



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

**ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,
ОКПО 02068574**

Политехническая ул., 29, С.-Петербург, 195251
Телефон (812) 297-20-95, факс 552-60-80
E-mail: office@spbstu.ru

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого»

О.Н. Остапенко

2015г.



№ _____

на № _____ от _____

Отзыв ведущей организации

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

на диссертацию Жилина Игоря Витальевича

«Разработка и анализ алгоритмов декодирования МПП- и ОЛО-кодов,
допускающих распараллеливание и конвейеризацию»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата технических наук по специальности 05.13.17 – Теоретические основы
информатики

Актуальность темы диссертации

Помехоустойчивое кодирование является одной из основных частей современных систем передачи и хранения информации. Постоянный рост требований к скорости и помехозащищенности передачи данных требует разработки новых методов построения и быстрого декодирования корректирующих кодов. Требования к скорости передачи данных, которые в настоящий момент достигают 400 и 1000 Гбит/с, растут быстрее, чем рабочие частоты устройств кодирования и декодирования. Для обеспечения таких скоростей требуется применение кодовых конструкций, допускающих распараллеливание и конвейеризацию. Кроме того в настоящее время растут требования к надежности, особенно в волоконно-оптических линиях связи, достигая вероятности ошибки 10^{-15} и менее. Имитационное моделирование до таких вероятностей ошибок при разработке новых кодовых конструкций становится практически невозможным на вычислительных

устройствах общего назначения и требует создания специальных устройств, из-за чего становится актуальным получение аналитических оценок вероятности ошибки. Таким образом, актуальность диссертационной работы не вызывает сомнений.

Содержание диссертации

Первая глава диссертации посвящена вопросам декодирования кодов с малой плотностью проверок на четность (МПП). Представлено описание рассматриваемых конструкций и алгоритмов декодирования. Основным результатом первой главы является метод векторизации вычислений алгоритма распространения доверия для q -ичных МПП кодов, основанных на матрицах перестановок. Автором описываются результаты вычислительного эксперимента, состоявшего в запуске предложенного векторизованного алгоритма декодирования на процессоре и графическом ускорителе. Приведенные результаты свидетельствуют, что при использовании графического ускорителя достигается значительное повышение производительности по сравнению с вычислениями исключительно на базе центрального процессора.

Во второй главе диссертации рассматриваются вопросы построения и декодирования обобщенных кодов с локализацией ошибок (ОЛО-кодов). Известно, что ОЛО-коды являются подмножеством обобщенных каскадных кодов (ОК-кодов), но отличаются от последних тем, что при представлении кодового слова в виде матрицы столбцы не являются словами внутренних кодов. При декодировании ОК-кодов сначала декодируются внутренние коды, а потом декодер внешнего кода работает в улучшенном канале. В отличие от декодирования ОК-кодов, в ОЛО-кодах первым декодируется не внутренний код, а первый внешний код, причем он работает при вероятности ошибки хуже, чем из канала. В столбце могут передаваться все возможные слова, но в результате декодирования первого внешнего кода декодер определяет, какой смежный класс внутреннего кода передавался в данном столбце. В диссертации приведены адаптации алгоритмов поэтапного декодирования для рассматриваемых конструкций. Для них получены верхняя и нижняя границы вероятности неправильного декодирования. Следует отметить, что в диссертации исследуется не асимптотическое поведение свойств кодов или алгоритмов декодирования, а строятся границы для вероятности ошибки декодирования кодов с заданными параметрами. На этих границах основан предлагаемый автором метод подбора параметров компонентных кодов, обеспечивающий достижение заданной вероятности ошибки декодирования. Соискателем разработаны программы, реализующие верхнюю и нижнюю границы и подбор параметров компонентных кодов, которые позволяют производить оценку сверху и снизу вероятности ошибки декодирования заданной конструкции ОЛО-кода до малых значений (до 10^{-15} и менее) без проведения ресурсоёмкого моделирования, а также для заданных входной и выходной вероятностей ошибки строить коды с максимальной скоростью. Представлен пример кодовой конструкции, ориентированной на использование в волоконно-оптических линиях связи, которая, при большей длине кода и сопоставимой вероятности ошибки, обеспечивает меньшую избыточность и допускает более простое декодирование по

сравнению с кодом БЧХ с чередованием, предложенным другими исследователями для использования в подобной системе. Наличие исчерпывающего описания кодов, методов кодирования, декодирования и расчета параметров является несомненным достоинством диссертации. Эти сведения будут очень полезны для инженеров, проектирующих соответствующие телекоммуникационные системы.

