

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЕ КОДИРОВАНИЕ В ЦИФРОВЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Ю.Б. Зубарев

Член-корреспондент РАН, профессор МТУСИ, член редколлегии журнала

Г.В. Овечкин

Доцент РГРТУ, к.т.н.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время происходит интенсивное развитие цифровых систем связи, таких как космическая, спутниковая, мобильная связь и др. Все эти системы используют для передачи беспроводные каналы, в которых на сигнал действуют помехи различной физической природы. Это приводит к тому, что принятые данные с большой вероятностью содержат ошибки, что для многих приложений недопустимо. В результате возникает задача обеспечения надежной передачи цифровой информации по каналам с помехами.

Для решения данной задачи обычно применяются методы защиты от ошибок, базирующиеся на применении помехоустойчивых кодов. Использование таких кодов позволяет получить энергетический выигрыш кодирования (ЭВК), который характеризует степень возможного снижения энергии передачи при кодировании по сравнению с отсутствием кодирования, если достоверность передачи в обоих случаях одинакова. ЭВК можно использовать для улучшения параметров и характеристик многих свойств систем передачи данных, например, для уменьшения размеров очень дорогих антенн, повышения дальности связи, увеличения скорости передачи, снижения необходимой мощности передатчика и т. д.

На сегодняшний день известно множество кодов и методов их декодирования, различающихся ЭВК, сложностью реализации и рядом других параметров. Далее описываются методы коррекции ошибок, в том числе рекомендованные стандартами

передачи данных, обсуждаются их характеристики и области применения. Все представленные в обзоре характеристики методов помехоустойчивого кодирования даны для канала с аддитивным белым гауссовым шумом (AWGN), двоичной фазовой модуляции (BPSK) и демодулятора, способного формировать мягкие решения.

ДЕКОДЕР ВИТЕРБИ

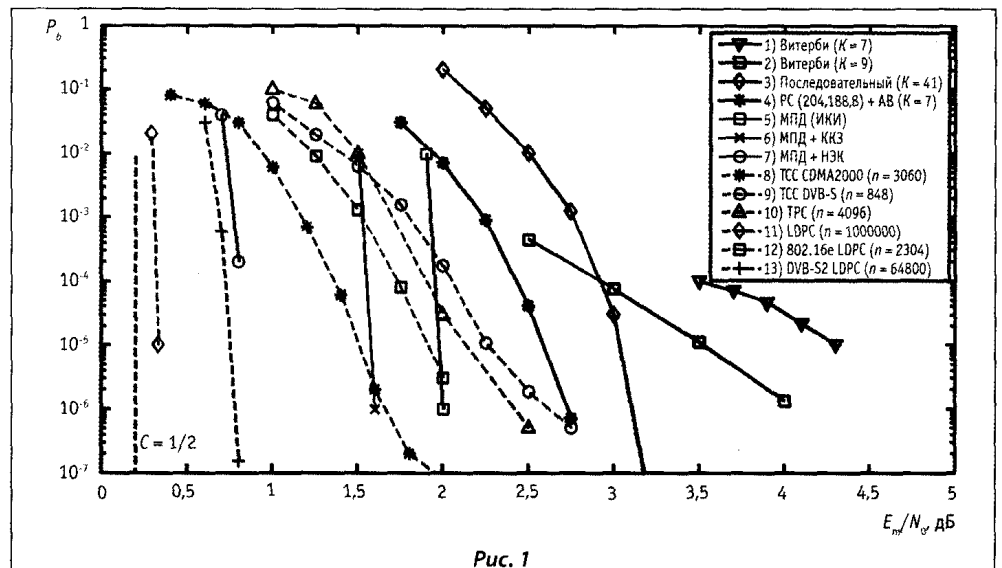
Классическим методом коррекции ошибок, по праву считавшимся лучшим в течение нескольких десятилетий, является декодер Витерби [1], применяемый для декодирования сверточных кодов. Данный алгоритм является оптимальным и легко реализуемым для коротких сверточных кодов. В связи с этим сверточные коды, декодируемые с помощью алгорит-

ма Витерби, применяются в большинстве стандартов систем передачи данных, например, в беспроводных сетях стандартов IEEE 802.11, IEEE 802.16, дальней космической связи CCSDS, спутниковой связи TIA-1008 и др.

