

Заключение

Наша научная школа по Оптимизационной Теории успешно выполнила планы и реализовала все свои намерения к пятидесятилетию издания удивительной по своей глубине и одновременно по ясности изложения книги Дж. Мессии «Пороговое декодирование» [25]. Изданные к этому юбилею наши монографии [4, 5] показали широкие возможности мажоритарных методов на основе ОТ во всём множестве основных типов каналов, изучаемых в теории кодирования.

Совершенно особый юбилей нового 2018 года связан в теории информации с воистину великой статьёй К. Шеннона [14], которая была опубликована 70 лет назад и дала начало масштабным проектам мирового научно-технического сообщества по созданию тех очень нужных нашему цифровому информационному миру методов коррекции ошибок в дискретных данных, о существовании которых нам было точно и доступно сказано в этой работе. Результатам успешного завершения поисков таких методов и посвящена данная монография, в которой, как полагают сторонники нашего научного направления, наконец убедительно решена действительно великая проблема, поставленная в той юбилейной публикации.

В этой книге дано полное решение поставленной К. Шенноном задачи предельно простого и эффективного исправления ошибок в цифровых массивах для всех основных типов каналов связи. Эта проблема успешно решена вплоть до областей шума, непосредственно близких к границе, известной как пропускная способность канала, которую чётко определил этот великий американский учёный. И хотя эта граница недостижима, как и скорость света для материальных тел, к настоящему времени для всех главных в теории кодирования каналов уже существуют технологии создания декодеров, успешно работающих непосредственно в ближайшей от этой границы области энергетики, чем и завершён принципиальный и самый сложный процесс поиска решения проблемы Шеннона. То вполне небольшое оставшееся расстояние до границы, указанной им, можно пройти (конечно, только частично!) с помощью методов, которые уже разработаны или ещё будут созданы в процессе последующих исследований в Оптимизационной Теории помехоустойчивого кодирования. Бесконечно высокая упругость пропускной способности канала, как и скорости света, будет и в дальнейшем очень неохотно допускать работу реальных алгоритмов декодирования при экстремально высоких уровнях шума. Но и уже полученные результаты по энергетике и вероятностным характеристикам декодеров ориентировочно для ста наиболее значимых кодовых кластеров (типичных наборов параметров кодов и каналов)

теперь уже совершенно достаточны, чтобы считать проблему полностью решённой и создавать тысячи других столь же высокоэффективных систем с очень умеренной сложностью реализации. Конечно, для многих других конкретных кодовых кластеров надо будет создавать методами ОТ, уже известными или будущими, новыми, особые конфигурации систем кодирования и последующего декодирования. Для этого создан и активно используется набор средств проектирования, исследования и настройки кодеков (кодеров и декодеров), практически уже всегда позволяющий разрабатывать необходимые системы кодирования приемлемой сложности, эффективности и достоверности для работы вблизи пропускной способности.

Нет сомнения, что активно развиваемая уже почти пять десятилетий ОТ и далее будет обязательно находить всё более новые методы и средства и для таких проектов, когда имеющихся технологий создания эффективных кодеков будет вблизи границы Шеннона недостаточно. При этом нужно чётко понимать, что сложный процесс проектирования систем кодирования в дальнейшем будет развиваться только вместе с прогрессом сложных программных систем оптимизации и мощных комплексов поиска глобальных экстремумов функционалов всё более сложной природы, которые активно и повсеместно применяются в ОТ. Таким образом, дальнейший процесс приближения технологий декодирования к границе Шеннона будет ещё более жёстко, чем ранее, связан с развитием компьютерной техники и со специальным программным обеспечением. Это вполне естественный ход развития реальных наукоёмких технологий.

Решающим моментом, позволяющим считать проблему декодирования при большом шуме полностью решённой, оказывается сложность МПД алгоритмов, при любых проектных работах по созданию кодов и алгоритмов декодирования растущая с длиной кода всего лишь линейно, т. е. с теоретически минимально возможным темпом. При этом для обеспечения ещё и высокой достоверности декодирования остаются доступными все те мощные методы и принципы, которые уже давно наработала и классическая теория кодирования, и парадигмы ОТ: различные виды каскадирования, дивергенция, ДПКМ методы и другие возможности. Тем самым полученное полное решение проблемы Шеннона соответствует наилучшим возможным уровням сложности, помехоустойчивости на входе и достоверности на выходе кодовых систем.

