

Предисловие научного редактора

Развитие современной цивилизации во все большей степени базируется на использовании информационных технологий. Сейчас они переживают бурный процесс перевода в цифровой формат, что позволяет организовать процессы создания, передачи, хранения и обработки данных на принципиально новой основе, гарантирующей высокую степень целостности и доступности цифровой информации.

Однако эта фаза развития информационных технологий характеризуется весьма быстрым и значительным повышением требований к достоверности цифровых данных. Ведущую роль в обеспечении высокого уровня надежности и качества передачи и хранения 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 разработки алгоритмов исправления ошибок на базе алгебры конечных полей, то затем наступила эра алгоритма Витерби. Этот алгоритм был с теоретической точки зрения максимально сложным, переборным, но настолько эффективным, что значительный период времени все развитие теории кодирования и создание конкретных устройств исправления ошибок для спутниковой связи было сконцентрировано именно на этом методе. Правда, использовать длинные коды для алгоритма Витерби было невозможно из-за проблемы экспоненциально растущей с увеличением длины кода сложности декодирования.

Последовавший затем период дальнейшего поиска эффективных методов кодирования успешно завершился внедрением в технику связи каскадных кодов. 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 годов оставались все еще весьма далекими от теоретически возможных пределов.

Только появление в 1993 году турбо кодов показало специалистам, что практически полное использование емкости цифровых каналов связи оказывается уже вполне решаемой технической задачей. Множества турбо подобных и некоторых других кодов доказали, что действительно существует реальная возможность 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, в принципе, всего на несколько десятых долей децибела более высокой, чем это определяется основным теоретическим ограничением: равенством кодовой скорости и пропускной способности канала.

Последующие достижения и перспективы теории кодирования обычно связывают с низкоплотностными (LDPC) кодами. Их сложность декодирования была немного меньшей, чем у турбо кодов, но все же еще слишком высокой. Тем не менее, промышленность освоила производство целого ряда декодеров и этого типа, что позволило говорить о дальнейшем прогрессе техники кодирования.

Вместе с тем все примеры использования турбо и LDPC кодов с приемлемыми параметрами в очередной раз показали, что характеристики декодеров для этих кодов заметно ухудшаются в реальных условиях их создания из-за вынужденных упрощений самих алгоритмов по сравнению с идеальными условиями их моделирования в исследовательских лабораториях. Заметное снижение энергетического выигрыша кодирования (ЭВК) – параметра, непосредственно характеризующего полезность кодов для систем, например, спутниковой связи, – достигается при создании реальных декодеров этих типов величины 0,5...1,0 дБ, что и свидетельствует о том, что главная задача кодирования: исправлять проще, быстрее и при более высоком уровне шума – еще очень далека от своего окончательного решения. Следует также указать на то, что и быстродействие декодеров указанных выше кодов,

реализованных с учетом всех достижений микроэлектроники, остается далеко не столь высоким, как это часто требуется, что также сильно ограничивает область их использования.

Необходимо отметить, что полезность применения кодирования, например, в технике связи при передаче двоичных данных обычно определяется именно параметром ЭВК, который просто характеризует величину эффекта увеличения мощности передатчика системы связи, использующей хорошие методы кодирования и, главное, последующего декодирования принятого цифрового потока. А поскольку эта величина может достигать 3, 5 и даже 10 и более раз (свыше 10 дБ), то становится понятным исключительная важность кодирования, которое создает системе связи столь большой запас по мощности. Если в 1980 году известный американский специалист, автор классических книг по теории кодирования Э. Берлекэмп в одном из своих обзоров утверждал, что каждый децибел снижения энергетики канала связи оценивается в миллион долларов, то при современном масштабе цифровых сетей экономическая ценность применения кодирования возросла еще во много десятков раз. Это происходит в результате появления возможности существенного повышения скорости передачи цифровых данных, значительного снижения размеров очень дорогих антенн, многократного увеличения дальности связи, а также многих других весьма важных достоинств цифровых систем связи, использующих помехоустойчивое 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 всегда оказываются среди самых актуальных.