Зависимости вероятности битовой ошибки декодера Витерби от отношения сигнал/шум на бит для сверточных кодов с кодовой скоростью $R = 1/2$ и конструктивной длиной $K = 7$ и 9 представлены на рис. 1 (кривые 1 и 2). Отметим, что область эффективной работы декодера Витерби при использовании данных кодов находится достаточно далеко (более 4 дБ) от пропускной способности канала, равной для данных параметров модуляции и кодирования $0,2$ дБ (кривая $C = 1/2$). Использование более длинных и потенциально более эффективных кодов в декодере Витерби представляется нецелесообразным из-за экспоненциального роста сложности его реализации от длины кода. Поэтому долгое время усилия многих специалистов были направлены на разработку алгоритмов декодирования, которые способны эффективно декодировать длинные коды при небольшой сложности реализации.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ ДЕКОДЕР

Для декодирования сверточных кодов с большей конструктивной длиной (например, сверточные коды стандарта TIA-1008) могут применяться последовательные алгоритмы декодирования [2]. Ха-



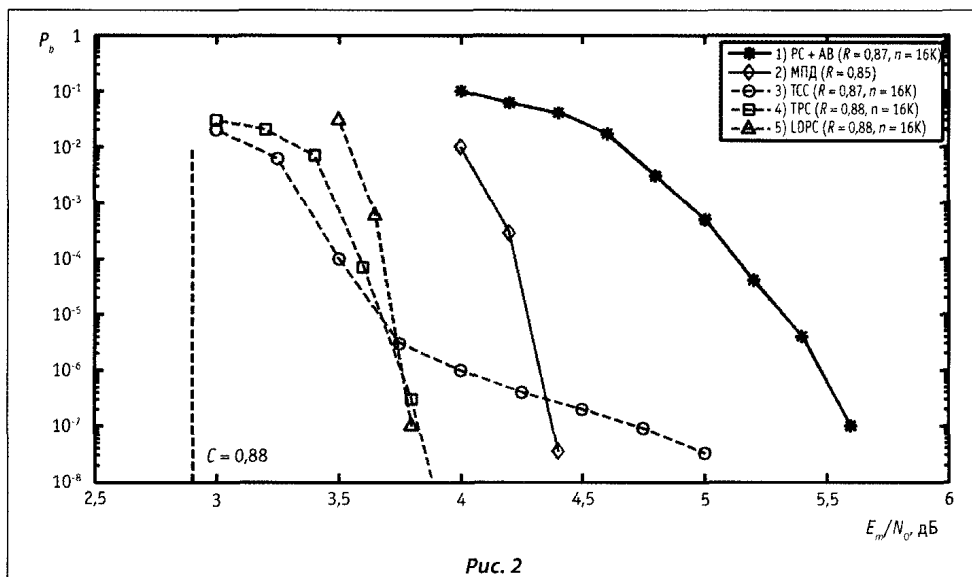


Рис. 2

характеристики последовательного декодера сверточного кода с $K=41$ представлены на рис. 1 кривой 3. Видно, что такие декодеры способны работать примерно в 3 дБ от пропускной способности канала. Невысокая эффективность последовательных декодеров определяется тем, что с точки зрения теории такие алгоритмы работоспособны только в области меньшей, чем вычислительная скорость канала. Это примерно на 3 дБ выше границы, соответствующей его пропускной способности.

