

Макет подготовленной к изданию книги В.В.Золотарева
**“Субоптимальные
многopороговые декодеры
для каналов с большим уровнем шума”**

ВВЕДЕНИЕ

Быстрый рост объемов обработки данных и развитие цифровых сетей широкого назначения предъявляет все более высокие требования к достоверности передаваемой информации. Успешная работа цифровых систем связи возможна только при наличии эффективной аппаратуры, которая позволяет гарантировать передачу дискретной информации с высокой точностью. Важнейший вклад в решение задачи повышения достоверности обмена цифровыми данными вносит теория помехоустойчивого кодирования, реализующая методы защиты от ошибок на базе корректирующих кодов.

Если повышение достоверности при обнаружении ошибок в системах с переспросом не представляет существенных трудностей, то задача высококачественного декодирования в приемнике, не имеющем возможности организовать переспрос ошибочно принятых сообщений (как и в случае, когда эта возможность предоставляется приемнику достаточно редко), остается весьма актуальной.

Напомним, что применение кодирования позволяет повысить достоверность обмена информацией, повысить скорость ее передачи, уменьшить размеры передающих антенн или повысить дальность, устойчивость и надежность связи или снизить необходимую мощность передатчика. При совместном использовании кодирования с другими методами достижимы все перечисленные результаты вместе со снижением объема передаваемых данных, защитой информации и сужением необходимой полосы частот для связи, а также с другими преимуществами. Именно эти достоинства кодирования привели к тому, что уже в течение нескольких десятилетий кодирование является обязательной процедурой обработки информации во всех системах эффективной связи.

Необходимость использования тех или иных алгоритмов коррекции ошибок в системах без обратной связи обычно сопровождается очень жесткими требованиями, предъявляемыми к этим алгоритмам, например по размерам, стоимости, быстродействию, энергопотреблению, тестируемости, технологичности при аппаратной реализации и другим параметрам. Большое число регулярно издающихся монографий, посвященных различным аспектам теории помехоустойчивого кодирования, свидетельствует о сложности и актуальности этой проблемы.

В данной книге изложено решение задачи коррекции ошибок в цифровых данных на базе новых алгоритмов мажоритарного декодирования. Предлагаемые и детально рассматриваемые далее многopороговые декодеры (МПД) названы так потому, что в процессе контроля принятых кодовых последовательностей

все информационные символы пришедшего из канала сообщения исправляются многократно. Это исправление осуществляется или в процессе реализации нескольких попыток исправления символов принятого сообщения множеством строго определенно расположенных пороговых элементов, или в результате многократного прохождения этих символов мимо одного или группы таких решающих схем.

Оказывается, что процедуры подобного типа при правильной их реализации оказываются очень эффективными. Если код и сам алгоритм декодирования, принадлежащий классу методов МПД, выбраны правильно, т.е. с учетом всех требований и ограничений, которые описываются в соответствующих главах этой книги, то даже при уровне шума, соответствующем случаю, когда кодовая скорость R лишь немного меньше, чем пропускная способность канала C , т.е. когда справедливо соотношение $R \lesssim C$, МПД обеспечивает достаточно высокие значения энергетической эффективности кодирования. Так происходит только тогда, когда декодер даже при предельно допустимых с точки зрения теории уровнях шума канала обеспечивает снижение средней плотности ошибок на своем выходе на несколько десятичных порядков по сравнению с вероятностью ошибок, поступающих на его вход. Эта ситуация действительно имеет место для многих случаев успешного применения МПД, когда они достигают уровня эффективности декодирования используемых кодов, совпадающего или весьма близкого к оптимальному (например, переборному, экспоненциально сложному) их декодированию.

Изложению методов решения проблем, которые позволяют достичь столь высокой эффективности процедур многопорогового типа и посвящены все последующие главы книги.

В первой главе приводится краткая справка о развитии методов декодирования многопорогового типа. Это даст читателю определенные ориентиры, которые позволят специалистам, заинтересованным в уточнении некоторых конкретных деталей, сориентироваться при поиске новых публикаций по этому вопросу.

Далее в первой главе введены основные понятия и определения, используемые в последующих разделах книги и кратко рассмотрено состояние прикладных вопросов теории кодирования и техники декодирования. Важным моментом, помогающим в решении задачи восприятия всех аспектов создания и использования МПД, является подчеркивание глубокого единства двух классов кодов: свёрточных и блочных.

Вторая глава является ключевой для изложения всего последующего материала. В ней введены определения и обсуждаются простые вспомогательные свойства кодов и пороговых процедур, которые затем используются для формулировки и доказательства фундаментального для всего дальнейшего изложения утверждения - принципа роста правдоподобия решения многопорогового декодера (МПД) для двоичных линейных кодов. Далее эта способность МПД обобщается далее на несистематические и на

недвоичные коды, а также на каналы со стираниями. Рассмотрена возможность применения этого принципа для декодеров, работающих совместно с системами многопозиционных сигналов и для некоторых других целей.