Текущее состояние исследований и применения недвоичных кодов и алгоритмов их коррекции еще более проблемно. Через 50 лет после открытия кодов Рида–Соломона (РС) оказывается, что наилучшими и единственно реализованными декодерами для недвоичных кодов до сих пор остались именно они. Но даже текущее состояние технологии создания декодеров для недвоичных кодов по-прежнему не позволяет использовать коды РС длиннее 255 символов. Поэтому для новых дисков Blue-Ray и в других сложных системах защиты и надежного хранения символьных

(байтовых) данных все еще используют различные комбинации, в том числе и каскадные, именно коротких кодов РС. Это мало повышает достоверность и защищенность хранимых данных при большом уровне искажений, одновременно заметно увеличивая требуемую для таких схем избыточность и существенно снижая скорость обработки.

Таким образом, реальное состояние теории кодирования, имеющегося множества конкретных методов кодирования и, главное, декодирования, в настоящее время далеко от их потенциальных возможностей. Даже в случае достижения высоких вычислительных мощностей аппаратуры параметры имеющихся декодеров разных типов остаются все еще далекими от требований простоты реализации при высокой достоверности декодированного цифрового потока в случае высокого уровня шума.

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 известных российских специалистов в области помехоустойчивого кодирования члена-корреспондента РАН Ю.Б. Зубарева, профессора В.В. Золотарёва и доктора технических наук Г.В. Овечкина. Первые авторские свидетельства на изобретения, закрепляющие приоритет СССР в разработке этого удивительно простого и очень эффективного метода, относятся к 1972 году. За истекший 40-летний период разработки и исследований методов помехоустойчивого кодирования авторами этой книги создана всеобъемлющая оптимизационная теория помехоустойчивого кодирования.

Она фактически уже позволила решить на хорошем прикладном уровне все основные задачи создания кодов для МПД, оптимизации параметров декодеров и найти новые классы задач, которые могут быть решены с использованием их новой плодотворной теории.

МПД алгоритмы, как и большинство декодеров для турбо и LDPC кодов, являются итеративными процедурами. Однако турбо коды появились на 20 лет позже многопороговых декодеров, которые и в те годы, и в настоящее время продолжают весьма динамично развиваться и интенсивно патентуются.

Первое из главных достоинств МПД алгоритмов, которые были сначала разработаны для двоичных кодов, заключается в том, что используемые в них мажоритарные процедуры коррекции ошибок допускают полное распараллеливание выполняемых операций и создание аппаратных декодеров, работающих с теоретически максимально возможной производительностью. А это создает, в конечном счете, условия для создания весьма простых высокоскоростных декодеров этого типа с очень высокими энергетическими характеристиками.

Другое 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 искаженном шумами сообщении. Никаких доказательств подобных уникальных свойств для других столь же простых процедур 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, т.е. теоретически минимально возможной. Поэтому МПД, в отличие от алгоритма Витерби, легко оперирует очень длинными кодами, что и позволяет ему обеспечивать высокие характеристики помехоустойчивости и энергетического выигрыша.

После прочтения этой во многом необычной книги читателям станет ясным важное, можно даже сказать, весьма драматическое обстоятельство: почему этот алгоритм МПД так и не был открыт специалистами за пределами России. В 70-е годы они публиковали большое число результатов по повторным попыткам декодирования сообщений, в которых некоторая доля искаженных символов уже была исправлена на первом шаге коррекции ошибок. Но во всех таких исследованиях оказывалось, что из-за группирования ошибок на выходе декодера после первой попытки коррекции ошибок второй декодер был бесполезным, так как он был способен, как и первый, исправлять только независимые искажения символов в канале связи. Констатация на-

личия такого жесткого эффекта группирования ошибок на выходе порогового декодера (ПД), названного размножением ошибок (РО), а также отсутствие вообще каких-либо идей по минимизации этого эффекта привели к полному закрытию темы повторного декодирования мажоритарными алгоритмами.

Почему же тема многократной коррекции ошибок именно мажоритарными методами возникла снова и для абсолютного большинства кодовых систем демонстрирует рекордную эффективность при максимально простой реализации? Можно указать две основных причины достижения высоких характеристик МПД.

