

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 всём мире, ещё 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 всё новые методы защиты от ошибок, базирующиеся на использовании корректирующих кодов.

Возможность использования тех или иных алгоритмов коррекции ошибок в системах без обратной связи, где нельзя организовать переспрос или он возможен достаточно редко, определяется весьма жёсткими 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 всём мире, свидетельствует об огромной сложности и чрезвычайной актуальности проблемы эффективного декодирования.

Данная книга посвящена новому этапу развития Оптимизационной Теории помехоустойчивого кодирования и создаваемым на её 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. Новое состояние теории кодирования основано на технологиях и идеологии ОТ, а также на достижении во всех основных типах каналов с независимыми искажениями уровня помехоустойчивости, соответствующего непосредственной близости к границе Шеннона, т. е. простому высокодостоверному декодированию в таких каналах при кодовой скорости R , близкой к пропускной способности канала C : $R \lesssim C$.

Подчеркнем, что реализация высокоэффективных алгоритмов вблизи границы Шеннона требует использования только длинных ко-

дов и сложности декодирования, которая должна расти с увеличением длины кода не более чем линейно. Именно такими и оказываются МПД декодеры и другие методы на их основе, представленные в данной книге. Но достижение алгоритмами МПД решений оптимального (переборного!) декодера при линейной от длины кодов сложности их реализации полностью исключает из дальнейшего конкурса алгоритмов все процедуры, основанные на методах алгебраической теории кодирования, т. е. коды БЧХ и коды Рида — Соломона (РС), а также последовательные процедуры для свёрточных кодов. Видимо, это же относится и к некоторым последним «новым» достижениям теории кодирования — полярным и другим кодам, если они не предъявят, наконец, достаточно содержательные результаты по реальной сложности и эффективности предлагаемых ими алгоритмов декодирования. Это дополнительно повышает важность достижений ОТ.

Мажоритарные декодеры рассматривались ранее как в классических монографиях Л.Ф. Бородина [7], Дж. Мессе [8], В.Д. Колесника и Е.Т. Мирончикова [9], Л.М. Финка [62], так и в книгах [10—12], изданных позднее. Существенным достоинством порогового (мажоритарного) декодирования оказалась возможность эффективного многократного улучшения решений этого декодера, которая была доказана, в частности, ещё в 1981 г. в коллективной монографии издательства «Наука» [2] на примере систематических свёрточных кодов.

Данная книга посвящена изложению различных новых аспектов Оптимизационной Теории помехоустойчивого 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 объёма 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 методов многопорогового декодирования линейных кодов, сопоставимого по эффективности с лучшими известными алгоритмами;
- анализ специальных методов кодирования с использованием парадигм ОТ и МПД, эффективно работающих вблизи пропускной способности.

Структурно монография состоит из шести глав. В первой главе введены основные понятия и определения, используемые в последующих разделах. Здесь же представлены базовые сведения по обычным пороговым декодерам (ПД) для двоичных и символьных кодов.

Во второй главе сформулированы основные принципы многопорогового декодирования для двоичных симметричных каналов, доказано стремление решений декодеров этого типа к решению оптимального декодера и указано на природу МПД алгоритма как на реализацию процедуры глобальной оптимизации функционала от большого числа переменных для частного случая дискретных математических пространств. Затем этот принцип роста правдоподобия решения МПД обобщается на двоичные гауссовские каналы при использовании «мягких» модемов, недвоичные и несистематические коды, а также на каналы со стираниями. В конце главы рассмотрены предельные возможности МПД различных типов и проблема размножения ошибок при мажоритарном декодировании, решение которой позволило многократно улучшить характеристики МПД и других связанных с ними методов.

В третьей главе на основе публикаций самого последнего времени предъявлены наиболее важные результаты по алгоритмам ОТ, включая конкретные характеристики этих алгоритмов в непосредственной близости от границы Шеннона. Материалы этой главы имеют большую самостоятельную ценность, т. к. все разделы этой главы являются законченными опубликованными работами и характеризуются очень высокой информационной плотностью излагаемого материала. Поэтому при глубокой идеологической связи этой главы с содержанием остальных частей монографии все её разделы полностью автономны, как и отдельные для каждой из них списки использованной литературы. Мы полагаем, что это окажется удобным и читателям книги, которые могут без обращения к её другим главам или иным публикациям полностью понять содержание этих самостоятельных статей-параграфов. Разумеется, ссылки на литературные источники за пределами третьей главы являются сквозными для всей книги, что соответствует сложившимся традициям.