В третьей главе изучаются причины возникновения эффекта размножения ошибок (РО) при пороговом декодировании блоковых и свёрточных двоичных и недвоичных кодов, что позволило построить принципиально новые множества кодов, которые оказываются наиболее эффективными при использовании в МПД для целого ряда моделей каналов.

Анализ эффекта РО является принципиальным моментом исследования. Его понимание составляет важную технологическую основу для правильной постановки и последующего решения задачи построения совершенно особых классов кодов, которые на самом деле могут обеспечить высокие характеристики декодирования МПД. Автору не известны работы, в которых ставилась бы и затем решалась задача построения кодов такого типа. Доля кодов с подобными характеристиками среди общего числа мажоритарно декодируемых кодов, видимо, вообще очень мала. Этим и определяется требование их чрезвычайно аккуратного построения, а также одновременного создания соответствующего им декодера класса МПД. Хотя сама процедура проектирования структуры и оптимизации параметров элементов МПД весьма трудоемка, сам декодер после завершения процесса его создания оказывается по-прежнему фактически столь же простым, как и собственно классический пороговый декодер. Описаны возможности созданной специализированной системы построения кодов для МПД, обеспечивающих его высокие характеристики.

В четвертой главе выводятся нижние, верхние и другие приближенные аналитические оценки эффективности процедур многопорогового декодирования для различных линейных кодов. Из материала этой главы следует, что при некоторых вполне разумных условиях и ограничениях на свойства кодов и декодера МПД может действительно обладать некоторыми свойствами, которые присущи только оптимальным переборным алгоритмам. Это относится, в частности, к существенному снижению вероятности ошибки решения уже на втором пороговом элементе МПД, и возможности почти оптимального декодирования в МПД, если шум канала относительно мал.

Пятая глава посвящена описанию условий и экспериментальным результатам исследования МПД, полученным при моделировании работы декодеров этого типа в различных каналах с независимыми ошибками и стираниями, а также при использовании некоторых сложных систем сигналов. Описаны характеристики тех декодеров, которые вошли в состав аппаратуры связи различных реальных систем.

Важным моментом является также описание специального МПД, способного заменить декодер Витерби для одного из стандартных несистематических кодов. Характеристики эффективности такого МПД близки к АВ, но МПД оказывается гораздо проще, а его быстроедействие - существенно выше, чем у АВ.

В шестой главе обсуждаются вопросы повышения эффективности работы МПД при его использовании в сложных кодовых конструкциях. Как известно,

повышение эффективности кодирования возможно в случае построения на основе некоторых базовых алгоритмов кодирования/декодирования новых кодовых структур и процедур, которые при правильном их создании обеспечивают гораздо более высокие конечные характеристики кодирования, чем сами базовые алгоритмы, их составляющие. К таким подходам относятся каскадирование и целый ряд других эффективных приемов. Особенности МПД и используемых в них кодов позволяют создавать весьма специфические кодовые структуры, которые, сохраняя в целом простоту пороговых алгоритмов, позволяют дополнительно улучшить характеристики МПД.

Вопросы оценки перспективных возможностей МПД анализируются в седьмой главе, где обсуждаются варианты реализации различных декодеров, которые могут быть еще более эффективными.

В Заключении сформулированы общие выводы по характеристикам многопороговых алгоритмов и перспективах их использования. Отмечаются их высокая структурная однородность, очевидная простота принципов работы и связанная с этим свойством наглядность описания их работы, высокое быстродействие.

Это позволяет сделать выводы об их высокой технологичности, простоте и низкой стоимости реализации для многих конкретных систем связи.

Г Л А В А 1 ЗАДАЧА КОДИРОВАНИЯ В ТЕХНИКЕ СВЯЗИ

Краткая историческая справка

Ценность для техники связи мажоритарных алгоритмов исправления ошибок состоит в крайне простой их реализации и возможности исправления большого числа ошибок веса, существенно превышающего половину кодового расстояния используемых кодов. Мажоритарные декодеры рассматривались как в классических монографиях Л.М.Финка, Л.Ф.Бородина, Дж.Месси, В.Д.Колесника и Е.Т.Мирончикова, а также в работах многих других авторов.