Третья глава посвящена вопросам мягкого декодирования ОЛЮ-кодов. В её первой части построены ОЛЮ-коды с использованием МПП-кодов в качестве внешних. Показано, что они являются МПП-кодами, для них представлены границы на минимальное расстояние кодов. Для них предложены алгоритмы мягкого декодирования, основанные на декодере ОЛЮ-кодов, и приведены результаты моделирования этих кодов при декодировании их и предложенными декодерами, и известным алгоритмом «распространения доверия». Показано, что в области малых отношений сигнал/шум декодирование предложенных кодов алгоритмом «распространения доверия» обеспечивают лучший результат по сравнению с предложенными алгоритмами декодирования, но на больших ОСШ первые демонстрируют эффект «полки», что дает преимущество предложенным алгоритмам на больших ОСШ. Во второй части предложен алгоритм мягкого декодирования ОЛЮ-кодов с компонентными кодами Рида-Соломона, заключающийся в мягком декодировании внутренних кодов и жестком декодировании внешних. Для этого алгоритма построена верхняя граница вероятности неправильного декодирования и предложен алгоритм выбора оптимальных скоростей внешних кодов. Показано, что при отдельных ОСШ этот алгоритм декодирования позволяет обеспечить более высокую скорость кода при заданной вероятности неправильного декодирования.

Достоверность и новизна результатов исследования

Автореферат соответствует содержанию диссертации и отражает основные результаты диссертации, ее новизну и практическую значимость. Достоверность полученных результатов достигается корректным использованием аппарата комбинаторики и теории кодирования, а также сопоставлением результатов теоретических расчетов и статистического моделирования. Предлагаемые в работе новые подходы к построению кодов и их декодирования могут быть полезны для разработчиков перспективных систем хранения и передачи информации.

Теоретическая значимость и практическая ценность

Теоретическая значимость представленных в работе научных результатов состоит в разработке алгоритма декодирования ОЛЮ-кодов, который позволяет рассматривать шаги декодирования независимо и благодаря этому строить границы вероятности неправильного декодирования. Важным является построение нижней границы вероятности неправильного декодирования ОЛЮ-кодов предложенным алгоритмом. Предложен метод выбора параметров компонентных кодов, максимизирующий скорость всего кода для заданных входных и выходных вероятностей. Данные результаты могут

получить дальнейшее развитие и быть применены при разработке и оптимизации других конструкций ОЛО-кодов.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в том, что полученные в ней методы и алгоритмы могут быть использованы при создании перспективных систем передачи и хранения информации. Так, границы вероятности неправильного декодирования и алгоритм выбора скоростей компонентных кодов могут быть использованы для построения ОЛО-кодов, обеспечивающих требуемую вероятность неправильного декодирования при заданной входной вероятности ошибки, без проведения затратного по вычислительным ресурсам моделирования.

Предложенный в работе метод векторизации вычислений при декодировании МПП кодов может быть использован при построении высокопроизводительных систем «программного радио».

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Предлагаемые в работе новые подходы к построению кодов и их декодирования могут быть применены разработчиками перспективных систем хранения и передачи информации. В частности, предложенная конструкция ОЛО-кодов с расширенными кодами БЧХ в качестве внутренних кодов может быть использована при разработке систем кодирования для каналов с малой долей ошибок и высокими требованиями к пропускной способности, к которым, например, относятся волоконно-оптические линии связи и устройства хранения данных.

Основные результаты, полученные в диссертации, также могут быть использованы в учебном процессе и для разработки новых методов и технологий помехоустойчивого кодирования в таких организациях, как ИППИ РАН, СибГУТИ, НГУ, ГУАП, СПбПУ, МГУ, МФТИ, МИЭТ.