КАСКАДНЫЕ КОДЫ

Важным этапом в развитии теории кодирования является появление каскадных кодов [3], в основе построения которых лежит идея совместного использования нескольких составляющих кодов. Такую кодовую конструкцию можно эффективно декодировать с помощью простых декодеров составляющих кодов. Широкое применение в системах передачи данных (CCSDS, DVB-S, IEEE 802.16, TIA-1008) нашла каскадная схема, в которой данные кодируются внешним кодом Рида—Соломона (РС) и внутренним коротким сверточным кодом [4]. Часто в данной схеме между внешним и внутренним кодером/декодером включаются устройства перемежения и восстановления, осуществляющие псевдослучайную перестановку символов внешнего кода и восстановление исходного порядка символов соответственно. Эти устройства предназначены для разбиения пакетов ошибок, появляющихся после декодера внутреннего кода (декодера Витерби), что позволяет существенно улучшить эффективность каскадной конструкции в целом. Характеристики широко применяемого каскадного кода, состоящего из укороченного кода Рида—Соломона (204,188,8) и сверточного кода с $K=7$ представлены на рис. 1 кривой 4. Такая каскадная схема может работать примерно в 2,5 дБ от пропускной способности канала.

Интерес для систем передачи данных также представляют малоизбы-

точные помехоустойчивые коды. На рис. 2 кривой 1 представлены характеристики каскадного кода, состоящего из кода Рида—Соломона и сверточного кода с общей кодовой скоростью $R=0,87$. Отметим, что данная кодовая конструкция способна работать чуть более чем в 2,5 дБ от пропускной способности канала, равной для данных параметров канала и кодирования 2,9 дБ (кривая $C=0,88$).

МНОГОПороГОВЫЕ ДЕКОДЕРЫ

Значительно лучшей эффективностью обладает многопороговый декодер (МПД) самоортогональных кодов (СОК) [5-9], который является развитием простейшего порогового декодера Мессе и позволяет декодировать длинные коды с линейной зависимостью сложности реализации от длины кода. При этом МПД способен вплотную приблизиться к решению оптимального декодера в широком диапазоне кодовых скоростей и уровней шума канала. Данный алгоритм развивается специалистами Института космических исследований РАН и Рязанского государственного радиотехнического университета.

Многопороговый декодер используется для декодирования блочных и сверточных СОК и является простейшим устройством, состоящим из регистров сдвига, сумматоров по модулю 2 и пороговых элементов, осуществляющих суммирование проверок, относящихся к декодируемому информационному биту, и сравнение полученной суммы с порогом. При правильном выборе кодов и параметров декодирования МПД обеспечивает высокую корректирующую способность. На рис. 1 кривая 5 соответствует характеристикам декодера МПД сверточного кода с 40 итерациями декодирования, созданного в 2007 г. в ИКИ РАН. Такой декодер способен работать менее чем в 2 дБ от пропускной способности канала. При этом сложность реализации данного МПД минимальна, что позволяет ему успешно

работать в каналах со скоростью передачи более 600 Мбит/с.

В то же время разработчики МПД постоянно совершенствуют способы повышения его эффективности. В ряде работ показано, что применение МПД в каскадных конструкциях совместно с внешними кодами с небольшим кодовым расстоянием и малой избыточностью обеспечивает видимое улучшение энергетических характеристик при декодировании. Например, кривой 6 на рис. 1 показаны возможности каскадной схемы с МПД во внутренних каскадах.

Хорошим примером широких возможностей МПД по очень простой адаптации к особым условиям применения являются новые МПД алгоритмы для каналов с неравномерной энергетикой (НЭК) [6, 8]. Представленные на рис. 1 кривой 7 характеристики одного из таких МПД декодеров иллюстрируют высокую энергетическую эффективность алгоритма, работающего всего в 0,6 дБ от пропускной способности канала. МПД показывает хорошую корректирующую способность и при использовании малоизбыточных кодов. На рис. 2 кривая 2 отражает характеристики МПД кода с кодовой скоростью $R=0,85$ и длиной порядка 40 тысяч битов. Такой МПД способен работать примерно в 1,5 дБ от пропускной способности канала.