Во-первых, никто до авторов этой книги не пытался решать задачу такой модификации простейшего из известных методов декодирования, мажоритарного, чтобы он обладал 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 авторами поставлена – и решена! Алгоритмы МПД во всех своих модификациях обладают именно такими принципиально важными свойствами.

Во-вторых, еще одна, идеологически намного более сложная проблема, одновременно решавшаяся – и решенная (!) авторами, состояла в глубоком анализе причин группирования ошибок на выходе мажоритарного декодера. Именно этот эффект РО и анализируется в данной книге. Понимание его природы позволило найти коды с низким уровнем РО, что сразу привело к принципиальному улучшению характеристики МПД. Все эти задачи были решены авторами данной книги с использованием специальных оптимизационных процедур и математических методов, ранее никогда не применявшихся в сфере помехоустойчивого кодирования.

Только одновременное решение этих двух взаимосвязанных сложнейших проблем позволило создать специальные коды и итеративные МПД процедуры с простейшими мажоритарными функциями. Даже при очень высоких уровнях шума новые алгоритмы постепенно в течение многих итераций улучшают достоверность принятых из канала сообщений и в абсолютном большинстве случаев находят оптимальные решения, обычно дости-

гаемые только на основе переборных алгоритмов. При этом общее число операций МПД все равно остается весьма небольшим.

Но на самом деле успех разработок МПД алгоритмов связан с решением еще одной, третьей классической задачи оптимизации функционала от очень большого числа переменных. Как совершенно справедливо указывают авторы, возможность одновременной вариации целого ряда параметров кодов и декодеров, в частности, весов проверок, значений пороговых элементов и разностных соотношений в полиномах используемых кодов создает дополнительные условия для улучшения характеристик МПД декодеров. Таких настраиваемых элементов в декодерах может быть много сотен и даже тысяч. Автоматизированный компьютерный поиск оптимизированных по критериям вероятности ошибки решений декодера параметров алгоритмов еще на этапе его проектирования заметно улучшает и так достаточно высокие характеристики МПД вообще без какого-либо увеличения объема вычислений 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 трех выше-приведенных сложнейших проблем, каждая из которых так или иначе связана с решением задач оптимизации функционалов от большого числа переменных. Именно в плодотворном применении оптимизационных принципов на всех этапах разработок и исследований МПД и заключается успешность новой теории кодирования для теории информации и техники связи. Отсутствие удовлетворительных решений хотя бы одной из них 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 росту эффективности декодера при минимальной сложности его схемы. К ним можно

отнести разные методы каскадирования, особенно параллельного, а также коды с выделенными ветвями.

Совершенно особое место среди предложенных в этой книге алгоритмов занимают символьные (недвоичные) коды и соответствующие им специальные высокоскоростные МПД декодеры. Открытые еще в 1984 году и до сих пор не имеющие никаких аналогов и конкурентов среди других направлений кодирования, они уже сейчас полностью решили задачу кодирования и высокоскоростного декодирования больших массивов байтовых данных с любой заданной достоверностью на очень высоких скоростях простейшими техническими средствами. Они существенно перекрывают по своей эффективности коды РС, оставаясь столь же простыми в реализации, как и их аналоги – двоичные МПД. 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 одного из авторов этой книги. Преимущество недвоичных МПД перед кодами РС оказывается сразу настолько значительным, что фактически можно говорить о том, что эти коды и алгоритмы, открытые более 25 лет назад, ознаменуют собой совершенно новую эпоху в обработке символьной информации. Для этого типа МПД просто вообще нет никаких других методов с разумной сложностью реализации, которые могли бы сравниться с ним по эффективности. Как и при разработке других полезных подходов к коррекции ошибок, авторы достигли очень значимых результатов для недвоичных кодов за счет перехода к гораздо более длинным кодам, чем единственные доступные до сих пор коды РС. Разумеется, у символьного МПД сохранена предельно малая сложность декодирования, присущая мажоритарным методам. Немалую роль в достижении новыми декодерами уникально высоких характеристик играет и отсутствие необходимости использования умножений в недвоичных полях, а также полная независимость длин символьных кодов от размеров используемых символов. Именно два этих свойства и определяют чрезвычайную простоту реализации символьных МПД. Поэтому такие коды обязательно найдут широкое применение в сфере обработки, хранения и передачи аудио-, видео- и других типов 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. Детали этих методов можно найти в других публикациях авторов.

