

Заключение

Совсем недавно состоялся юбилей воистину великой статьи К. Шеннона [14], которая была опубликована более 70 лет назад и дала начало масштабным исследованиям мирового научно-технического сообщества по созданию тех очень нужных нашей цифровой информационной цивилизации методов коррекции ошибок в дискретных данных, о существовании которых нам было точно и доступно сказано в этой работе. Наша научная школа Оптимизационной Теории (ОТ) тоже активно участвует в решении проблемы помехоустойчивого кодирования, о чём свидетельствуют сотни наших публикаций, новые работы и монографии [4, 5, 79, 90, 91, 94, 100]. Они продемонстрировали исключительно широкие возможности мажоритарных методов на основе ОТ во всём множестве классических каналов, изучаемых теорией. Результатам успешного завершения поисков этих и ряда других методов и посвящена данная монография научной школы ОТ, в которой, как полагают сторонники нашего научного направления, наконец убедительно решена действительно великая проблема, сформулированная в той юбилейной публикации.

В данной книге дано полное решение поставленной К. Шенноном задачи предельно простого и эффективного исправления ошибок в цифровых потоках для всех основных моделей цифровых каналов связи. Технологии ОТ успешно работают вплоть до областей шума, непосредственно близких к границе, известной как пропускная способность канала, которую чётко указал этот великий американский учёный. Данная граница недостижима, так как она абсолютно упруга, как и скорость света для материальных тел. Но к настоящему времени для всех главных в теории типов каналов в ОТ уже существуют технологии создания декодеров, успешно работающих непосредственно в ближайшей от этой границы области энергетики и/или вероятностей ошибок или стираний, чем и завершён принципиальный и сложнейший полувековой процесс поиска технологичного и простого 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 Оптимизационной Теории (ОТ) помехоустойчивого кодирования и других методов. Бесконечно высокая упругость пропускной способности канала будет и в дальнейшем очень неохотно допускать работу реальных алгоритмов декодирования при экстремально высоких уровнях шума. Так что полученный результат — это действительно очень хороший компромисс с природой, совсем небольшая плата ей за линейную сложность МПД ал-

горитмов вместо экспоненциальной, которая раньше требовалась для достижения решения оптимального декодера (ОД).

Все полученные к настоящему времени результаты по энергетике и вероятностным характеристикам наших декодеров ориентировочно для ста наиболее значимых существенно различных кодовых кластеров (типичных наборов параметров кодов, декодеров и каналов) теперь уже ясно демонстрируют, что проблема простого и эффективно-го декодирования в каналах с независимым искажениями полностью решена. Для этого созданы и уже давно активно применяются понятная специалистам тонкая теория вместе с мощным набором разнообразных технологий и программных средств проектирования, исследования и настройки кодеков (кодеров и декодеров), практически всегда позволяющие разрабатывать необходимые системы кодирования приемлемой сложности, эффективности и достоверности для работы вблизи пропускной способности канала связи.

Мы полагаем, что алгебраическая теория была хорошей учебной стартовой площадкой на начальных этапах исследований алгоритмов коррекции ошибок. В первые десятилетия своего развития она позволила приобщить к теории кодирования высокопрофессиональные кадры научного сообщества. А теперь уже полностью состоялась передача эстафеты лидерства от прежней алгебраической к Оптимизационной Теории (ОТ) помехоустойчивого кодирования во всех прикладных аспектах. На этом новом этапе своего развития ОТ, как и раньше, будет расширять сферу своих исследований.

В монографии были представлены мощные технологии разработки алгоритмов МПД декодирования для четырёх главных классических каналов теории помехоустойчивого кодирования с минимальной теоретически возможной линейной от длины кодов сложностью и одновременно (!) с эффективностью, практически совпадающей с оптимальным декодированием (ОД) вплоть до ближайших окрестностей границы Шеннона, для которого ранее практически всегда требовалось осуществление полного, экспоненциального от длины кода перебора всех возможных решений. При этом ширина недоступной пока для работы МПД декодеров области вблизи границы Шеннона уже достаточно мала. Возможно, размер этой зоны можно будет ещё несколько уменьшить в будущем. Но это уже чисто технологический вопрос.

Эффективность и быстроедействие наших методов подтверждается интерактивным взаимодействием монографии с нашими крупнейшими в мире порталами по Оптимизационной Теории (ОТ) кодирования www.mtdbest.iki.rssi.ru и www.mtdbest.ru. Десятки представленных на них демонстрационных модулей и новейшие программные платформы

для декодеров различного типа, в том числе и не относящихся к алгоритмам ОТ (!), особенно наглядно демонстрируют высокую достоверность, помехоустойчивость и уникальное быстроедействие наших методов, большинство из которых (около 40) запатентовано в России, за рубежом и даже ещё в СССР.