Отметим, что МПД при декодировании выполняет в десятки раз меньшее число операций, чем другие сопоставимые по эффективности методы коррекции ошибок [5, 6, 8]. Кроме того, для МПД существует возможность полного распараллеливания операций при аппаратной реализации. Это позволяет утверждать, что МПД могут обеспечивать коррекцию ошибок во многих современных высокоскоростных системах передачи данных с предельно возможными уровнями энергетического выигрыша и быстродействию в сотни и тысячи Мбит/с [9].

ТУРБОКОДЫ

Еще один важный этап в развитии теории кодирования связан с открытием турбокодов, образующихся путем каскадирования двух или более составляющих кодов. Первые турбокоды, предложенные в [10], состояли из двух параллельно соединенных через перемежитель сверточных кодов. В общем случае турбокоды могут получаться как при параллельном, так и при последовательном соединении кодов, разделенных перемежителем.

Наиболее важным моментом при проектировании турбокодов с параллельным каскадированием является правильный выбор составляющих кодов и перемежителя. Известно, что для турбокода такого типа наилучшими являются рекурсивные систематические сверточные коды, поскольку их применение позволяет значительно уменьшить число кодовых слов низкого веса, определяющих эффективность турбокода [11]. Получаю-

щийся в результате турбокод обычно называется сверточным турбокодом (Turbo Convolutional Code — TCC). Роль перемежителя в турбокодах состоит в уменьшении корреляции между соседними символами кодового слова, что позволяет на каждой итерации декодирования снижать вероятность ошибки. Кроме того, перемежитель существенно влияет на минимальное кодовое расстояние турбокода и количество кодовых слов низкого веса, определяющих его эффективность.

Для декодирования турбокодов используется итеративное декодирование с мягким решением, позволяющее получить очень близкие к пропускной способности канала характеристики. В процессе итеративного декодирования турбокода выполняется несколько итераций. На каждой из них происходит декодирование каждого из составляющих кодов, после чего результат декодирования используется декодером другого составляющего кода для получения более точных решений. Для декодирования составляющих кодов могут применяться любые алгоритмы декодирования (Log-MAP, Max-Log-MAP, SOVA), способные формировать мягкие решения относительно декодированных символов.

Проведенные с момента открытия турбокодов исследования показали, что эффективность использования данных кодов очень высока. Они способны работать при энергетике всего на 0,5 дБ выше пропускной способности канала. При этом их реализация проще по сравнению с декодерами сопоставимых по эффективности декодеров сверточных кодов. Поэтому сегодня турбокоды рекомендованы к применению в таких стандартах беспроводной связи, как CCSDS, TIA-1008, CDMA2000, UMTS.

На рис. 1 кривой 8 показаны характеристики TCC длиной 3060 битов, рекомендованного в стандарте CDMA2000. Данный турбокод работает всего в 1,5 дБ от пропускной способности канала. Отметим, что для TCC свойственно наличие области насыщения вероятности ошибки, в которой скорость уменьшения вероятности ошибки при повышении отношения сигнал/шум значительно замедляется. Для данного TCC эта область начинается при вероятности ошибки декодирования около 10^{-7} .

Характеристики другого, более короткого TCC длиной всего 848 битов представлены на рис. 1 кривой 9. Отметим, что и такой турбокод обладает достаточно хорошей корректирующей способностью. Характеристики малоизбыточных TCC с $R = 0,87$ и длиной блока 16К представлены на рис. 2 кривой 3. Здесь также наблюдается область насыщения вероятности ошибки.

Основными недостатками TCC следует признать высокую сложность практической реализации, а также наличие области насыщения вероятности ошибки. Данный

эффект определяется небольшим кодовым расстоянием турбокодов.

Перспективными являются также турбокоды произведения (Turbo Product Code — TPC) [12], которые строятся путем последовательного каскадирования двух или более блоковых кодов. При этом в качестве составляющих кодов обычно выбираются короткие, легко декодируемые коды, такие как коды с контролем четности, коды Хэмминга и некоторые другие. Составляющими кодами могут быть как одинаковые, так и разные коды.