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 15 раньше. Тогда сейчас можно было бы говорить об ее очередном переработанном издании. Однако ее авторы, тем не менее, на протяжении всего этого времени старались знакомить научно-техническую общественность со своими новыми разработками в области кодирования. Важным событием для российских специалистов стал выход в 2004 году справочника В.В. Золотарёва и Г.В. Овечкина «Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы» под редакцией Ю.Б.Зубарева в издательстве «Горячая линия – Телеком», в России, Москва. 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 авторов книги с пленарными докладами на семи последних традиционных ежегодных Международных конференциях по цифровой обработке сигналов в Москве. Широко известны специалистам и ставшие уже очень и очень большими специализированные двуязычные сетевые порталы ИКИ РАН – www.mtdbest.iki.rssi.ru и РГРТУ – www.mtdbest.ru по методам многопорогового декодирования, на которых представлено более 300 единиц теоретических, методических, учебных и демонстрационных материалов по этому алгоритму, включающих даже серию специальных компьютерных фильмов, особенно ярко демонстрирующих в динамике особенности работы МПД декодеров. Эти порталы,

возможно, являются самыми масштабными среди всех телекоммуникационных сайтов сети и, несомненно, многократно превышают размеры порталов всех телекоммуникационных корпораций России по тематике помехоустойчивого кодирования.

Уникален и набор демонстрационных программ для лучших известных методов коррекции ошибок, которые расположены по обоим указанным выше адресам. Все желающие могут переписать на свои компьютеры представленные там демопрограммы вместе с инструкциями по их использованию и сравнить их реальные возможности. Искключительную полезность этой важнейшей деятельности авторов данной книги невозможно переоценить.

Завершая представление этой, конечно же, весьма необычной по своим методам и результатам книги о лучших за последние годы достижениях российских исследователей в области помехоустойчивого кодирования, хочется пожелать ее авторам и их коллегам и 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 нашей технологической цивилизации.

Быстрое развитие техники кодирования и элементной базы еще более расширит сферу применения МПД алгоритма. Конечно, и для ряда других методов кодирования реализация декодирования окажется при этом вполне доступной задачей, даже если в настоящее время они еще кажутся слишком сложными. Но только те методы помехоустойчивого кодирования, которые наиболее целенаправленно и экономно расходуют свои вычислительные ресурсы для решения задачи коррекции искажений в цифровых данных, действительно окажутся предельно быстрыми, наиболее эффективными и самыми доступными для широкого применения в сетях связи и больших базах данных.

Академик РАН, доктор технических наук, профессор,
лауреат Ленинской и Государственных
премий СССР и РФ

В.К. Левин

От авторов

Выход в свет в 1963 году книги Дж. Л. Месси «Пороговое декодирование» ознаменовал новый этап в развитии техники помехоустойчивого кодирования. Ясное описание очень простых методов со вполне удовлетворительными характеристиками определило в те годы их место в различных системах связи.

Последующее появление в 1967 году алгоритма Витерби вывело технику кодирования на принципиально новый уровень качества связи благодаря возможности существенно более эффективного кодирования, поскольку предложенный алгоритм обеспечивал в гауссовском канале оптимальное декодирование кодов небольшой длины. Это стало причиной привлечения большого числа специалистов по теории и технике кодирования к проблеме повышения именно эффективности кодирования, поскольку в те годы всем казалось, что быстрый рост возможностей цифровых технологий позволит очень просто строить каскадные и другие более сложные схемы кодирования. В связи с этим проблема сохранения простоты реализации декодеров на длительное время осталась как бы в тени, хотя формально требование более простого декодирования никогда не снималось с повестки дня.