Все основные характеристики наших алгоритмов, судя по текущей ситуации в прикладных результатах теории кодирования, стали уже недоступны никаким другим методам коррекции ошибок с сопоставимой сложностью, причём разница между ними, насколько нам известно, очень велика. Это следует из того, что по триединому комплексному критерию «помехоустойчивость — достоверность — сложность» методы ОТ имеют абсолютно наилучшие возможные значения и по каждому из параметров критерия в отдельности. А все без исключения алгоритмы, развиваемые вне парадигм ОТ, не удовлетворяют этому критерию ни по одному параметру. Более того, их отставание от технологий ОТ очень значительно, что подтверждают наши новые обзоры по прикладным вопросам теории кодирования, которые можно найти в основных журналах по телекоммуникациям, в наших докладах на конференциях, а также просмотреть по ссылкам на наши новые публикации с номерами [73] и далее в конце данной монографии.

Вновь подчеркнем, что ни один параметр триединого критерия вообще не может быть вычислен для какого-либо алгоритма декодирования вблизи границы Шеннона сколько-нибудь точно. Иначе говоря, прежняя прикладная теория кодирования не научилась за 60 лет своего как бы «активного» существования даже просто определять эти самые главные параметры для хотя бы каких-либо эффективных алгоритмов вблизи пропускной способности каналов, т.е. она так и не умеет вообще ничего. Но этого никто, да и, видимо, никогда и не сможет! А масштабные интеллектуальные программные средства ОТ, активно помогающие в течение 50 лет теории ОТ ускоренно решать все проблемы в сфере кодирования, определяют все указанные выше параметры этого критерия практически мгновенно. И такого ПО до сих пор, видимо, нет ни у одного занимающегося кодами научного коллектива в мире. А тем самым и завершён глобальный конкурс алгоритмов в теории кодирования. У нашей ОТ конкурентов просто не оказалось! Но они нужны! С ними интереснее. Ну, будем искать.

Но есть ещё важнейшее обстоятельство при обсуждении конкурса алгоритмов и их параметров триединого критерия для большого уровня шума. Невозможность аналитической оценки главных свойств декодеров не позволяет кому-либо из специалистов, оставшихся в рамках «прежней» теории, создавать реальные эффективные

алгоритмы, поскольку оценить их характеристики в больших шумах, что нужно для успешного решения проблемы Шеннона, чисто теоретически совершенно невозможно. И, наверное, так будет всегда! Именно эта причина обеспечивает абсолютное лидерство ОТ в решении проблемы Шеннона, т. к. созданное школой ОТ за полвека многоцелевое интеллектуальное инновационное программное обеспечение (ПО) наряду с решением множества различных сложнейших проблем развития позволяет — и это самое главное! — практически мгновенно определять все эти три параметра критерия. Такое уникальное для мира теории кодирования ПО школы ОТ как раз и позволяет быстро создавать, корректировать и ускоренно развивать алгоритмы ОТ так, чтобы они в очень хорошем темпе приобретали наилучшие возможные характеристики. Это — главная причина исключения алгоритмов декодирования за пределами ОТ из всех конкурсов проектируемых и исследуемых декодеров. И снова укажем, что алгоритмы ОТ уже давно являются теоретически наилучшими по всем параметрам комплексного критерия: минимально возможная сложность, наивысшая оптимальная достоверность и максимальная близость области работы к пропускной способности цифровых каналов.

К сожалению, приведённые выше суждения при более строгом к ним отношении оказываются довольно беспредметными по одной довольно веской и грубой причине. Дело в том, что нам неизвестны никакие научные группы, которые за последние 30 лет предъявили вообще хотя бы один алгоритм, который можно было бы внимательно проанализировать по триединому критерию, просмотреть программу его реализации, например, хотя бы на языке C++ и «вживую» замерить её производительность. Таких предъявленных для сравнения алгоритмов просто вообще ни у кого нет! А это значит, что и обсуждать проблемы теории кодирования на содержательном уровне нам пока просто вообще не с кем. В связи с этим укажем тут ещё раз, что в наших книгах и на сетевых порталах школы ОТ приведены десятки демо-программ и представлено множество программных платформ, которые всегда непосредственно готовы показать специалистам все параметры упоминавшегося выше критерия для тысяч кодов, для которых можно именно «вживую» запустить МПД декодеры разных типов на этих платформах и мгновенно оценить все необходимые свойства кодов и алгоритмов. Т. е. у нас всё создано, работает и готово к использованию в разработках и исследованиях.

Но более того, мы выполнили за кого-то и совсем чужую работу: на наших порталах есть написанные нами демо-программы и для алгоритмов, не относящихся к ОТ. Посмотрите их тоже!

Важность сбалансированного развития теоретических и экспе-

риментальных исследований стала осознаваться во многих отраслях мировой науки ориентировочно с 80-х годов XX века и к концу тысячелетия уже активно и всесторонне учитывалась при различных исследованиях. Теория сама по себе всегда слаба и очень ограничена, а эксперимент, поставленный без теоретической поддержки, почти всегда неточен или даже просто ошибочен. Наша научная школа осознала эту взаимосвязь в науке где-то в 70-х годах. Некоторые важнейшие статьи по этой болезненной для теоретиков тематике можно было найти даже на портале РАН [96]. Приведём ряд выдержек из такой публикации: «Противостояние компьютерного моделирования и теории, основанной на математических методах, — болезнь века... Теоретик, работающий в любой научной области, знает, что далеко не все задачи можно решить аналитически: для подавляющего большинства проблем получить точные и даже приближенные решения не удастся... Комбинирование возможностей теории и моделирования — особая профессия, требующая сочетания навыков и талантов, необходимых теоретикам прошлого века и специалистам по компьютерному моделированию современности».