Видимо, первой попыткой теоретического осознания возможностей многократного декодирования сообщений, принятых из канала с большим шумом, стало выступление автора на семинаре по помехоустойчивому кодированию в 1974 году. Он проходил в Научном совете по комплексной проблеме “Кибернетика” при Президиуме АН СССР под руководством заместителя Председателя Совета профессора С.И.Самойленко, где автор впервые доложил свои результаты в новой области исследований. В этом же году о характеристиках декодеров нового класса было доложено на VI Всесоюзном симпозиуме по теории избыточности в информационных системах, где они уже квалифицировались как субоптимальные методы, т.е. мало

отличающиеся от оптимальных. Правда, реальное улучшение характеристик подобных декодеров, достигнутое к этому времени, было еще не очень значительным. Этот алгоритм, названный многопороговым декодированием (МПД), описан также в книге “Вычислительные сети” (в соавторстве), вышедшей в 1981 году в издательстве “Наука”, и более чем в 80 других публикациях автора.

Вопросами оценки характеристик и изучения возможностей применения МПД в различных реальных системах занимались также Ю.М.Брауде-Золотарев, И.Н.Красносельский, Н.И.Шанина, А.А.Лернер, А.И.Куштуев, Ю.К.Трофимов, Н.Г.Минина, Я.А.Фикс, А.А.Макаров, В.И.Ковязин, Н.А.Савельев, А.Л.Залманов и ряд других исследователей.

Общее число публикаций по этой тематике уже превышает 150 названий и, видимо, в дальнейшем будет увеличиваться.

Далее в первой главе введены основные понятия и определения, используемые в последующих разделах книги. Важным моментом, помогающим в решении задачи восприятия всех аспектов создания и использования МПД, является рассмотрение в этом разделе единства двух классов кодов: свёрточных и блоковых. Связь между этими классами кодов подразумевается во всех последующих разделах книги, где традиционная для многих публикаций дихотомия кодов вообще не подчеркивается, а получаемые почти во всех главах свойства рассматриваемых алгоритмов и кодов подразумеваются справедливыми как для одного, так и для другого классов. Несколько случаев, когда это не так, в соответствующих местах изложения оговариваются отдельно.

На основе анализа критерия энергетического выигрыша кодирования (ЭВК), который, собственно, и определяет конечную ценность применения кодов в технике связи, обсуждаются также те свойства кодов, которыми они должны обладать, чтобы быть успешно декодированными в условиях большого уровня шума канала.

Г Л А В А 2 ПРИНЦИП РОСТА ПРАВДОПОДОБИЯ РЕШЕНИЯ МНОГОПороГОВОГО ДЕКОДЕРА

Развитие методов помехоустойчивого кодирования, обладающих высокой эффективностью, предполагает использование процедур декодирования, мало отличающихся от оптимальных или просто оптимальных по меньшей мере в некоторых наиболее ответственных узлах. Непосредственное использование метода оптимального (по максимуму правдоподобия) декодирования очень ограничено из-за его экспоненциально растущей сложности реализации. Во многих случаях она пропорциональна q^k , где q – основание кода, k – информационная часть кодового слова длины n . Поэтому необходимо строить процедуры декодирования, которые оптимальными не являются, но при реализации существенно проще оптимальных, даже если они обладают меньшей

эффективностью. В тех случаях, когда степень отличия какого-либо алгоритма по эффективности от оптимальных процедур оказывается незначительной, такой алгоритм считается субоптимальным. Разумеется, это может оказаться возможным только при некоторых определенных соотношениях свойств кода и канала, в котором рассматривается качество работы того или иного декодера.

В этой главе на основе простых свойств систематических линейных кодов и пороговых процедур доказано, что в классическом двоичном симметричном канале без памяти (ДСК), соответствующем использованию жестких модемов в космических, спутниковых и иных каналах связи, правильно построенная процедура порогового декодирования позволяет многократно исправлять ошибки в принятом сообщении, закодированном линейным блоковым или свёрточным кодом. При этом во всех случаях изменения пороговым элементом того или иного декодируемого символа новое решение декодера будет ближе к принятому сообщению, т.е. более правдоподобным, чем предыдущая гипотеза декодера о принятом сообщении. Такое исключительно ценное свойство декодера сохраняется при любом числе совершенных актов исправления символов кода.

Эту особенность алгоритма МПД можно для краткости называть свойством стремления МПД к решению ОД. Так оно и будет иногда называться, поскольку это хорошо соответствует смыслу работы этого декодера.

Затем рассмотрены характеристики недвоичных МПД, для которых также доказывается теорема о стремлении к решению ОД в недвоичном q -ичном симметричном канале без памяти. При достаточном числе попыток декодирования характеристик недвоичного МПД оказываются намного лучше, чем у многих кодов Рида-Соломона.

Доказано также, что основные свойства и характеристики МПД сохраняются для гауссовских каналов с модемами, квантующими свои двоичные решения, т. е. для “мягких” модемов. Описан МПД для декодирования несистематических кодов с такими же свойствами. Затем предлагается возможный декодер для каналов со стираниями. Для этих каналов основная теорема об МПД трансформируется в простое правило эффективного восстановления неизвестных символов кода.

