

Предисловие научного редактора монографии В.В.Золотарёва «Теория и алгоритмы многопорогового декодирования»

Начавшийся в конце прошлого тысячелетия интенсивный переход к системам обработки и передачи информации цифрового формата на сегодня становится всё более масштабным и характеризуется весьма быстрым и значительным повышением требований к достоверности цифровых данных. Несомненно, ведущую роль в обеспечении высокого уровня надёжности и качества передачи дискретной информации играют современные методы помехоустойчивого кодирования.

За более чем полувековую историю развития теории и техники помехоустойчивого кодирования основные методы и подходы к решению главной проблемы этой научной дисциплины – максимально простого и одновременно очень эффективного декодирования – неоднократно и весьма существенно менялись. Если сначала ведущими направлениями теории кодирования были интересные разработки алгоритмов исправления ошибок на базе алгебры конечных полей, то затем, после некоторого периода увлечения специалистов очень простыми и понятными мажоритарными методами, наступила эра алгоритма Витерби. Этот алгоритм был с теоретической точки зрения максимально сложным, переборным, но настолько эффективным, что значительный период времени всё развитие теории кодирования и создание конкретных устройств исправления ошибок для спутниковой связи были сконцентрированы именно на этом методе. Правда, использовать длинные коды для декодера Витерби было невозможно из-за проблемы сложности декодирования, экспоненциально растущей с увеличением длины кода.

Последовавший затем период эффективной реализации каскадных методов кодирования успешно завершился внедрением в технику связи каскадных кодов на базисе сверточных кодов и кодов Рида – Соломона. При этом, как и предсказывала теория, на практике действительно оказалось, что каскадные коды позволяли при меньшей сложности декодирования по сравнению с исходными некаскадными методами обеспечивать одновременно и гораздо более высокие характеристики помехоустойчивости. Однако, несмотря на большой прогресс в теории и в микроэлектронной технологии, характеристики систем кодирования и последующего декодирования до конца 80-х гг. оставались всё ещё весьма далёкими от теоретически возможных пределов.

Только появление в 1993 г. турбо кодов показало специалистам, что практически полное использование ёмкости цифровых каналов связи оказывается уже вполне реальной технической задачей. Множества турбо подобных и некоторых других кодов доказали, что уже действительно

появились способы гораздо более эффективного использования пропускной способности очень дорогих космических, спутниковых и многих других цифровых каналов связи, чем это было возможно до сих пор. Энергетика гауссовских каналов при использовании некоторых кодов этих классов может быть всего на несколько десятых долей децибела более высокой, чем это определяется основным теоретическим ограничением: равенством кодовой скорости и пропускной способности канала. Ни о чём подобном до этого специалисты не могли и помыслить. А ведь уже давно было известно, что снижение допустимой энергетике сигнала всего на несколько десятых долей децибела для каналов достаточно масштабных сетей приводит к огромному экономическому эффекту. Если в 1980 г. известный американский специалист, автор классических книг по теории кодирования Э. Берлекэмп в одном из своих обзоров утверждал, что каждый децибел снижения энергетике канала связи оценивается в миллион долларов, то при современном масштабе цифровых сетей экономическая ценность применения кодирования возросла во много десятков раз. Понятно, что это происходит в результате существенного повышения скорости передачи цифровых данных, значительного снижения размеров очень дорогих антенн, многократного увеличения дальности связи, а также многих других весьма важных достоинств систем связи, использующих кодирование. Этим и определяется важность для всей отрасли телекоммуникаций работ по созданию эффективных декодеров, в связи с чем на десятках ежегодных международных конференций вопросы помехоустойчивого кодирования практически всегда оказываются среди самых актуальных.

Однако истекшее десятилетие однозначно показало, что множества турбо подобных и некоторых других кодов всё же не решили проблему сложности декодирования. Более того, сегодня даже продолжающееся весьма быстрое развитие микроэлектронных технологий не позволяет утверждать, что в достаточно высокоскоростных каналах можно рекомендовать применение турбо кодов. Во многих случаях декодеры для этих кодов будут гораздо более медленными, чем это требуется, или чрезмерно дорогими.

Новое очень эффективное решение проблемы сложности декодирования при одновременной реализации высоких энергетических характеристик систем кодирования на базе многопороговых декодеров (МПД) ясно и доступно изложено в предлагаемой читателю книге известного отечественного специалиста в области помехоустойчивого кодирования доктора технических наук В.В. Золотарёва. Первые авторские свидетельства на изобретения, закрепляющие приоритеты автора этого удивительно простого и очень эффективного метода, относятся к 1972 г. За истекший период им создана всеобъемлющая теория этого уникального метода, а в системы связи различного назначения внедрено множество конкретных разработок МПД декодеров с очень высокими характеристиками.