В наших исследованиях в рамках ОТ как раз правильная балансировка идей, методик, парадигм и теорем тонкой оригинальной теории с изощрённым оптимизационным моделированием обеспечила грандиозное синергетическое ускорение наших работ, позволивших в итоге решить великую проблему Шеннона тогда, когда весь мир отстал от нас, возможно, на 20–30 лет. Но и многие наши важнейшие результаты даже 35-летней давности до сих пор не повторил пока никто. Но это понятно почему: ни у кого нет вообще никакого программного обеспечения для работы с кодами, которое может создать только специалист, активно и глубоко занятый проблемами теории кодирования и хорошо понимающий ценность и возможности вычислительной техники с правильно выбранным ПО. Значит, таких пока и нет. Но следует заметить, что выбрать ПО для работ по кодированию и затем как-то заполучить его просто в принципе невозможно. ПО создаётся только самими специалистами по кодированию, и для этого требуются очень долгие годы! И тут ещё надо очень хорошо понимать, какой должна быть создаваемая экспериментальная база и что же именно должно уметь делать такое ПО. А это тоже требует немалого числа лет очень глубоких раздумий и разностороннего опыта.

В связи с этим мы полагаем также крайне важным и просто жёстко настаиваем на том, что исключительно для избавления научного сообщества от обмана и фальсификации научных результатов в теории кодирования, которые поразили вообще всю прикладную часть

нашей отрасли науки, в ближайшие годы следует допускать к публикации и защите диссертаций только реальные полезные научные работы. В них должны быть точно и строго описаны и проанализированы предлагаемые их авторами алгоритмы коррекции ошибок. Но при этом также обязательны к предъявлению и сами работающие алгоритмы. Они должны быть реализованы на языке C++, который позволяет писать программы с малыми накладными расходами сверх собственно операций декодера, а также допускает их полную проверку экспертами по прикладным вопросам теории кодирования и методам моделирования этих алгоритмов при большом уровне шума. Школа ОТ для калибровки сложности декодеров, т. е. скорости предлагаемых авторами новых алгоритмов, уже давно подготовила простую демо-программу на портале www.mtdbest.ru (см. гиперссылку [70] и краткое описание методов её использования [71]). Она общедоступна, готова для использования, понятна и абсолютно необходима для правильной оценки разработок всех новых алгоритмов декодирования, создаваемых специалистами.

Малые накладные вычислительные расходы языка C++, его свойства и некоторые элементы языка высокого уровня, а также другие его достоинства определяют совсем умеренные в этом случае требования к способностям авторов новых алгоритмов создавать их программные реализации. Такой подход к оценке новых результатов в прикладной теории кодирования с калибровкой параметров эффективности и производительности позволит, в основном, достаточно правильно оценивать реальные уровни сложности, достоверности и помехоустойчивости предлагаемых новых декодеров. Столь естественный уровень контроля правильности оценки основных свойств методов декодирования сразу наведёт порядок в прикладном научном уровне разработок всех типов декодеров. Только такое отношение к созданию алгоритмов декодирования, ни в какой мере не являющееся жёстким, позволит сразу избавиться от безбрежного потока фантазий, ошибок и просто откровенного обмана в исследованиях прикладных вопросов в сфере корректирующих кодов.

Мы не можем не выразить здесь и наше глубочайшее сожаление о том, что лозунг конца того тысячелетия: «Программирование — вторая грамотность!» — уже давно и прочно забыт. Его последствия для науки, как мы видим, тоже весьма трагичны. Без способностей к моделированию в науке делать вообще нечего (вспомните ссылку [96])! Ну, конечно, если при этом и теоретические разработки также ведутся на действительно высоком уровне.

Сторонники нашей школы всегда доступны для консультаций и с удовольствием будут всесторонне помогать авторам всех новых ал-

горитмов, которые будут иметь высокие реальные характеристики декодирования при малых отношениях сигнал/шум цифрового канала.

Нет сомнения, что активно развиваемая уже почти пять десятилетий ОТ и далее будет обязательно находить новые методы разработки декодеров и для таких проектов, когда имеющихся технологий создания эффективных кодеков вблизи границы Шеннона окажется в отдельных случаях всё же недостаточно. При этом нужно чётко понимать, что трудный процесс проектирования систем помехоустойчивого кодирования в дальнейшем будет развиваться только вместе с прогрессом широкомасштабных программных систем оптимизации и мощных комплексов поиска глобальных экстремумов функционалов всё более сложной природы, которые активно и теперь уже фактически повсеместно применяются в ОТ. Таким образом, дальнейший прогресс в создании технологий декодирования вблизи границы Шеннона будет ещё более жёстко связан с развитием компьютерной техники и со специальным программным обеспечением, чем ранее. Это вполне естественный ход развития реальных, а не кабинетных наукоёмких инновационных технологий. И, наверное, сейчас это единственный конструктивный путь. Наша научная школа ОТ и далее будет напряжённо работать, чтобы оставаться в лидерах теоретических научных исследований и разработок, а также поддерживать новых российских «Ньютонов», которые придут в обновлённую теорию кодирования.