Несмотря на то, что публикации по вопросам эффективности пороговых алгоритмов в 70-х годах продолжали появляться, сформировавшееся мнение специалистов о возможностях мажоритарных схем декодирования стало весьма консервативным. Для этого были все основания. Наиболее серьезным аргументом считалось наличие эффекта размножения ошибок, который изначально серьезно снижал и без того невысокую эффективность пороговых процедур, поскольку он приводил к сильному пакетированию ошибок на выходе декодера. К сожалению, сколько-нибудь эффективных методов его уменьшения так и не было найдено. Поиск специальных кодов для мажоритарных процедур также не принес более значимых результатов, чем те, которые были уже известны.

До некоторой степени полезные для практики порогового декодирования реальные результаты в те же 70-е годы были получены многими специалистами в экспериментах по повторному декодированию символов, в частности, в сверточных кодах. Они показали наличие небольшого дополнительного снижения итого-

вой вероятности ошибки декодирования в каналах с относительно малым уровнем шума. Но все эти сообщения никак не повлияли на справедливое в целом мнение о недостаточной эффективности пороговых декодеров, особенно при большом уровне шума.

В предлагаемой читателям книге изложены результаты сорокалетних исследований процедур мажоритарного типа, из которых следует, что при выполнении некоторых достаточно простых условий и определенной модификации декодеров порогового типа возможно вполне успешное декодирование многих кодов в широком диапазоне параметров шума канала. Результаты применения таких усовершенствованных мажоритарных алгоритмов, названных многопороговыми декодерами (МПД) оказываются во многих случаях практически близкими к оптимальным, т.е. мало отличающимися по выходной вероятности ошибки от характеристик переборных алгоритмов. Это было показано авторами этой книги в различных публикациях, как теоретически, так и при моделировании работы соответствующих процедур для специальных кодов, удовлетворяющих ряду весьма строгих требований. Декодеры, построенные в соответствии с изложенными ниже принципами, уже успешно внедрены в многочисленных системах связи. Во всех случаях программной и аппаратной реализации предлагаемых далее методов многопорогового декодирования были получены ожидаемые авторами и разработчиками систем связи характеристики, которые были иногда совершенно недоступны для других известных алгоритмов коррекции ошибок с разумной сложностью реализации.

Основные положения, которые фактически и позволили поднять эффективность исключительно простых алгоритмов порогового типа до уровня оптимальных переборных процедур, состоят всего из двух пунктов, обеспечивших решение задачи принципиального повышения качества декодеров мажоритарного типа.

1. Мажоритарные алгоритмы могут быть чрезвычайно эффективными. Существуют весьма простые алгоритмы МПД, которые обладают свойством приближения к оптимальному решению на всех шагах декодирования, пока продолжается процесс изменения символов на пороговых элементах декодера.

2. Эффект размножения ошибок при пороговом декодировании действительно очень сильно ограничивает возможности мажоритарных процедур декодирования. Но этот эффект вполне управ-

ляемый. Его правильная интерпретация помогает сформировать требования и критерии, по которым можно строить коды с очень малым уровнем размножения ошибок на выходе соответствующего им декодера, что и позволяет, в конечном счете, существенно повысить эффективность итеративных процедур порогового типа.

Первое свойство оказывается по существу совершенно неожиданным. Действительно, после незначительной, но принципиальной модификации обычного порогового декодера, превращающей его в многопороговый, новый декодер на самом деле приобретает уникальное свойство стремления к оптимальному переборному решению, если выполнены весьма простые условия. Представляется правдоподобным, что никакие другие известные в настоящее время простые методы коррекции ошибок не обладают подобными свойствами.

А второе из приведенных выше утверждений заслуживает длительного обсуждения и серьезного обоснования, что и сделано в одной из глав этой книги. Успешное решение этой сложной проблемы действительно позволило построить коды, которые особенно эффективны при их применении в МПД.

Авторы надеются, что на многие естественные вопросы по проблеме сложности, эффективности и технологичности кодирования и многопорогового декодирования читатели этой книги получат в той или иной степени содержательные ответы. В случае заинтересованности они, несомненно, смогут сами продолжить весьма перспективные для всех систем связи исследования МПД процедур, которые уже нашли свое место в целом ряде разработок.