Для TPC также применим итеративный алгоритм декодирования, позволяющий при невысокой сложности реализации получать близкую к предельной эффективность декодирования. В результате использующие TPC системы передачи данных способны работать при очень низких отношениях сигнал/шум. Дополнительным преимуществом TPC является хорошая адаптивность к предъявляемым требованиям по корректирующей способности, вносимой избыточности, длинам используемых кодов и др. Все эти преимущества способствуют применению TPC во многих системах передачи данных, например INTELSAT, системах стандарта IEEE 802.16.

Характеристики TPC с кодовой скоростью $R \approx 1/2$ и длиной блока 4096 битов представлены на рис. 1 кривой 10. При такой кодовой скорости TPC заметно уступают TCC при сопоставимых длинах блоков. Однако при высоких кодовых скоростях ($R > 0,5$) TPC обладают лучшей эффективностью. Кривой 4 на рис. 2 представлены характеристики TPC с кодовой скоростью $R = 0,88$ и длиной блока 16К, способного работать менее чем в 1 дБ от пропускной способности канала. Кроме того, TPC имеют значительно большее кодовое расстояние, и поэтому область насыщения вероятности ошибки для них будет гораздо ниже, чем для TCC. В результате с помощью TPC можно обеспечивать очень малые вероятности ошибки декодирования.

Отметим, что декодеры TPC значительно проще декодеров TCC. В результате TPC могут работать со скоростями в несколько сотен Мбит/с, что очень сложно получить при использовании TCC.

НИЗКОПЛОТНОСТНЫЕ КОДЫ

В последнее время особое внимание уделяется классу кодов с малой плотностью проверок на четность (Low-Density Parity-Check — LDPC), предложенных Р. Галлагером еще в 1962 г. и заново «открытых» Д. Маккаем в середине 90-х годов [13]. Применение методов итеративного декодирования к данным кодам позволяет практически вплотную приблизиться к пропускной способности канала при относительно небольшой сложности реализации [14]. В связи с этим во многих новых стандартах передачи данных (DVB-S2, 802.11n, 802.16e) именно LDPC коды рекомендованы для исправления ошибок.

Коды LDPC представляют собой линейные блоковые коды, задаваемые с помощью проверочной матрицы H , характеризующейся относительно малым (<10) числом единиц в строках и столбцах. Проверочной матрице кода ставится в соответствие граф Таннера, в котором для представления строк и столбцов проверочной матрицы используются определенным образом связанные между собой битовые и проверочные узлы.

Для декодирования LDPC кодов обычно используются разновидности sum-product и min-sum алгоритмов, работающих с графом кода. Данные алгоритмы отличаются сложностью реализации и эффективностью декодирования. В основе работы алгоритмов лежит итеративный обмен мягкими решениями между различными узлами графа кода. При правильном выборе кода (проверочной матрицы) удается получить близкие к оптимальным результаты.

На рис. 1 кривой 11 показаны характеристики LDPC кода длиной 10^6 битов. Данный код способен работать всего в 0,1 дБ от пропускной способности канала, хотя, конечно, его реализация слишком сложна для применения. Характеристики рекомендуемых в стандартах IEEE 802.16e и DVB-S2 кодов LDPC длиной 2304 и 64800 битов представлены на рис. 1 кривыми 12 и 13. Данные коды показывают сопоставимую с турбокодами эффективность при несколько меньшей сложности реализации. Характеристики малоизбыточных LDPC кодов, рекомендуемых в стандарте DVB-S2, показаны на рис. 2 кривой 5. И в данном случае эффективность LDPC кодов очень высока.