Ключевым моментом полного успешного разрешения сложнейшей проблемы цифрового мира стало глубокое понимание теперь уже многими специалистами того важнейшего обстоятельства, что достижение, казалось бы, несбыточной мечты специалистов цифровой связи обеспечили именно методы теорий поиска глобального экстремума функционалов (ПГЭФ) в специфических условиях работы на массивах со свойствами корректирующих структур. Никаких оснований считать, что здесь конкурентоспособными будут и какие-либо другие методы, пока нет и, скорее всего, никогда не будет. Лучшего даже в теоретическом смысле уровня по достоверности и сложности, чем у ОТ, достичь уже в принципе невозможно. При этом и в плане близости к границе Шеннона сотни уже созданных версий МПД декодеров также оказались существенно лучше прочих известных подходов к коррекции ошибок. Это значит, что никаких вариантов появления других теорий столь же технологичного и особенно простого типа просто не предвидится. Пока лишь теории ПГЭФ и позволяют рассматривать только методы поиска оптимальных решений декодеров типа МПД со сложностью, пропорциональной длине кода. Другие методы с такой сложностью неизвестны.

Однако этот подход к проблеме декодирования оказывается рабо-

тоспособным только тогда, когда одновременно с разработками различных версий МПД декодеров правильно и абсолютно точно решается и задача выбора кода с низкими уровнями подверженности воздействию размножения ошибок (РО). А проблему малого РО правильно оценила и создала её отдельную полную содержательную теорию опять же только единственная в мире школа ОТ. Никакие иные группы специалистов за последние 50 лет не смогли даже просто правильно сформулировать для себя такую проблему. Действительно, без понимания философской глубины идей мажоритарных алгоритмов даже только правильно поставить задачу борьбы с группированием ошибок в МПД декодерах не получится.

Мы также с удовлетворением отмечаем запатентованный нами алгоритм Витерби для блочных кодов (БАВ) со сложностью аналогичных ему АВ декодеров для свёрточных кодов. Это соответствует уменьшенной вдвое экспоненте сложности блочного ОД, полученной в рамках прежних методов «теоретически». К сожалению, этот исключительно грандиозный по числу операций ОД с удвоенной экспонентой по сравнению со свёрточным идеальным алгоритмом Витерби уже много лет крайне агрессивно предлагается для изучения в ВУЗах [116], что абсолютно недопустимо. Как известно, NASA создала АВ декодер для кода длины $K = 15$. Наш БАВ был бы для аналогичного блочного кода в 16 000 раз проще, чем предлагает «та» теория.

Наш БАВ полностью исключил из любых конкурсов для блочных кодов методы, наработанные алгебраической теорией, в частности Чейза, Велдона и проч. Новые патенты на наши БАВ в школе ОТ уже также начали оформляться. И мы испытываем вполне понятное глубокое заслуженное удовлетворение от того, что именно классические великие алгоритмы мажоритарного типа и оптимальные АВ декодеры снова абсолютно обоснованно заняли главные позиции на Олимпе лучших алгоритмов коррекции ошибок для цифровых каналов.

Объединение всех типов АВ и различных модификаций МПД в группу ДПКМ декодеров, особых алгоритмов, единственных точно измеряющих расстояние своих решений до принятого сообщения, также абсолютно однозначно указало множество методов, которые, видимо, и далее 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 указанных расстояний даже в предположении возможности дальнейшего роста их сложности, не имеют ни перспектив движения к границе Шеннона, ни, тем более, других вариантов для развития. В

самом деле, для алгоритма, который не измеряет расстояний от своих решений до принятого сообщения, велика вероятность, что он «не увидит» и уже достигнутого решения ОД, вследствие чего он пройдёт мимо него. Понятно, что в нашей теории ОТ такая ситуация просто невозможна.

Не стоит даже останавливаться на истории рекламы и краха полярных кодов, которые стали, как мы думаем, ещё одной показательной катастрофой «прежней» теории, иллюстрирующей необходимость всегда решать научные проблемы только точно подобранными адекватными средствами. Несколько последних статей школы ОТ по кодам, где упоминались и полярные коды, можно посмотреть на наших порталах [40] и в обзорах [74, 90, 92, 93, 98, 103, 108]. Мы не намерены в дальнейшем возвращаться к этой проблеме, так как нас ожидают более актуальные и конструктивные задачи следующего этапа развития ОТ. И мы крайне сожалеем, что мы оказались сейчас единственным в стране (а возможно, что и в мире!) научным коллективом, который имеет право и даже просто обязан во спасение прикладной теории кодирования регулярно писать обзоры по этой теме. Однако более поручить эту сложнейшую многофакторную работу просто абсолютно некому. Но мы очень хотели бы найти таких мудрых коллег, с которыми можно было бы обсуждать все сложнейшие и интереснейшие проблемы развития нашей тематики, важнейшей для всего цифрового мира.

Разумеется, конкретные реальности уже ближайшего времени строго проверят правомерность нашего весьма жёсткого мнения по всем затронутым выше вопросам.