Рассмотрена схема с МПД для систем сигналов типа ФМ- n и АФМ-16 и показано, что принцип сходимости к решению ОД можно распространить и на такой комплекс из модема и кодека МПД. Для систем этого класса можно также ожидать существенного улучшения характеристик системы модуляции и кодирования, что позволяет уже не только снижать энергетику канала, но и одновременно существенно уменьшить ширину полосы передачи сигнала, как это обычно имеет место при использовании многопозиционных модемов.

Таким образом, совокупность свойств МПД для широкого набора систем сигналов способна обеспечить сходимость к оптимальному решению, достижение которого ранее считалось возможным только при использовании сложных переборных алгоритмов, что для длинных кодов всегда будет невозможным. Допустимость использования длинных кодов, для которых

реализуется простая процедура МПД, создает принципиальные условия для реализации потенциально высокой помехоустойчивости хороших длинных кодов простейшими средствами.

Вопросам поиска условий, при которых процесс такой сходимости действительно был бы столь долгим, что МПД почти всегда достигал бы решения ОД, посвящена следующая глава о размножении ошибок при использовании процедур порогового типа.

ГЛАВА 3 РАЗМНОЖЕНИЕ ОШИБОК В МАЖОРИТАРНЫХ ДЕКОДЕРАХ

Результаты предыдущей главы показывают принципиальную возможность существенного повышения эффективности мажоритарного декодирования линейных кодов во всем основном многообразии каналов без памяти с аддитивным шумом. Вместе с тем, МПД не является ОД ни для каких каналов, рассматривавшихся выше.

В этой главе на основе новых трактовок хорошо известного эффекта размножения ошибок (РО) сделана попытка понять причины быстрой остановки процесса изменения декодируемых символов при повторных попытках их исправления обычными пороговыми декодерами.

Для рассматриваемой задачи приближения эффективности МПД к возможностям ОД наиболее продуктивным оказалось рассмотрение РО как степени группирования ошибок в декодере мажоритарного типа. При этом нужно, вообще говоря, различать две совершенно различные причины группирования ошибок декодера.

Первая обусловлена в каналах без памяти выбранным алгоритмом декодирования и его особенностями: наличием обратной связи (ОС) с порогового элемента на регистр синдрома, правилом принятия решений о необходимости коррекции, способом ортогонализации проверок или выбором величины порогов.

Второй причиной оказываются свойства самого используемого кода. Например, в коротких свёрточных кодах несистематического типа есть обычно много кодовых слов веса порядка минимального d_m или свободного кодового расстояния d_{free} , что и приводит к сильному группированию ошибок даже на выходе декодера, реализующего алгоритм Витерби, который является оптимальным для этих кодов.

В этой главе разработан специальный вероятностный подход к оценке эффекта размножения ошибок (РО). Он дает возможность как понять влияние каждой из указанных выше причин на группирование ошибок на выходе порогового декодера, так и найти условия, налагаемые на декодеры и коды, которым они обязательно должны удовлетворять для того, чтобы степень группирования ошибок при реализации порогового алгоритма была минимальной.

Впервые примененный и детально разработанный для анализа РО известный метод производящих функций вероятности (ПФВ) позволил точно вычислять или давать достаточно корректные оценки для вероятностей появления пакетов из двух и более ошибок при использовании порогового декодера (ПД). Даны примеры вычисления таких вероятностей для блоковых и свёрточных кодов в случае использования различных модификаций правил работы ПД, изменения структуры и длины кодов, а также вероятности ошибки в двоичном симметричном канале (ДСК).

Проанализированы блоковые и свёрточные двоичные систематические коды самоортогонального и равномерного типа, коды максимальной длины, а также несистематические и недвоичные коды. В дополнение к обычному выбору проверок рассматриваются специальные схемы ортогонализации некоторых проверок кода.

Совокупность полученных результатов обеспечила создание алгоритмов, которые для заданных ограничений на параметры кодов и декодеров позволяют по заданным исходным требованиям строить наилучшие коды по критерию минимальной подверженности воздействию эффекта размножению ошибок.

Как оказалось, эти коды действительно никогда не строились специально под какие-либо процедуры декодирования и данных о них в литературе по кодированию нет. Это весьма длинные коды, как того и требует теория, предназначенные для работы в каналах с большим уровнем шума и малой результирующей вероятностью ошибки декодирования. Они, как и коды для обычных пороговых декодеров (ПД), оказываются легко декодируемыми как традиционными ПД, так и с помощью МПД. В последнем случае действительно достигаются малые уровни группирования ошибок даже при высоких вероятностях ошибки в канале, соответствующих весьма небольшой разнице между пропускной способностью канала C и кодовой скоростью R , т.е. при справедливости соотношения $R \lesssim C$. Тем самым обеспечиваются условия для реализации идеи многократного уточнения решения МПД, во многих случаях действительно улучшающих решение этого декодера при выполнении даже десятков итераций декодирования вплоть до достижения решения по максимуму правдоподобия, т.е. решения ОД.