МПД алгоритмы, как и большинство декодеров для турбо кодов, являются итеративными процедурами. Однако турбо коды появились на 20 лет позже многопороговых алгоритмов, которые и в те годы, и в настоящее

время продолжают весьма динамично развиваться и интенсивно патентуются. Но самое главное заключается в том, что мажоритарные процедуры позволяют реализовать фактически их полное распараллеливание и определяют, в конечном счёте, условия для создания высокоскоростных декодеров этого типа с очень высокими энергетическими характеристиками.

Ещё одно важнейшее преимущество МПД алгоритмов перед многими другими процедурами коррекции ошибок состоит в том, что они обладают свойством строгого роста правдоподобия своих решений в течение всего процесса исправления ошибок в искажённом шумами сообщении. Никаких строгих доказательств подобных уникальных свойств для других методов декодирования до сих пор неизвестно. Разумеется, при достижении МПД декодером самого правдоподобного решения оно оказывается оптимальным, таким, которое обычно требует полного перебора всех возможных решений, как это очень элегантно выполняет, в частности, алгоритм Витерби. Но сложность МПД, конечно же, остается линейно растущей функцией от длины используемого кода. Поэтому МПД, в отличие от декодера Витерби, легко оперирует очень длинными кодами, что и позволяет ему обеспечивать высокие характеристики помехоустойчивости и энергетического выигрыша.

При прочтении книги читателям становится ясным ещё одно важное, можно даже сказать, драматическое обстоятельство: почему алгоритм МПД так и не был открыт зарубежными специалистами. В 70-е гг. они публиковали большое число результатов по повторным попыткам декодирования сообщений, в которых некоторая доля искажённых символов уже была исправлена на первом шаге коррекции ошибок. Вполне очевидным это становится после прочтения предлагаемого читателю данного теоретического и прикладного исследования.

Причины абсолютного лидерства методов МПД декодирования состоят в следующем.

1. Никто до автора этой книги не пытался решать задачу такой модификации простейшего из известных методов декодирования, мажоритарного, в результате которой он обладал бы способностью строгого улучшения своих решений при всех изменениях декодируемых символов. В самом деле, стремление сделать из очень простого алгоритма метод, практически не отличающийся по своим характеристикам от оптимальных переборных процедур, может быть только похвальным, однако оно же является и чрезвычайно рискованным. Но такая задача была автором поставлена – и решена!

2. Ещё одна, идеологически намного более сложная проблема, одновременно решавшаяся – и решённая (!) автором, состояла в глубоком анализе причин группирования ошибок на выходе мажоритарного декодера. Именно это группирование делало бесполезными повторные попытки декодирования, что и подтверждалось многими экспериментальными работами по кодам в 70-х гг. А на самом деле следовало бы на основе глубокого и всестороннего анализа группирования ошибок декодера, известного как эффект размножения ошибок, максимально минимизировать

его и найти такие коды, в которых эффект размножения ошибок почти не проявляется. И эта задача тоже была решена автором с использованием математических методов, ранее никогда не применявшихся в области помехоустойчивого кодирования.

Только одновременное решение этих двух взаимосвязанных проблем и позволило создать специальные коды и итеративные процедуры с простейшими мажоритарными функциями, которые даже при очень высоких уровнях шума могли постепенно в течение многих итераций улучшать достоверность принятых из канала сообщений и в абсолютном большинстве случаев находить оптимальные решения.

3. Но на самом деле успех разработок МПД алгоритмов связан с решением ещё одной классической задачи: оптимизации функционала от очень большого числа переменных. Как совершенно справедливо указывает автор, возможность вариации целого ряда параметров кодов и декодеров, в частности, весов проверок, значений пороговых элементов и разностных соотношений в полиномах используемых кодов создаёт дополнительные условия для улучшения характеристик МПД декодеров. Таких настраиваемых элементов в декодерах может быть много сотен и даже тысяч. Но после правильного выбора этих элементов оказывается, что автоматизированная компьютерная оптимизация параметров декодера ещё на этапе его проектирования заметно улучшает и так достаточно высокие характеристики многопорогового алгоритма вообще без какого-либо увеличения итоговой сложности и объёма вычислений реального разработанного декодера с такими улучшенными параметрами. Заметим, что постановку этой третьей проблемы для других систем декодирования даже невозможно вообразить, поскольку она может возникнуть только параллельно с решением первых двух описанных выше проблем эффективного и простого декодирования для МПД алгоритмов.

Таким образом, успех теории и прикладных достижений в области простого и эффективного декодирования средствами МПД определяется одновременным успешным решением трёх вышеприведённых сложнейших проблем, каждая из которых так или иначе связана с решением задач оптимизации функционалов от большого числа переменных. Отсутствие удовлетворительных решений хотя бы одной из них, несомненно, многократно понизило бы ценность возможных достижений в области итеративных мажоритарных схем декодирования, поскольку все их характеристики в этом случае были бы весьма и весьма скромными.