Таким образом, ОТ приняла во всём объёме эстафету развития прикладных методов от прежней теории. Это неудивительно, так как алгебраическая теория за многие годы своего очень условного лидерства не решила никаких основных проблем своего развития: не нашла простых способов коррекции ошибок выше уровня половины кодового расстояния, не преодолела сложностей декодирования блоковых кодов в гауссовских каналах, а также не вышла на линейный от длины кодов уровень сложности декодирования.

Необходимо, как мы полагаем, особенно отметить, что технологии микроэлектроники позволяли создавать АВ декодеры даже для кодов с длиной $K \sim 15$ ещё в том тысячелетии. Так что возрождение внимания к АВ и его новым модификациям, которыми мы тоже занимаемся, будет, несомненно, весьма масштабным. ОТ уже вносит свой вклад и в это прикладное направление, изучает характеристики блоковых АВ и патентует новые лучшие схемы такого класса. Возврат глубокого внимания к АВ обусловлен именно тем, что АВ —

простейший по логике идеальный оптимальный декодер (ОД), очень технологичный и понятный для инженеров. Именно поэтому он теперь снова будет развиваться и применяться. Однако забывшие и о нём теоретики просто не могли смоделировать даже его крайне простую схему, которая много лучше всех вариантов полярных и очень многих других «новых» кодов. Но это — проблемы «теоретиков».

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 (ПГЭФ). Конечно, по мере приближения рабочей области систем кодирования к пропускной способности канала количество необходимых декодеру операций будет несколько расти, что вполне понятно. Неизбежный при этом значительный рост задержки принятия решений тоже очевиден и при большом шуме просто обязателен, так как работать вблизи пропускной способности канала могут всегда только весьма длинные коды.

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 линейной сложности. Это типичная задача поиска глобального минимума функционала в дискретных пространствах с явно выраженной корректирующей структурой.

Вторым мощным оптимизационным средством, используемым при создании эффективных МПД или ДПКМ алгоритмов, стали методы поиска кодов, в наибольшей степени соответствующих критериям минимума размножения ошибок (РО) при декодировании. Для этого была создана абсолютно уникальная теория РО, совершенно не похожая на попытки 50-летней давности крайне примитивно 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, безусловно, самым сложным образцом успешного использования процедур глобальной оптимизации оказался целый класс методов комплексной настройки различных 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. Результаты создания мощных систем настройки сотен и тысяч элементов МПД при большом разнообразии целевых функций такой настройки декодеров дополнительно многократно повысили темпы схо-

димости 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 в принципе не доступен никаким другим методам «прежней» теории кодирования. И все эти результаты стали возможными только благодаря совместному развитию теории ОТ и специального интеллектуального оптимизационного ПО.

Нелишне в этой связи ещё раз 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 многие десятилетия из-за обычного в науке человеческого фактора с 80-х годов прошлого века очень болезненный переход к созданию эффективных декодеров именно на базе теорий глобальной оптимизации сложных функционалов завершён. С появлением в 1990 году нашей ОТ эта полная прикладная теория кодирования вышла из слишком длительного подготовительного как бы «классического» алгебраического этапа и перешла к широкому применению мощных и быстрых оптимизационных методов декодирования для всех технических систем, обеспечивающих простыми средствами высокую достоверность при экстремально большом шуме.

Так что теперь и нам, и очень многим специалистам ясно, что теория кодирования — вовсе не математическая проблема. Она не решила никаких поставленных перед ней прикладных задач. Вынужденно повторим, что неразрешённые противоречия прежней прикладной теории, до сих пор вообще абсолютно не признаваемые её адептами, кратко описаны в [96].

Важно также указать, что значительный вклад в развитие ОТ и её технологий вносят такие новые руководящие парадигмы, которых вообще не было до появления нашей теории: символьные коды и декодеры, дивергенция, каскадирование параллельное и с кодами контроля по чётности (ККЧ), БАВ, быстрые алгоритмы восстановления стираний и правило ДПКМ, чётко рекомендуемые к реализации те или иные методы из всего большого набора мощных технологий ОТ. Наиболее важную роль здесь, по нашему мнению, играет принцип дивергенции, а также параллельное каскадирование, которое впервые предложила тоже именно наша научная школа [52].

Упрощённые 3D-системы каскадирования тоже заслуживают внимательного изучения.

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

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

Мы полагаем, что читатели этой монографии будут абсолютно согласны с нами в том, что мы не затрагивали в ней (как и других наших книгах) особенности организации ускоренного технического развития в корпорациях, производящих аппаратуру помехоустойчивого кодирования. Они функционируют по совершенно особым своим законам. А мы обсуждали здесь только вопросы развития научного знания, которые и без того чрезвычайно сложны.