И, наконец, ключевым моментом успешности решения сложнейшей проблемы цифрового мира стало глубокое осознание уже многими специалистами того важнейшего обстоятельства, что достижение, казалось бы, несбыточной мечты теоретиков цифровой связи обеспе-

чили именно методы теорий поиска глобального экстремума функционалов в специфических условиях дискретных математических пространств. Никаких оснований считать, что здесь конкурентоспособными будут и другие методы, пока нет и, скорее всего, никогда не будет. Именно теории ПГЭФ и позволяют сразу рассматривать только методы поиска оптимальных решений декодеров типа МПД со сложностью, пропорциональной длине кода. Другие методы с такой сложностью неизвестны. Но этот подход к проблеме декодирования оказывается работоспособным, только если одновременно правильно решается и задача выбора кода, что, в конечном счёте, и позволяет успешно проводить поиск оптимального решения, наилучшего по вероятности необнаруженной ошибки. Раньше эта проблема решалась в теории кодирования только переборными методами.

Если же обратиться к наилучшим методам такого класса, то мы с удовлетворением отмечаем, что и запатентованный нами алгоритм Витерби для блочных кодов со сложностью аналогичных декодеров для свёрточных кодов также завершил преобразование всех прикладных проблем классической теории кодирования в задачи комбинированного глобального поиска оптимальных решений. Блочный АВ полностью исключил из любых конкурсов для блочных кодов методы, наработанные алгебраической теорией. Объединение всех типов АВ и различных модификаций МПД в группу ДПКМ декодеров, особых алгоритмов, единственных точно измеряющих расстояние своих решений до принятого сообщения, ещё более точно указывает множество методов, которые, видимо, и будут решать все проблемы создания хороших во всех указанных выше смыслах декодеров. Скорее всего, все новые алгоритмы последнего тридцатилетия, никак не связанные с теориями поиска глобального экстремума и обязательным точным измерением расстояний даже в предположении возможности дальнейшего роста их сложности, не имеют ни перспектив движения к границе Шеннона, ни, тем более, других вариантов развития. Разумеется, реальности уже ближайшего времени строго проверят правомерность столь жёсткого мнения.

Таким образом, ОТ приняла во всём объёме эстафету развития прикладных методов от классической алгебраической теории. Это неудивительно, т.к. алгебраическая теория за многие годы своего условного лидерства не решила никаких основных проблем своего развития: не нашла простых способов коррекции ошибок выше уровня половины кодового расстояния, не преодолела сложностей декодирования в гауссовском канале, а также не вышла на линейный от длины кодов уровень сложности декодирования. При этом группа методов ДПКМ решает все проблемы сложности столь естественным

образом, что даже экспоненциально сложные АВ, например, в схемах каскадного типа, оказываются в своих относительно коротких вариантах весьма несложными частями любых кодовых структур. Да и в обычных схемах характеристики АВ и уровень однородности его вычислений столь разительно выше, чем у алгебраических алгоритмов, что и тут вопросов о конкурентоспособности не возникает. А снижение в запатентованном нами блоковом АВ вдвое экспоненты его сложности по сравнению с оценками классической теории окончательно расставило все алгоритмы декодирования по своим местам.

Таким образом, поставленная Шенноном проблема решена в ОТ путем использования на различных шагах создания систем декодирования мощных оптимизационных процедур, в том числе на основе поиска глобального экстремума функционалов. Конечно, по мере приближения рабочей области проекта системы кодирования к пропускной способности канала количество необходимых декодеру операций будет несколько расти, что вполне понятно. Неизбежный значительный рост задержки принятия решений тоже очевиден и при большом шуме просто обязателен.

Перечислим основные оптимизационные процедуры проектирования алгоритмов ОТ. В первую очередь, конечно, это собственно МПД алгоритм, настраиваемый на приближение при каждом изменении контролируемых символов к оптимальному переборному (!) решению при собственной минимальной сложности. Это типичная задача поиска глобального минимума функционала.

Вторым мощным оптимизационным средством, используемым при создании эффективных МПД или ДПКМ алгоритмов, стали методы поиска кодов, в наибольшей степени соответствующих критериям минимума размножения ошибок при декодировании. Для этого была создана абсолютно уникальная теория РО, совершенно не похожая на попытки 50-летней давности описать этот сложнейший процесс для мажоритарных схем. Оптимизация кодов сразу по нескольким критериям РО многократно улучшила сходимость МПД методов к оптимальным решениям.

Наконец, третьим и самым сложным вариантом использования процедур глобальной оптимизации оказался целый класс методов настройки элементов МПД декодеров. Эта гигантская по трудоёмкости проблема, превышающая в сотни раз затраты сил и времени на обе первые методики, потребовала и разработки эффективных способов ускорения процессов такой настройки, что также было сделано в кратчайшие сроки. Эти результаты дополнительно многократно повысили темпы сходимости решений МПД к оптимальным.

Совокупность этих трёх базовых подходов и стала ядром тех

методов, которые в синергетическом взаимодействии довели эффективность МПД по сложности, помехоустойчивости и достоверности до уровня, который уже давно недоступен никаким другим методам классической теории кодирования.