Как будет показано далее, при создании новых алгоритмов и соответствующих им кодов основной задачей исследователей является максимально аккуратное и оптимизированное по очень многим критериям одновременное проектирование декодера и применяемого в нем кода. Иначе говоря, простота реализации МПД достигается за счет более сложного и тщательно организованного этапа проектирования кода и алгоритма его декодирования. В этом случае проблема сложности реализации алгоритма целенаправленно трансформируется таким образом, чтобы технологические задачи построения более эффективного декодера решались именно за счет тех компонентов сложности, увеличение которых наиболее доступно. Например, в большинстве случаев минимизации вычис-

лительных затрат МПД объем его операций декодирования при сопоставимой эффективности оказывается на 2 и более десятичных порядков меньшим, чем для других алгоритмов именно за счет значительного объема памяти декодера, использующего весьма длинные коды, что вполне допустимо, а иногда даже совершенно необходимо в высокоскоростных системах связи. Множество других важных обменных соотношений между параметрами кодов и декодеров также будет обсуждаться ниже.

Завершая вводные комментарии, авторы выражают свою глубокую уверенность в том, что первое достаточно полное изложение оптимизационной теории кодирования, конечно, не лишнее в связи с этим определенных недостатков, позволит читателям найти собственные новые пути дальнейшего роста эффективности декодирования с использованием также и процедур класса МПД. Их универсальность, высокая однородность и крайняя простота обеспечивают существенный рост достоверности передачи данных в каналах с малым уровнем энергетике при самых минимальных затратах на реализацию главной процедуры – декодирования.

Внимательный читатель, возможно, отметит, что многие свойства и возможности представленного в книге алгоритма неоднократно рассматриваются и комментируются в различных разделах книги с разных позиций. Авторы должны признать справедливость данного замечания. Это сделано с единственной целью наиболее полного, всестороннего и в то же время максимально понятного доказательства или объяснения свойств и возможностей МПД. Такой способ изложения материала диктуется тем, что, хотя все ключевые результаты получены достаточно простыми методами, многие из них все же не использовались ранее в публикациях по теории и технике кодирования и являются для этой отрасли науки совершенно новыми. Это требует очень аккуратного и постепенного предъявления во многих случаях не совсем простых и иногда даже неожиданных результатов, свойств и характеристик наших алгоритмов. Разнообразные комментарии и формы изложения материала, как нам представляется, облегчают читателю задачу понимания представленных в книге результатов, для усвоения которых иногда все-таки требуются немалые усилия и время.

В качестве последнего замечания авторы считают полезным подчеркнуть, что все исходные предпосылки исследования, теоре-

тические результаты, вытекающие из них практические следствия и выводы по результатам представленного исследования чрезвычайно просты. Они связаны только с самыми общепринятыми понятиями теории и техники кодирования и не требуют знаний специальных разделов других смежных дисциплин. Именно эта возможность взглянуть на потенциальные возможности кодов и многопороговых процедур, исходя только из простейших теоретических соображений и здравого смысла, создает условия для очень быстрого обучения студентов и специалистов новым возможностям техники кодирования на основе МПД алгоритмов. В свою очередь, правильное понимание возможностей алгоритмов этого типа позволит в дальнейшем в точных и ясных терминах ставить и успешно решать новые задачи по созданию все более быстродействующих, дешевых и максимально простых декодеров класса МПД для различных систем связи.

Авторы считают своим приятнейшим долгом поблагодарить огромное количество своих помощников, энтузиастов и просто высокопрофессиональных специалистов, которые в течение многих лет помогали им в проведении исследований и применении полученных результатов в конкретных системах и проектах.

Большую поддержку работам по МПД оказывали Научный совет по комплексной проблеме «Кибернетика» АН СССР, Отделение нанотехнологий и информационных технологий РАН, НИИ «КВАНТ», НИИРадио, Воронежский НИИ связи, ЛЭИС им. М.А. Бонч-Бруевича, ИКИ РАН и Рязанский ГРТУ.