Результатом анализа РО стала специальная прикладная программная система построения кодов на основе преобразований любых исходных макетов кодовых полиномов, которые могут быть построены в рамках принятых ограничений. Сложность построения кодов в большинстве случаев была пропорциональна 4-й степени от длины кода, что позволяет, в принципе, решить задачу построения практически любых кодов с требуемыми параметрами вплоть до длины кода n порядка 10^5 бит для кодовой скорости $R = 0,1 - 0,9$.

Многие из построенных на основе вышеизложенных принципов коды и декодеры класса МПД были спроектированы для различных реальных систем связи и продемонстрировали те высокие характеристики, которые были в них заложены при разработке.

Г Л А В А 4

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОПороГОВОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ

Развитие теории помехоустойчивого кодирования в течение длительного времени в одном из своих важнейших аспектов состояло в поиске более эффективных для своего этапа развития, например, алгебраические кодов и методов их декодирования. Оценка корректирующей способности этих методов не представляла трудностей, поскольку для этого использовались, например, биномиальные распределения.

Реальные характеристики высокоэффективных при большом уровне шума алгоритмов получаются обычно уже на основе компьютерного моделирования. Для таких алгоритмов на результаты декодирования сильное влияние оказывают не только кодовые слова минимального веса, но и те, вес которых несколько больше, чем минимальное кодовое расстояние d . Таким образом, тонкая структура кода, его спектр оказывает решающее влияние на эффективность мощных алгоритмов декодирования при большом уровне шума канала. Это справедливо и для многопороговых алгоритмов декодирования, обеспечивающих в широком диапазоне значений вероятностей ошибки канала хорошее приближение к декодированию по максимуму правдоподобия.

До недавнего времени после почти четырех десятилетий развития мажоритарных методов для них была известна только методика вычисления вероятности ошибки декодирования первого символа кода $P_1(e)$, пригодная как для блочных, так и для свёрточных кодов при использовании ПЛ с обратной связью (ОС). Эта вероятность может интерпретироваться и как средняя вероятность ошибки на бит $P_b(e)$ для дефинитных ПД, у которых ОС отсутствует.

В этой главе получен целый ряд полезных оценок характеристик МПД. Предложен метод получения верхних оценок средней вероятности ошибки на бит $P_b(e)$ для блочного и вероятности $P_1(e)$ для свёрточного МПД, реализующих две попытки декодирования. Несмотря на совсем небольшое по сравнению с традиционными ПД усложнение, такой декодер обеспечивает при малых уровнях шумов характеристики, мало отличающиеся от оптимальных. Разумеется, для этого следует выбрать достаточно хорошие коды по критерию РО, что позволяет существенно упростить предлагаемые оценки.

Указана также методика, позволяющая с помощью ПФВ большей размерности повысить точность оценок для вероятности $P_b(e)$ декодера типа МПД. При этом может быть получена более точная оценка $P_b(e)$ сверху, которая, в принципе, также может быть еще несколько улучшена.

Кроме того, на основе анализа РО и свойств МПД предложены приближенные средние оценки характеристик МПД, которые позволяют составить представление о реальных границах эффективности МПД, осуществляющего более двух попыток декодирования.

Указан способ расчета нижних оценок средней вероятности ошибки на бит $P_b(e)$. Обсуждается характер группирования ошибок в кодах,

используемых в МПД и критерии соответствия решений МПД решениям оптимальных декодеров.

Аналогичные обобщения выполнены для блоковых кодов, недвоичных и несистематических вариантов реализации МПД.

ГЛАВА 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОПороГОВЫХ АлГОРИТМОВ

Изложенные в предыдущей главе результаты свидетельствуют о возможности достижения весьма высоких характеристик декодирования на основе алгоритма МПД без существенного усложнения исходного декодера мажоритарного типа. Вместе с тем, аналитические оценки эффективности МПД оказались мало отличающимися от оптимальных для используемых кодов при относительно небольшом уровне шума и лишь для случая двух пороговых элементов (ПЭ) в МПД.

Указанные причины приводят к необходимости изучения характеристик декодирования кодов с большим числом итераций декодирования в МПД для каналов с большим шумом экспериментальными методами. Важно, что средние вероятности ошибки декодирования для типичных кодов при малом отношении сигнал/шум будут находиться в диапазоне $10^{-3} \div 10^{-6}$. Это позволяет обеспечивать достаточный объем компьютерного моделирования при умеренных вычислительных затратах.