Просмотрев немалое количество публикаций большого числа авторов, пишущих статьи «про коды», что делалось в поисках коллег, с которыми можно было бы наладить сотрудничество по новым направлениям ОТ, мы испытали ещё одно огромное разочарование. Уже в нашем тысячелетии продолжают «исследования» и докторские защиты по «интереснейшим» темам, которые мы полагаем насмешкой над наукой. Например, в нашем веке, как ещё и в самом конце прошлого, очень популярны темы снижения экспоненты сложности декодирования в 2–3–5 раз по сравнению с полным перебором. Причём нередко эти «результаты» оказываются практически единственными, которые в их диссертационных работах вообще можно как-то обсуждать. Но это значит, что даже для относительно коротких кодов длины $n \sim 10^4$ соответствующие «декодеры» должны выполнить порядка $N \sim 10^{200}$ операций, что на много порядков превышает число атомов во Вселенной. И авторы таких «работ» как-то «не заметили», что простейшие оптимальные декодеры с линейной, т. е. минимально возможной сложностью есть уже даже в нашем справочнике 2004 года [1], а также были опубликованы в 1981 г. в [37], в [2] в издательстве «Наука», в 1981 г., в диссертации 1978 г. [38], а также в 1990 г. в другой диссертации [36]. Про абсолютно неприемлемый по сложности блочный аналог декодера Витерби уже был комментарий на предыдущих страницах.

Кроме того, огромный поток статей «о быстром декодировании» кодов Рида — Соломона и многих прочих чудесах «прежней» теории, везде со сложностью, как и раньше, порядка $N \sim n^2$, а то и более, также не демонстрирует знаний таких «учёных» о наших символьных кодах также с линейной сложностью и оптимальным декодированием, т. е. при $N \sim n$, которые уже давно даже помещены в справочник [1]! И ведь это всё тоже было опубликовано нами в изданиях Научного совета по комплексной проблеме «Кибернетика» АН СССР ещё в 1985 г. [39] (!), как и в десятках других статей и докладов тоже в том тысячелетии. Большое множество подобных непостижимых при

нормальном развитии науки ситуаций, как и раньше, сопровождают развитие воистину актуальнейшей из информационных наук при формировании цифрового мира в течение всех 50 лет существования ОТ.

Таким образом, у той «теории» и её адептов нам найти ничего конструктивного не удалось.

Желающие могут ещё посмотреть также работы известнейших специалистов немногих «цитаделей» нашей отрасли науки на портале www.mathnet.ru. Там очень легко найти декодеры, которые работают при уровне входного шума, на 2 порядка (!) меньше, чем это могли делать ещё 60 лет назад очень слабые уже тогда коды БЧХ. Зато всё это удалось посчитать?! Увы, это всё «научные труды» тех жертв науки, которые не поспевают за её развитием, т. е. на самом деле в принципе не желают поспевать. И таких «чудес» у подобных разных как бы «математиков» непозволительно много. А наша крайняя непочтительность к этим публикациям определяется как экстремально слабыми их результатами, которые просто нельзя было публиковать даже 50 лет назад, так и абсолютной невозможностью проверки правильности публикуемых ими данных вообще. В связи с этим мы вынуждены снова обратиться к нашему буклету [90] и к статье [96], мнение автора которой является выстраданным результатом проверки очень многих теоретических «шедевров». Этот печальный огромный список катастроф научных биографий, спровоцирован самими создателями подобных «достижений». Они уже более 40 лет прекрасно существуют вне реальной науки и не замечают, что она уже ушла на десятилетия далеко вперёд и даже скрылась где-то там за горизонтом. Столь невероятная трагическая ситуация безответственного игнорирования развития науки и затапывания чужих идей ещё ждёт своих строгих аналитиков. Нашу отрасль науки давно пора лечить.

Так что наша самая современная и обогнавшая всех ОТ давно поняла, что она должна только сама создавать условия для воспитания новых молодых образованных кадров, на которые только и остаётся надеяться в ближайшие годы. Именно эту работу и проводят одиннадцать наших книг, сотни статей, справочник, обзоры и наши самые большие в мире учебно-методические порталы по современным методам помехоустойчивого кодирования с описанием технологий, парадигм, методик, демо-программ и специальных удобных программных платформ для реальной научной, учебно-педагогической и просветительской работы.

Мы полагаем, что объявить о полной смене лидирующей идеологии в прикладной теории кодирования можно было ориентировочно 15–20 лет назад, когда уже давно была создана теория ОТ, решены все принципиальные вопросы эффективности по всем алгоритмам, в

том числе для символьных кодов, для стирающих и для ДСК каналов. Напомним, что полная теория ОТ была завершена во всех аспектах ещё раньше, к 1990 году [36]. В это же время для гауссовских каналов МПД алгоритмы успешно работали при энергетике, превышавшей уровень границы Шеннона примерно на ~ 2 дБ. Однако уровень развития и быстродействие доступной вычислительной техники и созданного нами ПО ещё не позволяли нам в те годы найти коды и такие методы оптимизации, которые приблизили бы рабочую область МПД алгоритмов к пропускной способности гауссовского канала хотя бы до уровня полутора децибелов. Поэтому мы ответственно приняли тогда единственно правильное решение сначала дополнительно улучшить достигнутые к тому времени характеристики МПД декодеров в гауссовских каналах и только после этого объявить о нашем полном решении поставленной К. Шенноном задачи.