Наверное, книга про МПД не могла бы быть представлена в своем нынешнем виде, если бы не поддержка академика АН СССР А.И. Берга, академиков РАН В.К. Левина, Н.А. Кузнецова, Л.М. Зеленого, а также профессоров С.И. Самойленко, Ю.Г. Дадаева, В.И. Коржика, А.Н. Пылькина, В.В. Витязева и доктора технических наук Р.Р. Назирова, которые высоко оценили представленные материалы исследований по этому алгоритму и способствовали их признанию научно-технической общественностью.

* * * * *

Для получения наглядного представления об эффективности работы МПД читателям предлагается небольшой демонстрационный мультфильм-программа, предназначенный для работы на IBM PC-совместимом компьютере под управлением ОС

Windows, в котором проиллюстрированы некоторые важнейшие особенности процедур декодирования многопорогового типа при исправлении ошибок в условиях большого уровня шума канала. Возможно, что именно небольшая предварительная подготовка психологического плана с помощью предлагаемой демопрограммы создаст необходимые эмоциональные и гносеологические предпосылки для плодотворной последующей работы с этой книгой и с алгоритмами МПД.

Целый ряд проблем, относящихся к общим постановкам задач кодирования и конкретным возможностям МПД алгоритмов, также рассмотрены на наших веб-сайтах в разделах ответов на вопросы и в архивах, которые позволяют более точно и образно оценивать возможности алгоритмов МПД.

Значительную поддержку в изучении методов декодирования на основе МПД алгоритмов нашим читателям могут оказать три очень полезные лабораторные работы, которые можно переписать с образовательных страничек наших сетевых ресурсов.

Часть не рассмотренных в данной книге вопросов проанализирована в нашем справочнике по кодированию «Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы», Москва, издательство «Горячая линия – Телеком».

Ряд вопросов теории МПД алгоритмов рассматривались ранее в монографии В.В. Золотарёва «Теория и алгоритмы многопорогового декодирования», издательств «Радио и связь» и «Горячая линия – Телеком», 2006 г. Некоторые подходы к применению методов МПД там представлены гораздо шире.

*В.В. Золотарёв
Ю.Б. Зубарев
Г.В. Овечкин*

Введение

Быстрый рост объемов обработки данных, развитие цифровых систем вещания и вычислительных сетей предъявляют весьма высокие требования к минимизации ошибок в используемой дискретной информации. Переход всех видов создания, хранения, использования и передачи данных, а также средств вещания на цифровые методы, происходящий сейчас во всем мире, еще более повышает важность высококачественной передачи цифровых потоков. Успешная работа этих систем возможна только при наличии специальной эффективной аппаратуры, которая позволяет гарантировать достоверную передачу информации. Важнейший вклад в повышение достоверности обмена цифровыми данными вносится теорией помехоустойчивого кодирования, создающей все новые методы защиты от ошибок, базирующиеся на использовании корректирующих кодов.

Если повышение достоверности при обнаружении ошибок в системах с переспросом не представляет существенных трудностей, то проблема высококачественного декодирования в приемнике, не имеющем возможности организовать переспрос ошибочно принятых сообщений, остается весьма актуальной и чрезвычайно сложной, особенно если уровень шума в канале значителен.

Возможность использования тех или иных алгоритмов коррекции ошибок в системах без обратной связи определяется весьма жесткими требованиями, предъявляемыми к этим алгоритмам, например, по числу операций в случае их программной реализации или по размерам, помехоустойчивости, быстродействию, энергопотреблению и технологичности при проектировании специализированных БИС. Большое число регулярно издающихся монографий, посвященных различным аспектам теории помехоустойчивого кодирования, и десятки международных конференций по этой тематике, организуемых каждый год во всем мире, свидетельствует об огромной сложности и чрезвычайной актуальности проблемы эффективного декодирования.

Данная книга посвящена систематическому изложению новой оптимизационной теории помехоустойчивого кодирования и создаваемым на ее основе методам коррекции ошибок в цифровых данных на базе итеративных мажоритарных алгоритмов

декодирования, к которым последнее время вновь привлечено внимание специалистов в области систем связи после некоторого периода разработок алгоритма Витерби и декодеров для турбо и LDPC кодов.