В четвёртой главе описаны результаты, полученные с учётом новых парадигм ОТ, которые позволяют дополнительно повысить эффективность оптимизационных процедур, используемых для поиска решений оптимального декодера. Детально рассмотрены вопросы эффективности декодирования, которые и определили передачу ОТ от классической теории лидирующей роли в создании прикладных методов в этой сфере теории информации.

Пятая глава посвящена изложению основных потенциально перспективных методов, средств, систем и технологических приёмов, которые смогут ещё более повысить эффективность работы алгоритмов ОТ в ближайшем будущем. Эта глава очень важна для понимания необходимого технологического уровня, которого надо достичь для

успешного дальнейшего развития исследований МПД, АВ, дивергентного кодирования и прочих методов ОТ. Только в этом случае можно в дальнейшем достичь новых результатов в этой области. Полная неизбежная смена технологического и идеологического обеспечения исследований теории кодирования в области глобальной оптимизации функционалов уже состоялась. Сейчас только этот подход является фактически единственным средством оптимального декодирования длинных кодов вблизи границы Шеннона, что и определяет текущие возможности развития прикладных методов всей теории кодирования.

В шестой главе кратко рассмотрены перспективы новой теории, которые, как мы предполагаем, будут гораздо более масштабными, чем их описал автор.

В заключении сформулированы обобщающие выводы по проведенному исследованию.

Предполагается, что наши читатели знакомы с теорией вероятности, основами теории кодирования и базовыми методами 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 монографии именно на понимании свойств и возможностей изучаемых многопороговых алгоритмов и на реализации различных идей оптимизации функционалов, 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.

Обращаем внимание наших читателей, что в связи с ограниченным объёмом книги многие разделы изложены очень кратко, а некоторые темы, которые излагались в других наших публикациях, сокращены или опущены. При этом мы старались сделать все необходимые ссылки и краткие комментарии по поводу отсутствующего в этой книге материала. Такой подход позволил нам сосредоточиться на изложении только самых новых результатов, некоторые из которых, возможно, ещё не опубликованы достаточно полно даже в статьях по тематике ОТ. Таким образом, знакомство с вопросами итеративного многопорогового декодирования как с проблемой оптимизации специфических для теории кодирования функционалов мы старались сделать по возможности более понятным и точным.

Дополнительные информационные, научные и учебно-методические материалы по ОТ и МПД алгоритмам можно найти на специализированном веб-сайте ИКИ РАН www.mtdbest.iki.rssi.ru и на нашем постоянно обновляемом аналогичном портале РГРТУ www.mtdbest.ru.

Напоминаем также, что для более глубокого изучения ОТ, МПД декодеров, алгоритмов Витерби в их различных модификациях и каскадных схем с использованием кодов контроля по чётности (ККЧ) мы увеличили в книге количество конкретных ссылок на демо-программы этих алгоритмов, которые также можно найти на наших порталах. Обращение к наглядным примерам, которые характеризуют те или иные теоретические результаты одновременно и в практической плоскости, обычно помогает быстрее и глубже понимать оптимизационный характер абсолютно всех эффективных алгоритмов декодирования как для двоичных, так и для символьных кодов.

В данной монографии, как это можно видеть, не очень много ссылок на работы по ОТ и МПД алгоритмам, хотя самые обязательные, конечно, указаны. Гораздо большее число ссылок, включая дополнительную литературу по этой тематике есть в [3–5, 36–38]. Многие недавние публикации нашей научной школы можно найти на ресурсах [40].

Члены нашей научной школы полагают, что выход в свет нашей монографии в этом 2018 году, юбилейном для публикации великой работы Шеннона [14], послужит дальнейшему всестороннему развитию теории кодирования в нашей стране и в мире.

Возможно, что эта обобщающая монография по ОТ, методам поиска глобального экстремума функционалов и многопороговым алгоритмам, успешно работающим непосредственно вблизи границы Шеннона, использующая простые, но иногда совершенно новые для «классической» теории кодирования парадигмы, технологии и подходы, вызовет у специалистов определённые вопросы и окажется не лишённой определённых недостатков. Автор полагает, что новые публикации нашей научной школы по тематике ОТ существенно сгладят эти недочёты.