Заметим, что представленные для турбо- и LDPC кодов результаты относились к наилучшим алгоритмам их декодирования, работающим с некантовыми решениями демодулятора, что при аппаратной реализации декодера из-за различных ограничений часто оказывается недопустимым. При переходе к более простым алгоритмам, работающим с кантовыми решениями на нескольких уровнях решения демодулятора, возможны потери от 0,5 до 1 дБ и более. Характеристики МПД и остальных алгоритмов получены с учетом требований аппаратной реализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного обзора широко применяемых и еще разрабатываемых помехоустойчивых кодов и алгоритмов их декодирования показано, что существует всего несколько методов коррекции ошибок, способных работать вблизи пропускной способности канала. К ним можно отнести многопороговые декодеры самоортогональных кодов, турбо- и низкоплотностные коды. Каждый из них имеет свои достоинства, недостатки и свою область применения. Например, турбо- и низкоплотностные коды способ-

ны работать при уровне энергетики канала, всего на несколько десятых децибела превышающем его пропускную способность. Однако для практической реализации декодеров данных кодов требуются значительные аппаратные ресурсы. Поэтому разработчики кодеков вынуждены использовать чрезвычайно дорогие аппаратные средства или идти на упрощение алгоритмов, что приводит к ухудшению их характеристик.

Многопороговые декодеры, хотя незначительно уступают турбо- и низкоплотным кодам по обеспечиваемому уровню энергетического выигрыша, но оказываются при этом очень простыми для практической реализации. Это позволяет создавать недорогие кодеки МПД, успешно работающие в высокоскоростных цифровых системах передачи данных.

Представленные на сайте [9] демопрограммы для некоторых из рассмотренных методов декодирования имеют ряд настраиваемых параметров и помогают оценить характеристики данных алгоритмов коррекции ошибок при различных уровнях шума.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №08-07-00078).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Viterbi A.** Error Bounds for Convolutional Codes and an Asymptotically Optimum Decoding Algorithm // IEEE Trans. — 1967. — IT-13. — P. 260—269.
2. **Wozencraft J.** Sequential decoding for reliable communication // IRE Natl. Conv. Rec. — 1957. — V.5. — P. 11—25.
3. **Форни Д.** Каскадные коды. — М.: Мир, 1970.
4. **Cideciyan R., Eleftheriou E., Rupp M.** Concatenated Reed-Solomon/Convolutional Coding for Data Transmission in CDMA-Based Cellular Systems // IEEE Trans. on Commun. Oct. 1997. — V.45. — №10. — P. 1291—1303.
5. **Золотарев В.В., Овечкин Г.В.** Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. Справочник. — М.: Горячая линия — Телеком, 2004.
6. **Золотарев В.В.** Теория и алгоритмы многопорогового декодирования. — М.: Радио и связь, Горячая линия — Телеком, 2006.
7. **Зубарев Ю.Б. и др.** Многопороговые алгоритмы для спутниковых сетей с оптимальными характеристиками // Электросвязь. — 2006. — №10. — С. 9—11.
8. **Зубарев Ю.Б., Золотарев В.В., Овечкин Г.В.** Обзор методов помехоустойчивого кодирования с использованием многопороговых алгоритмов // Цифровая обработка сигналов. — 2008. — №1. — С. 2—11.
9. Многопороговые декодеры. — Веб-сайт ИКИ РАН www.mtdbest.iki.rssi.ru.
10. **Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P.** Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo Codes // Proc. of the Intern. Conf. on Commun. (Geneva, Switzerland). — May 1993. — P. 1064—1070.
11. **Seghers J.** On the Free Distance of TURBO Codes and Related Product Codes // Final Report, Diploma Project SS 1995, Number 6613, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Switzerland, August 1995.
12. Press Release, АНА announces Turbo Product Code Forward Error Correction Technology. 1998.
13. **MacKay D., Neal R.** Near Shannon limit performance of low density parity check codes // IEEE Electronics Letters. — Aug. 1996. — V.32. — №18. — P. 1645—1646.
14. **Chung S., Forney D., Richardson T., Urbanke R.** On the Design of Low-Density Parity-Check Codes within 0,0045 dB of the Shannon Limit // IEEE Comm. Letters. — Feb. 2001. — V.5. — №2. — P. 58—60.