Полученные данные свидетельствуют о хорошем соответствии экспериментальных данных и аналитических оценок возможностей МПД в широком диапазоне вероятностей ошибок декодирования для различных алгоритмов.

Таким образом, моделирование оказывается единственным возможным методом исследования работы МПД с числом итераций более двух, особенно при большом уровне шума канала. Ясно, что, в конце концов, только такие каналы и представляют наибольший интерес при решении вопросов реализации тех или иных декодеров. Разработанные для целей анализа работы МПД пакеты прикладных программ позволяют моделировать работу как собственно алгоритма типа МПД, так и некоторых его модификаций, описанных ниже. При этом обеспечивается простая смена уровня шума в канале гауссовского типа, числа уровней квантовая на выходе модема и границ областей решений, систем сигналов модемов, числа итераций декодирования, полиномов используемых кодов, а также других параметров декодеров и каналов. Развитая система сбора статистики позволяет отслеживать структуру ошибок МПД на отдельных итерациях и общую эффективность работы. Кроме того, в программы моделирования включены средства адаптации различных параметров декодера к каналу и коду. Число таких параметров может достигать 1000. Использование мощных средств адаптации на этапе проектирования МПД позволяет в

некоторых случаях дополнительно уменьшить вероятность ошибки декодирования на 1,5 - 2 десятичных порядка по сравнению с приблизительно хорошим выбором основных элементов декодера: порогов, весов проверок и методов их вычислений, а также используемого кода.

Аналогичные моделирующие или эмулирующие результаты работы декодеров программы были написаны и для целого ряда других алгоритмов декодирования, в частности, для алгоритма Витерби (АВ) с различными значениями кодовой скорости R при длине кодирующего регистра $K < 20$.

Экспериментальное изучение характеристик МПД продемонстрировало широкие возможности этих декодеров в каналах с независимыми искажениями или стираниями символов.

Проведенное краткое сравнение МПД с кодами БЧХ и Рида-Соломона (РС), алгоритмом Витерби и последовательными процедурами показывает, что при естественном сопоставлении этих базовых некаскадных методов МПД всегда оказывается существенно эффективнее алгебраических процедур и АВ для двоичных кодов. В не двоичных каналах он вполне сравним по своим возможностям с кодами РС, а в некоторых случаях и превосходит их, сохраняя все достоинства простых мажоритарных схем коррекции ошибок.

Разумеется, высокие характеристики МПД достижимы только при использовании весьма длинных кодов. Но их применение в высокоскоростных трактах спутниковой и космической связи оказываются вполне допустимо. Вполне уместно также помнить, что при работе в условиях большого уровня шума эффективное декодирование, снижающее вероятность ошибки на бит $P_b(e)$ на несколько десятичных порядков, возможно не только при использовании весьма длинных кодов, но и обязательно очень эффективных соответствующих им декодеров. Это является непреложным требованием теории помехоустойчивого кодирования. Таким образом, при декодировании, обеспечивающем высокие значения ЭВК при больших уровнях шума, никакой альтернативы очень длинным кодам и мощным алгоритмам не существует.

Достигнутые с помощью достаточно простых МПД величины ЭВК для каналов типа ДСК порядка $4 \div 6$ дБ и более для вероятности ошибки на выходе около 10^{-5} во многих случаях недостижимы для других алгоритмов приемлемой сложности реализации.

В случае работы МПД с “мягкими” модемами, как это обычно и происходит при реализации алгоритма Витерби, эффективность декодера повышается еще на $1 \div 2$ дБ, при вполне допустимой сложности реализации многопороговой процедуры. Разумеется, характеристики “мягкого” МПД недоступны ни для каких декодеров Витерби, поскольку МПД даже при достаточно большом уровне шума фактически оптимально декодирует длинные коды, что оказывается всегда невозможным в случае использования АВ.

Описан специальный МПД, предназначенный для использования вместо декодера Витерби именно с одним из стандартных несистематических кодов, применяемых при реализации АВ. Характеристики эффективности такого специального МПД близки к АВ, но МПД оказывается гораздо проще, а его

быстродействие - существенно выше, чем у АВ, при всех вариантах реализации этого особого декодера. Это направление исследований будет продолжать свое развитие.

Обобщая полученные экспериментальные результаты, можно считать, что возможности относительно простых МПД оказываются по энергетике каналов приблизительно на $2,5 \div 2$ дБ ниже теоретических границ для соответствующих кодов. Найденны пути построения МПД, характеристики которых будут отличаться от этих пределов менее чем на 1,5 дБ. Это соответствует основам теории кодирования. Из них однозначно следует, что длины используемых для такого МПД кодов должны быть уже весьма большими. В последнее время разработаны и детально анализируются перспективные подходы, реализация которых позволит вплотную подойти к предельным значениям эффективности МПД в каналах с высоким уровнем шума.