Сейчас вполне реализуемые МПД алгоритмы, например, в гауссовских двоичных каналах работают при относительной энергетике, которая по мощности лишь на 26 %, т. е. только на 1 дБ, превышает уровень абсолютно упругой и в принципе вообще недостижимой границы Шеннона. Такие характеристики уже недоступны никаким другим алгоритмам декодирования. Получены и проверяются уже и ещё более впечатляющие результаты. Это и позволяет нам заявить именно теперь о полном переходе лидерства во всех прикладных вопросах в теории кодирования к новой «квантовой механике» теории информации, названной нами Оптимизационной Теорией помехоустойчивого кодирования. Мы с удовлетворением отмечаем, что весь мир быстро разбирается в реальных проблемах кодирования и неплохо понимает нашу ОТ.

Представленная на рис. 1 (слайд из [90]) структура ОТ показывает её основные компоненты. Темы 1, 2 и 3, как видно на рисунке, мы

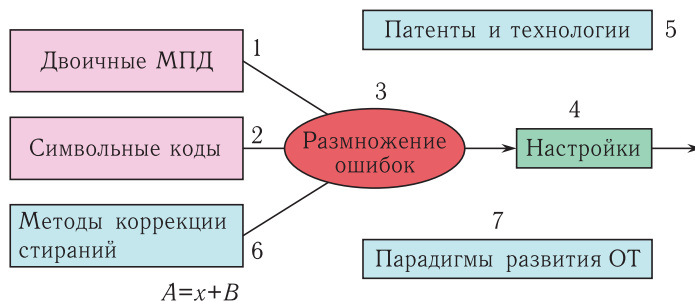


Рис. 1. Открытия Оптимизационной Теории:

- 1, 2, 3 — нобелевские достижения (после 60 лет застоя!);
4, 5, 6, 7 — важнейшие открытия теории кодирования.

и некоторые наши коллеги уже давно относим к нашим безусловно нобелевским достижениям, а темы 4–7 содержат много принципиально важных открытий в теории кодирования. Это неудивительно, т. к. уровень текущего состояния ОТ опережает результаты всего мира примерно на 30 лет (или более?!), а для каждого из многих десятков патентов всегда есть, конечно, ещё 3–5 уточняющих его «ноу-хау». Но чтобы только просто приблизиться к нашему уровню, эти патенты и их детали надо сначала хотя бы прочесть и, конечно, понять! Мы никого не видим близкими к нам даже на горизонте.

На рис. 2 (слайд из [90]) представлен граф популярности ОТ в мире.



Рис. 2. Показатели популярности ОТ

Мы видим, что технологически развитые страны активно интересуются реальными достижениями научного мира, в том числе и нашими.

И, наконец, чуть детальнее рассмотрим слайд из [90] о сути оптимизационных технологий.

На этом заключительном слайде по горизонтальной оси условно отложены реалистичные цифры для обычного двоичного симметричного канала (ДСК), т. е. некоторые правдоподобные условия передачи по шумящему каналу связи.

А по вертикальной оси — также типичные вероятности ошибки на бит некоторого МПД алгоритма, потенциальные возможности которого при оптимальном декодировании изображены графиком $P_{\text{opt}}(e)$. График p_0 соответствует уровню шума в ДСК канале. Ниспадающие линии $I = 10$, $I = 20$ и $I = 30$ — примерные графики для вероятности ошибки реального МПД алгоритма с разным числом итераций декодирования. Конкретно рассчитать точное местоположение этих

графиков на слайде в ОТ тоже нельзя. Ориентировочная оценка количества необходимых для этого операций имеет абсолютно неприемлемую сложность, близкую к экспоненте от произведения кодового расстояния d на число итераций декодирования I . И ещё нужно придумать, как вывести эту формулу, если это вообще будет возможно. Но в ОТ эта ситуация типична и давно понятна. Моделирование в течение минут решает все такие вопросы абсолютно однозначно.

Отсюда ясна и вполне разумная простая технология проектирования МПД по некоторому техническому заданию (ТЗ), пример которого есть в Приложении 1 к этой монографии. Пусть для некоторого непротиворечивого ТЗ МПД должен достигнуть уровня оптимального декодирования при определённой вероятности ошибки канала (в данном примере — ДСК), которая находится в области между вычислительной скоростью канала и границей Шеннона, т.е. пропускной способностью канала для выбранной кодовой скорости. Если вероятность ошибки канала, заложенная в ТЗ, меньше этой вычислительной скорости, то для хорошего кода с малым уровнем РО никаких проблем нет и вообще без каких-либо усилий выбор нужного числа итераций решает задачу достижения оптимальной кривой на слайде. Но даже и в этом случае нужна хотя бы простейшая программа моделирования работы МПД в ДСК (для этого примера).

Если уровень шума в ДСК очень близок к границе Шеннона, то это — предмет научных исследований и здесь надо хорошо потрудиться с использованием всех ресурсов ОТ.