Нелишне в этой связи напомнить уже давно сформировавшееся мнение математиков о том, что роль теорий оптимизации в математике столь же велика, как и роль математики вообще в науке. Таким образом, затянувшийся на десятилетия с 80-х годов прошлого века переход к созданию эффективных декодеров на базе теорий глобальной оптимизации функционалов завершён. С появлением ОТ прикладная теория кодирования переходит от подготовительного классического алгебраического этапа к широкому применению мощных и быстрых оптимизационных методов декодирования для всех технических систем, обеспечивающих простыми средствами высокую достоверность при экстремально большом шуме.

Важно указать, что значительный вклад в развитие ОТ и её технологий вносят такие новые руководящие парадигмы, которых вообще не было до появления этой теории: символные коды и декодеры, дивергенция, параллельное каскадирование, каскадирование с кодами контроля по чётности, конвергентные методы, быстрые алгоритмы восстановления стираний и правило ДПКМ, чётко рекомендуемые к реализации те или иные методы из набора ОТ. Наиболее важную роль здесь давно уже играет принцип дивергенции, оформление которого в отдельные методики далеко продвинуло алгоритмы МПД в область большого шума. Этот принцип некаскадного увеличения кодового расстояния применяемых кодов стал мощным средством проектирования методов декодирования всех типов. Здесь также можно указать на то, что и параллельное каскадирование впервые предложила наша школа. Кроме того, конвергентные методы трудно реализовать за рамками МПД алгоритмов, для которых они, наоборот, очень удобны. Что же касается каскадирования с кодами контроля по чётности, то этот метод стал мощнейшим средством эффективного кодирования, только когда МПД алгоритмы стали реально высокодостоверными, достигая решений ОД при больших уровнях шума. При этом декодеры, входящие в каскадную схему, реализуют наилучшее возможное взаимодействие и улучшают свои решения относительно всего каскадного кода в целом. Каскадирование по этим принципам для всех алгоритмов класса ДПКМ обеспечивает на редкость простые решения всех вопросов высокой достоверности декодирования при большом уровне шума на длительную перспективу.

Широкий спектр потенциальных возможностей и новых направлений развития алгоритмов декодирования, кратко описанный в по-

следних разделах нашей книги, также свидетельствует о совершенно безграничных перспективах ОТ — новой «квантовой механики» в теории информации.

Мы полагаем, что объявить о смене лидирующей идеологии в прикладной теории кодирования можно было ориентировочно 15–20 лет назад, когда уже давно были решены все принципиальные вопросы эффективности по алгоритмам для символьных кодов и стирающих каналов. В это же время для гауссовских каналов МПД алгоритмы успешно работали при энергетике, превышавшей уровень границы Шеннона не более чем на 2 дБ. Однако уровень развития идеологии ОТ и состояние доступной вычислительной техники не позволяли нам в те годы найти методы оптимизации, которые приблизили бы рабочую область МПД алгоритмов к пропускной способности гауссовского канала хотя бы до уровня полутора децибелов. Поэтому мы приняли тогда единственно правильное решение сначала дополнительно улучшить достигнутые к тому времени характеристики МПД декодеров в гауссовских каналах и только после объявить о решении поставленной К. Шенноном задачи. Сейчас вполне реализуемые МПД алгоритмы работают при энергетике канала, которая лишь на 26% превышает уровень энергетике в принципе недостижимой границы Шеннона. Такие характеристики недоступны уже никаким другим алгоритмам декодирования с разумной сложностью. Это и позволяет нам заявить именно теперь о полном переходе лидерства во всех прикладных вопросах в теории кодирования к новой «квантовой механике» нашей научной школы, названной нами Оптимизационной Теорией помехоустойчивого кодирования.

Как мы уже отмечали в самом начале книги, среди большого разнообразия направлений и методов исследований в сфере ОТ и итеративных МПД алгоритмов значимое поле дальнейших исследований могут создать совершенно новые направления и методы. Возможно, что некоторые из них будут развивать эту тематику в сторону замены простых пороговых функций в МПД на немного более сложные решающие правила в рамках ОТ и ДПКМ. Основной особенностью этого направления, как мы полагаем, должно стать сокращение числа итераций и уменьшение длины используемых кодов так, чтобы задержки решения новых типов итеративных МПД алгоритмов были несколько меньшими, чем, например, у свёрточных МПД декодеров, представленных в этой монографии, что позволит применять эти методы в системах, использующих более короткие коды с высоким уровнем результирующей достоверности при по-прежнему весьма простом декодировании. Время покажет, насколько реальны эти ожидания приверженцев нашей научной школы.

Несомненно, что огромное разнообразие возможных схем глобального поиска образует совершенно грандиозное интеллектуальное поле для создания новых оригинальных кодов, алгоритмов и технологий. На их основе талантливые исследователи, проектировщики и инженеры впишут новые страницы в ОТ и предложат нашей цивилизации самые лучшие системы обеспечения высокого уровня достоверности при передаче и хранении данных для современного цифрового информационного мира.