Обращение авторов этой книги к мажоритарным методам декодирования обусловлено в значительной мере тем, что, хотя вся теория кодирования развивается под лозунгами повышения эффективности декодеров при минимальной сложности, реальное положение дел в этой области улучшается в основном за счет только усложнения алгоритмов декодирования и кодовых конструкций. Поэтому именно методы, изложенные в данной книге можно отнести к тем алгоритмам, которые действительно являются наименее затратными в вычислительном аспекте.

Особую важность для техники связи мажоритарных алгоритмов, которые позволяют исправлять большое число ошибок веса, существенно превышающего половину кодового расстояния используемых кодов, невозможно переоценить. Мажоритарные декодеры рассматривались ранее как в классических монографиях Л.М. Финка [2], Л.Ф. Бородина [3], Дж. Месси [4] и В.Д. Колесника и Е.Т. МIRONЧИКОВА [5], так и в книгах, изданных позднее [6, 7, 8]. Затем, как известно, последовал период, в течение которого мажоритарные методы были надолго забыты и мало анализировались. Еще более существенным достоинством мажоритарного декодирования оказалась возможность эффективного многократного улучшения решений этого декодера, которая была доказана, в частности, в коллективной монографии [9] на примере систематических сверточных кодов. Этот алгоритм, названный многопороговым декодированием (МПД) [10, 11], описан также в монографиях [12, 105] и использован в [13].

Данная книга посвящена изложению различных аспектов оптимизационной теории кодирования и результатов обобщающих исследований многопороговых декодеров для двоичных и недвоичных кодов, используемых для передачи сообщений по каналам с ошибками и стираниями.

Особое внимание уделяется решению проблемы минимизации объема вычислений при сохранении максимально высокой энергетической эффективности кодирования и небольшой сложности декодирования.

Основными целями предпринятого теоретического и экспериментального исследования, изложенного в данной книге, являлись:

- теоретическое обоснование алгоритма многопорогового декодирования линейных кодов, сопоставимого по эффективности с лучшими известными алгоритмами;

- анализ специальных методов кодирования с использованием МПД, не уступающих по эффективности лучшим каскадным схемам.

Структурно монография состоит из шести глав.

В гл. 1 введены основные понятия и определения, используемые в последующих разделах.

В гл. 2 сформулированы основные принципы многопорогового декодирования для двоичных симметричных каналов, доказано стремление решений декодеров этого типа к решению оптимального переборного метода коррекции ошибок. Затем принцип роста правдоподобия решения МПД обобщается на двоичные гауссовские каналы при использовании «мягких» модемов, недвоичные и несистематические коды и на каналы со стираниями. Рассмотрена и возможность его использования для декодеров, работающих совместно с системами многопозиционных сигналов.

В гл. 3 рассмотрены причины возникновения эффекта размножения ошибок при пороговом декодировании блоковых и сверточных двоичных и недвоичных кодов. Результаты анализа размножения ошибок позволили построить множество кодов, которые наиболее эффективны при использовании в МПД для различных типов каналов связи.

В гл. 4 выводятся нижние, верхние и приближенные аналитические оценки эффективности процедур многопорогового декодирования для различных кодов.

Глава 5 посвящена изучению экспериментальных результатов исследования МПД, полученных при компьютерном моделировании и при измерениях на специализированных стендах характеристик работы декодеров различного типа для каналов с аддитивным белым гауссовским шумом и в других трактах передачи данных.

В гл. 6 обсуждаются вопросы использования МПД в перспективных схемах каскадного, параллельного и других специальных методов кодирования.

В заключении сформулированы обобщающие выводы по проведенному исследованию и предложены направления дальнейшего развития тематики МПД.

Предполагается, что читатели знакомы с основами теории кодирования и методов вычислений в конечных полях. Никаких излишне сложных соотношений, свойств и результатов из теории конечных полей в предлагаемой читателям книге использоваться не будет. Это позволит сосредоточить основные усилия при чтении данной книги именно на понимании свойств и возможностей изучаемых многопороговых алгоритмов, что, несомненно, поможет заинтересованным читателям хорошо сориентироваться в современной проблематике построения систем помехоустойчивого кодирования и с максимальной степенью уверенности выбирать пути дальнейшего повышения эффективности таких систем.