А вот если уровень шума ДСК больше вычислительной скорости, но не предельно высок, то это тот самый случай, когда отработанные программные оптимизационные технологии, работающие в соответствии с основными руководящими парадигмами ОТ, всегда обеспечивают достижение уровня оптимального декодирования при достаточ-

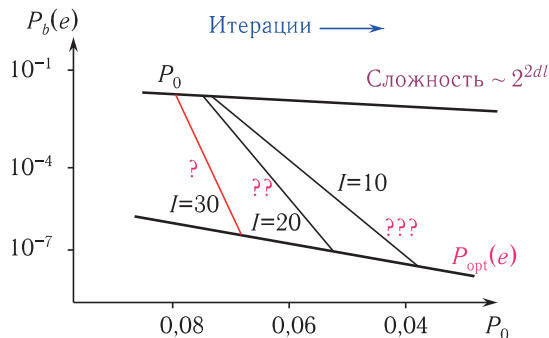


Рис. 3. Варианты стремления решений МПД к оптимальному

но высоком заданном уровне относительного шума. В этом случае в течение нескольких часов или дней создаётся один или даже несколько возможных вариантов вполне технологически реализуемого МПД алгоритма с такими параметрами триединого критерия, которые не могут теперь обеспечить вообще никакие другие методы коррекции ошибок. Тем самым и прорисовывается абсолютно точно одна из ниспадающих линий (реально, конечно, каких-то конкретных кривых) на слайде, т. е. реальных характеристик достоверности созданного МПД, которые в принципе невозможно найти аналитически. Результаты работы такой самонастраивающейся системы однозначно определяют и все параметры сложности созданного МПД.

Включение в состав проектируемых систем одной из модификаций АВ приводит к требуемому результату ещё быстрее, т. к. алгоритмы АВ всех типов по определению оптимальны и циклы настроек и оптимизации для них оказываются ещё короче.

Варианты совместного применения АВ и МПД также, видимо, будут вскоре публиковаться.

В процессе разработки алгоритмов АВ и МПД мы не смогли даже примерно указать хотя бы такое ограниченное пространство параметров систем кодирования, где бы было предпочтительнее применить другие классы методов коррекции ошибок. Пока мы полагаем, что дальнейшая разработка всех прочих известных типов декодеров, не соответствующих лучшим значениям параметров триединого критерия и свойствам алгоритмов группы ДПКМ, совершенно нецелесообразна.

* * *

Завершая столь напряжённую и трудную работу, позволим себе хорошо известный шуточный комментарий к выполненному проекту, который, как многие согласятся, относится к историческому периоду ускоренного динамичного прогресса в научно-техническом развитии.

Стадии закончившегося успешного проекта:

Шумиха,

неразбериха,

наказание невиновных,

награждение непричастных...

Если теперь вспомнить об эпиграфе американского философа перед авторским обращением к читателям, то можно проследить интересную связь его почти серьёзных слов с этим шуточным воспоминанием о реализации проектов в условиях научно-технического прогресса (НТП). В самом деле, кто, кроме нас, может сейчас «...утверждать, будто сам открыл ОТ»?

Сообразно с текущими реальностями нам кажется, что никто не

сможет объявить, что сделал всё это сам, а не мы. Ну, так не получится просто потому, что в такое (!) мало кто вообще поверит.

Т. е. великий проект завершён только нами! И — ВСЁ!

А тогда, обращаясь к приведённому выше комментарию, после окончания проекта возникает и вопрос о невиновных с непричастными. Тут опыт показывает, что конкретно и в нашем случае с непричастными во всех смыслах полный порядок. Действительно, их уже хорошо наградили, да и не один раз. Разумеется, без нас. Но мы не будем ничего конкретизировать. Тут всё хорошо. Здесь всё идёт по проторённым отлаженным схемам, т. е. как это и положено.

А вот как-то наказать — да, такое возможно. И даже кое-что уже было вполне успешно сделано. Нас недавно отлучили от РФФИ, написали забавные рецензии на некоторые наши работы, подчеркнув там много раз, что кроме кодов Рида — Соломона (РС) ничего лучшего в мире нет и быть не может, ну, и т. д. Правда, получилось это всё у них как-то очень вяло и уныло. Однако, это мелочи. Но всерьёз-то наказывать за что? Это весьма трудно. У нас всё-таки есть великие достижения нобелевского уровня по трём позициям. Маленькая научная школа ОТ обогнала весь мир на 30 (или более ?!) лет. Часто ли такое бывает? Нет, ни разу не слышали. И всё-то мы делали сами, бесплатно, а не по договору, на чистом энтузиазме. Ну, а поскольку даже маленькой зацепки, никакого реального повода нет, то и серьёзного наказания, видимо, не будет.

Вот в итоге и получается, что у нас вообще-то всё в порядке.

Хорошо, что мы прожили эти годы по принципу всех пионеров: «Через тернии — к звёздам»!

Так что поздравляем всех с величайшим успехом нашей науки!

* * *

И в заключение подчеркнем, что огромное разнообразие всевозможных схем глобального поиска образует совершенно грандиозное интеллектуальное поле для создания самых неожиданных новых кодов, алгоритмов и технологий. На их основе, как мы уверены, новые талантливые исследователи, молодые российские «Ньютоны», проектировщики и инженеры впишут следующие страницы в ОТ и предложат нашей цивилизации самые лучшие технологичные и быстрые системы обеспечения высокого уровня достоверности при передаче, хранении, восстановлении и контроле целостности данных для современного цифрового информационного мира.