Замечания по работе

1. В работе не рассматривалось сравнение производительности предложенного метода векторизации декодирования МПП-кодов с другими известными реализациями алгоритма распространения доверия для q -ичных МПП кодов^{1,2}.
2. В работе не рассматривалось сопоставление предлагаемых методов построения ОЛО-кодов с известными методами построения многоуровневых (обобщенных каскадных) кодов.
3. Неясно, как соотносится корректирующая способность кода, предлагаемого автором для волоконно-оптической системы связи, с корректирующей способностью иных кодов в условиях использования квадратурно-амплитудной

¹ G. Wang, H. Shen, B. Yin, M. Wu, Y. Sun, J. R. Cavallaro. Parallel Nonbinary LDPC Decoding on GPU. // *Proceedings of Forty Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 2012.

² M. Beermann, E. Monzó, L. Schmalen, P. Vary. High speed decoding of non-binary irregular LDPC codes using GPUs. // *Proceedings of IEEE Workshop on Signal Processing Systems (SiPS)*, 2013.

- модуляции, наличия нелинейных искажений и прочих помех, характерных для этой системы.
4. В диссертации не рассматривается сравнение сложности алгоритмов декодирования предлагаемых кодов и выбранного для сравнения кода БЧХ. Необходимо отметить, что для декодирования последнего необязательно строить таблицы размерности 2^{14} , как указано в работе. Можно ограничиться лишь таблицами для поля $GF(2^7)$, представив поле $GF(2^{14})$, используемое декодером кода БЧХ, как его алгебраическое расширение.
 5. Маухером, Зябловым и Боссертом в 2000 г. было доказано, что ОЛО-коды эквивалентны обобщенным каскадным кодам³. Для построения последних применимы те же методы, что и для случая многоуровневых кодов. К сожалению, в работе не рассматривается сравнение кодов, построенных с помощью предложенного автором метода, и кодов, получаемых с помощью, например, правила равной вероятности ошибки⁴.
 6. Не обоснован выбор МПП-кода, используемого для сравнения при моделировании предложенного алгоритма мягкого декодирования ОЛО-кодов.
 7. В разделе 3.3.2 автор указывает, что решетка для $(n, k)_q$ кода содержит $(n + 1) \times q^{n-k}$ вершин, хотя на самом деле их число не превосходит $(n + 1) \times q^{\min(k, n-k)}$.
 8. Представляется, что эффекта «полки» МПП-кодов в главе 3 можно было бы избежать, воспользовавшись иными конструкциями МПП-кодов.
 9. В тексте работы присутствуют многочисленные опечатки и неудачные выражения, например:
 - «Эффективные коды ... не всегда допускают эффективное распараллеливание» (введение).
 - «коды, проверочные матрицы которых построены конструктивно» (п. 1.1)
 - «мы абстрагируемся от того, что отдельные мягкие значения являются вектор-столбцами и будем рассматривать их как мягкие значения» (п. 1.6.3)
 - Из формулы (3.1) с учетом обратимости матрицы H_0 следует, что матрица C , задающая кодовое слово, всегда равна 0.

Апробация результатов

Основные результаты диссертации достаточно полно опубликованы в научной периодике. Автор имеет 6 публикаций, в т. ч. 1 статью в «Journal of Communications Technology and Electronics», 2 статьи в сборниках трудов конференций «IEEE International Symposium on Information Theory» и «Problems of Redundancy in Information and Control

³ Johannes Maucher, Victor V. Zyablov, and Martin Bossert. On the Equivalence of Generalized Concatenated Codes and Generalized Error Location Codes. *IEEE Transactions on Information Theory*.— 2000.— February.— Vol. 46, no. 2.— Pp. 642–649.

⁴ U. Wachsmann, R. F. H. Fischer, J. B. Huber. Multilevel codes: Theoretical concepts and practical design rules. *IEEE Transactions on Information Theory*.— 1999.— July.— Vol. 45, no. 5.— Pp. 1361–1391.

Systems». Все вышеперечисленные издания индексируются системой Scopus. Результаты диссертации были доложены на семинаре СПбПУ по теории кодирования.

Заключение

Считаем, что диссертационная работа Жилина И.В. является законченной научно-квалификационной работой, в которой автором решены актуальные задачи разработки и анализа алгоритмов декодирования МПП- и ОЛО-кодов, поэтому работа удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, предъявляемых к кандидатским диссертациям по специальности 05.13.17 – теоретические основы информатики. Автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей СПбПУ «30» октября 2015 года, протокол № 3.

18.11.2015

Доцент кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Тел. (812)2971639

e-mail: petert@dcn.icc.spbstu.ru

кандидат технических наук, доцент