Г Л А В А 6

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МПД В СЛОЖНЫХ КОДОВЫХ СИСТЕМАХ

Изложенные выше результаты, относящиеся к характеристикам МПД, имеют большое принципиальное значение. Впервые за большой период развития теории и техники кодирования оказалось, что один из простейших известных методов декодирования – мажоритарный – может быть модифицирован таким образом, что в достаточно широком диапазоне уровней шума канала он совсем мало отличается от оптимальных декодеров для данных хороших кодов.

Высокие характеристики МПД как базового алгоритма обеспечивают для него широкие возможности и при его использовании в различных кодовых конструкциях, поскольку их эффективность непосредственно связана с возможностями входящих в эти структуры кодов.

В этой главе рассмотрены коды с неравной защитой символов, конструкции параллельных кодов (ПК), коды с неравномерной энергетикой (КНЭ) и коды с выделенными ветвями (КВВ). Особое место в числе этих новых кодовых схем занимает каскадирование с кодами контроля по четности, которые также обеспечивают дальнейшее повышение эффективности кодирования. Однако каскадирование с такими кодами практически не требует дополнительных затрат на оборудование, тогда как использование в каскадном коде, например, кодов Рида-Соломона несравненно сложнее, чем введение проверки на четность, для чего требуется только введение в МПД одного дополнительного полусумматора. Это справедливо для любых способов реализации кодирования.

Представленные данные по использованию недвоичного МПД в реальных системах со сложным характером ошибок также демонстрируют его хорошие возможности.

Предложенные методы построения новых типов кодов позволяют решать проблему дополнительного увеличения эффективности кодирования в рамках как каскадных, так и некаскадных схем МПД. Хотя эти методы сами по себе

дают небольшой прирост ЭВК по сравнению с обычными МПД, составляющий обычно $0,3 \div 0,7$ дБ, их применение позволяет еще более приблизиться к пределу $R=C$. Отметим еще раз, что абсолютное большинство всех других методов кодирования в этой области очень высокого шума становятся неработоспособными.

Представленные данные исследований были успешно использованы, в частности, при создании матричных БИС для реализации МПД декодера.

Г Л А В А 7 ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АЛГОРИТМОВ ДЕКОДИРОВАНИЯ

Огромное разнообразие кодов и методов их декодирования, а также еще более обширное множество типов каналов связи и быстрый рост технологических возможностей крайне затрудняют любые оценки сложности и стоимости реализации алгоритмов. Это тем более трудно, что всегда возможно серьезное изменение представлений о проблеме реализуемости, как это уже было, например, при открытии алгоритма Витерби и каскадных кодов.

Изложенные выше причины привели к попытке оценить перспективность тех или иных направлений конструирования аппаратуры кодирования, исходя из идеи обеспечения высокого энергетического выигрыша кодирования (ЭВК) при минимальной задержке принятия решений. В качестве основного критерия эффективности кодирования при сопоставлении кодов далее по-прежнему считается энергетический выигрыш кодирования (ЭВК), обеспечиваемый кодом и алгоритмом его декодирования, как обычно, при средней вероятности ошибки на бит $P_b(e) = 10^{-5}$, т.е. при достаточно типичных условиях.

Несомненно, еще одним критерием выбора алгоритма оказывается его быстродействие, определяющее скорость, с которой алгоритм декодирования может обрабатывать поток кодированных данных. При создании программных вариантов декодеров предпочтение, видимо, нужно отдавать методам с максимальной производительностью, поскольку можно считать, что оперативная память в современной цифровой технике обычно уже не является лимитирующим фактором, так же как и размеры используемых программ для коррекции ошибок.

Разумеется, хотя задержка декодирования на самом деле важна при решении вопросов проектирования аппаратуры, в действительности приходится руководствоваться также и тем, насколько разрабатываемая аппаратура однородна, тестируема, удобна в диагностике и ремонте, а также допускает изучение персоналом принципов работы декодеров.

Однако выбранный подход к сравнению на основе задержки позволяет взглянуть на методы декодирования, абстрагируясь от проблемы технологического развития. Это позволит и в будущем проводить такое сопоставление различных методов декодирования, актуальность которого не будет зависеть от уровня технологии. Это тем более удобно, что при любых подходах к проблеме реализуемости сложность построения МПД всегда

остаётся сопоставимой со сложностью обычных ПД. Это позволит во всех случаях, когда задержка решения у МПД и какого-либо иного метода будут одного порядка, несомненная простота реализации МПД всегда будет серьезным аргументом в пользу его выбора.