В книге представлены и другие, очень необычные для традиционных способов декодирования методы. Фактически все они служат главной цели: максимальному увеличению эффективности декодера при минимальной сложности его схемы. К ним можно отнести каскадирование с простейшими кодами контроля по чётности, результаты по параллельному кодированию, а также коды с выделенными ветвями.

Совершенно особое место среди предложенных автором алгоритмов занимают также впервые описанные им МПД декодеры для недвоичных

кодов. Они существенно перекрывают по своей эффективности коды Рида – Соломона, оставаясь столь же простыми в реализации, как и их двоичные аналоги. Удивительно, но за многие десятилетия развития теории кодирования такое очевидное обобщение мажоритарных методов на недвоичные цифровые потоки данных так и не было сделано ни одним исследователем, кроме автора этой монографии. Преимущество недвоичных МПД перед кодами Рида – Соломона оказывается сразу настолько значительным, что фактически можно говорить о том, что открытые более 20 лет назад эти новые коды и алгоритмы знаменуют собой совершенно новую эпоху в обработке символьной информации. Для этого типа МПД просто вообще нет никаких других методов любой сложности, которые могли бы сравниться с ним по эффективности. Как и при разработке других полезных подходов к коррекции ошибок, автор достиг очень значимых результатов для недвоичных кодов только за счёт перехода к гораздо более длинным кодам, чем единственные доступные в настоящее время коды Рида – Соломона. Разумеется, у недвоичного МПД сохранена предельно малая сложность декодирования, присущая мажоритарным методам. Эти коды также найдут широкое применение в сфере обработки, хранения и передачи данных.

Интересно и то, что МПД алгоритмы, предназначенные для борьбы с ошибками тракта передачи данных, без каких-либо изменений можно успешно применять и для повышения помехоустойчивости, и для сжатия данных, т.е. для одновременного решения второй важнейшей задачи теории информации – кодирования некоторых видов источников.

Наконец, нельзя не подчеркнуть, что все описанные МПД алгоритмы настолько просты в реализации и одновременно высокоэффективны, что именно их программные версии успешно прошли строгие испытания и были приняты к использованию в системах специального цифрового телевидения, а для соответствующих им кодов начата процедура стандартизации.

Предполагалось, что появление данной книги должно было произойти лет на десять раньше. Тогда сейчас можно было бы говорить об её очередном переработанном издании. Однако её автор, тем не менее, на протяжении всего этого времени старался знакомить научно-техническую общественность с новыми разработками в области кодирования. Важным событием для отечественных специалистов стал выход в 2004 г. справочника В.В. Золотарёва и Г.В. Овечкина «Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы» в издательстве «Горячая линия – Телеком». Он позволил значительно расширить сферу применения МПД алгоритмов и заметно ускорить их разработку для широкого круга прикладных задач.

Большой вклад в развитие теории и техники кодирования внесли также ставшие регулярными выступления автора книги и его многочисленных коллег на традиционных ежегодных Международных конференциях по цифровой обработке сигналов в Москве. Широко известен специалистам и ставший уже очень большим специализированный двуязычный сайт ИКИ РАН www.mtdbest.iki.rssi.ru по методам многопорогового декодирования. На нём представлено около двухсот единиц теоретических, методических,

учебных и демонстрационных материалов по этому алгоритму, включающих даже серию специальных компьютерных фильмов, ярко демонстрирующих в динамике особенности работы МПД декодеров.

Работы В.В.Золотарёва по теории кодирования и разработкам алгоритмов декодирования заслуженно отмечены Премией Правительства РФ в области науки и техники

Завершая представление этой, конечно же, весьма необычной по своим методам и результатам книги о лучших за последние годы достижениях отечественных исследователей в области помехоустойчивого кодирования, хочется пожелать автору и его ученикам дальнейшей успешной работы на необозримой ниве высококачественных цифровых сетей. Выход такой важной для теории и техники связи монографии в период интенсивного перехода мирового сообщества на полностью цифровые методы формирования, хранения, обработки и передачи данных, безусловно, ускорит все процессы совершенствования систем связи и дальнейшего роста качества информационного обслуживания нашего общества.

Быстрое современное развитие техники кодирования и непрерывный рост возможностей элементной базы ещё более расширят сферу применения как самого МПД алгоритма, так и множества его модификаций. Конечно, и для ряда других методов реализация декодирования окажется при этом вполне доступной задачей, даже если в настоящее время они ещё кажутся слишком сложными. Но совершенно очевидно, что только те методы кодирования, которые наиболее целенаправленно и экономно расходуют свои вычислительные ресурсы для решения задачи коррекции искажений в цифровых потоках данных, действительно окажутся предельно быстрыми, наиболее эффективными и самыми доступными для широкого применения в сетях связи.

Член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки РФ
Лауреат Государственной премии РФ
и Премии Правительства РФ Ю.Б. Зубарев