагает дискретизацию некоторым фиксированным образом реального непрерывного канала, потенциальные возможности таких каналов не могут быть использованы в полной мере. В последние годы все больше внимания уделяется теоретическому изучению непрерывных каналов. В этой области выдающуюся роль сыграли ставшие ныне классическими исследования В. А. Котельникова, который ввел в теорию связи идеи математической статистики и разработал теорию оптимального приема модулированных сигналов на фоне гауссовского шума. Работы в этом направлении сближаются с теорией методов модуляции, практически используемых при передаче информации.

Одна из замечательных тенденций техники связи — освоение новых диапазонов частот. Так, в последние годы много занимаются вопросами связи на световых волнах. Построен ряд экспериментальных наземных и спутниковых линий оптической связи. В будущем предвидится использование в качестве световодов стекловолокон диаметром около 0,25 мм. Эти световоды будут обладать затуханием менее 20 дб/км и практически неограниченной полосой частот. Передача в новых диапазонах, как правило, имеет свои отличительные особенности, что требует специального теоретико-информационного изучения пригодных для этих диапазонов методов кодирования. В частности, при передаче в световом диапазоне приходится учитывать квантовую природу света и квантовые эффекты в приемниках световых сигналов. В связи с этим получила развитие квантовая теория информации, находящаяся на стыке квантовой механики и теории инфор-

мации. Первые работы в этой области были выполнены в Институте проблем передачи информации по инициативе академика А. А. Харкевича. Результаты исследований по квантовой теории информации нашли широкое применение при синтезе оптимальных приемников для световой локализации и световой связи. Рассмотрение квантовых эффектов при передаче информации естественно поставило проблему наибольшего количества информации, которое может перенести материальный носитель при заданной энергии. В настоящее время сделаны первые шаги в решении этой проблемы.

Развитие единой для всей страны автоматизированной системы связи, а также потребность в организации сети связи ЭВМ и систем АСУ пробудило интерес к теоретико-информационному изучению структурно сложных сетей связи. К числу простейших моделей таких сетей относятся широкополосные каналы и коллективы приемно-передающих устройств. Установлено, что для широкополосного канала, используемого в целях передачи различных сообщений пространственно разнесенным потребителям, существуют системы кодирования, позволяющие вести передачу со скоростями больше тех, которые соответствуют простому разделению времени между сообщениями. Для телефонных каналов, используемых при передаче данных в сети ЭВМ, разработаны диффузные коды и автоматические компенсирующие фильтры, с помощью которых при средней частоте ошибок, равной одной ошибке на  $10^5$  бит, можно вести передачу в стандартном телефонном канале со скоростью 4800 бит/сек, а в некомутируемом — со скоростью 9600 бит/сек.

В числе новых важных приложений теории передачи информации следует отметить информационную теорию управления (исследования в этом направлении в нашей стране возглавляет академик Б. Н. Петров), а также использование математических понятий теории передачи информации при решении задач математической статистики. Технически очень актуальными представляются приложения теории кодирования к построению надежных устройств для хранения информации (ведь хранение информации можно трактовать как ее передачу, но не в пространстве, а во времени) и к созданию помехоустойчивых методов переработки информации дискретно-логическими устройствами.

Теория передачи информации имеет глубокие связи с абстрактными разделами математики. Например, работы советских ученых академика А. Н. Колмогорова и Я. Г. Синая показали приложимость ее методов к классическим математическим проблемам классификации динамических систем. По сложности и разнообразию используемых математических теорий (алгебра, теория чисел, теория случайных процессов и т. д.) теорию передачи информации можно, пожалуй, сравнить лишь с математической физикой.

В настоящее время советская школа передачи информации занимает одно из ведущих мест в мировой науке. Исследования в этой области возглавляет Институт проблем передачи информации АН СССР, созданный академиком А. А. Харкевичем и руководимый членом-корреспондентом АН СССР В. И. Сифоровым. Растут коллективы специалистов по теории передачи информации в Ленинграде, Ереване, Новосибирске и других городах, а также коллективы инженеров, занимающихся внедрением достижений теории передачи информации в практику. Работы в этой области, развертывающиеся широким фронтом, имеют большие перспективы.

УДК 007