Основной вывод, который можно сделать на основе сравнения основных известных алгоритмов, состоит в том, что МПД имеет задержки декодирования, сравнимые с другими высокоэффективными алгоритмами, или, в некоторых случаях, несколько меньшие, чем это необходимо при использовании других методов с приемлемой сложностью реализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной читателям книге проведен анализ и предложено детальное изложение принципов и методов многопорогового декодирования линейных кодов для двоичных, недвоичных и стирающих, систематических и несистематических блоковых и свёрточных кодов. Совокупность теоретически рассмотренных свойств, результаты оценок и моделирования работы МПД позволяют считать, что предложен новый эффективный подход к задаче обеспечения высокой помехоустойчивости при передаче цифровых данных в каналах с большим шумом.

На основании глубокого анализа причин размножения ошибок декодирования разработаны алгоритмы и программы построения кодов с малым уровнем размножения ошибок, которые позволили создать коды, обеспечивающие высокие характеристики декодирования МПД.

Детально изучены МПД для блоковых и свёрточных, двоичных и недвоичных систематических и несистематических кодов в различных каналах с двоичной, недвоичной и многопозиционной модуляцией, а также в каналах со стираниями. Показана значительная эффективность метода многопорогового декодирования, обеспечивающего энергетические характеристики передачи, сопоставимые или более высокие, чем в случае использования других наиболее эффективных процедур: алгоритма Витерби, декодеров для обобщенных каскадных кодов, каскадных схем со свёрточными кодами и декодеров кодов РС.

Во многих отношениях возможности МПД близки к результатам, полученным для турбо кодов. Однако МПД является на данный момент наиболее простым из известных эффективных процедур декодирования.

Теоретические основы высокой эффективности МПД достаточно просты и понятны, что является весьма важным при обучении новым методам кодирования студентов и специалистов.

Выполненные разработки простых и эффективных декодеров типа МПД, а также успешный перевод этого алгоритма на технологию матричных К-МОП БИС действительно обусловлены значительными техническими и технологическими преимуществами МПД перед другими методами, простой структурой и очень незначительной сложностью этого декодера как для

блоковых, так и для свёрточных кодов при одновременном обеспечении высокого энергетического выигрыша кодирования.

Представленные данные по успешному использованию МПД для одновременного выполнения функций кодирования канала и источника, также значительно расширяют сферу его применения.

Основные результаты выполненного исследования для каналов с аддитивным белым гауссовским шумом уже в настоящее время могут быть использованы в любых сложных системах передачи данных на основе имеющихся сведений о возможностях МПД и знаний о свойствах кодов или после некоторых небольших по объему работ по адаптации алгоритма к требованиям конкретных разработок.

Представляется довольно правдоподобным, что и для многих каналов со сложным характером ошибок МПД также будет достаточно эффективен, например, на одном из шагов декодирования в каскадных схемах или в системах с перемежителем. Кроме того, хорошими являются и перспективы использования МПД для сжатия некоторых типов источников.

Достигнутые к настоящему времени характеристики МПД позволяют считать, что при отличии требуемого энергетического выигрыша кодирования (ЭВК), например, для спутниковых каналов от предельного теоретического уровня на $2 \div 2,5$ дБ дБ и при качестве декодирования, достаточно мало отличающемся от оптимального, сложность МПД оказывается по порядку величины фактически на том же уровне, что и сложность обычного порогового декодера. Дальнейшее уменьшение разницы по предельной энергетике примерно на $0,5 \div 0,7$ дБ, приводит к необходимости резкого увеличения длины кода и числа итераций декодирования, возможно, при некотором усложнении функции пороговых элементов декодера.

Дальнейшее улучшение характеристик МПД даже на несколько десятых долей децибелла требуют еще более значительных вычислительных затрат при одновременном дополнительном росте длины кода. Но эти же проблемы возникают и у всех других процедур, которые могут претендовать на высокую эффективность при кодовых скоростях, достаточно близких к пропускной способности канала.

Представляется несомненным, что вопросы, связанные с необходимостью реализации декодирования в области $R \approx C$, когда экономятся буквально единицы процентов мощности передатчика или выделенной полосы частот, видимо, и будут предметом анализа технических потребностей и технологических возможностей систем связи в ближайшие годы.

Решение задачи ускорения внедрения МПД в системы связи будет еще более продвинуто вперед после проведения исследований по использованию этого алгоритма совместно со специальными методами модуляции и другими достижениями теории и техники передачи информации.

Это позволит наряду с уже достигнутыми результатами, обеспечить высокоэффективную экономичную связь для систем широкого и специального назначения в условиях огромного объема передаваемых данных при нарастающем дефиците энергетики каналов и полосы частот.