

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

По диссертационной работе на тему "РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ  
ДЕКОДИРОВАНИЯ МПП- И ОЛО-КОДОВ, ДОПУСКАЮЩИХ  
РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ И КОНВЕЙЕРИЗАЦИЮ",

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук  
ЖИЛИНЫМ ИГОРЕМ ВИТАЛЬЕВИЧЕМ по специальности 05.13.17 –  
«Теоретические основы информатики»

### **Актуальность темы диссертации**

Представленная на соискание ученой степени диссертация посвящена вопросам анализа эффективности декодирования корректирующих кодов, применяющихся в современных стандартах передачи данных или являющихся потенциальными кандидатами для стандартов нового поколения. Учитывая растущие требования, предъявляемые как скоростям обработки данных в системах связи, так и к надежности передачи, а именно, обеспечение вероятности ошибки на уровне  $10^{-15}$ , тема диссертации, несомненно, является актуальной.

### **Содержание диссертации**

Автор анализирует два класса кодов: коды с малой плотностью проверок на четность (МПП) и обобщенные каскадные коды с локализацией ошибок (ОЛО).

В главе 1 сравниваются алгоритмы декодирования для подкласса МПП кодов, основанных на циклическом замыкании сверточных кодах с единичной памятью. В этой же главе предложен метод векторизации итеративного алгоритма "распространения доверия" для двоичных МПП кодов. Предложенный алгоритм позволяет использовать векторные процессоры, что приводит к возможности распараллеливания и конвейеризации декодирования как при моделировании, так и при построении устройств.

Глава 2 посвящена анализу алгоритмов декодирования в  $q$ -ичном канале без памяти для двух подклассов обобщенных каскадных кодов: ОЛО-кодов с компонентными кодами с квадратичным расширением алфавита и ОЛО-кодов с компонентными кодами над одним алфавитом. Предложена методика оптимизации параметров ОЛО-кода, гарантирующая вероятность неправильного декодирования кодового слова, не превышающую заданной величины, при заданной входной вероятности ошибки на символ. Предложенные методы оптимизации структуры кода позволили обеспечить вероятность неправильного декодирования порядка  $10^{-15}$  при входной вероятности ошибки на символ порядка  $10^{-2}$  при введении относительно небольшой избыточности, составляющей менее 20%.

В главе 3 рассматривается проблема мягкого декодирования ОЛО-кодов. Предложено несколько конструкций ОЛО-кодов, для которых предложены алгоритмы мягкого декодирования. В частности, построены ОЛО-коды с использованием внешних МПП-кодов и разработан алгоритм мягкого декодирования для этого типа кодов. Предложенные алгоритм оптимизации структуры ОЛО-кода и декодер с мягким решением обеспечивают совокупный энергетический выигрыш по отношению к жёсткому решению, возрастающий при увеличении избыточности кода и достигающий 6 дБ.

В качестве основного научного и практического результата диссертации следует отметить выбор структуры и оптимизацию ОЛО-кода на основе верхних границ вероятности ошибки, что позволило предложить конкурентоспособный вариант построения системы связи для каналов с высоким отношением сигнал-шум и гарантированной вероятностью неправильного декодирования менее  $10^{-15}$ .

Новыми результатами работы являются:

- оптимизация параметров ОЛО кодов с использованием аналитически выведенных границ вероятностей ошибок на отдельных этапах декодирования;
- увеличение скорости декодирования за счет распараллеливания и конвейеризации;
- построение конкурентоспособной конструкции кода, доказуемо достигающей сверхвысокой надежности передачи информации при низкой сложности декодирования.

### **Достоверность и новизна результатов исследования**

Достоверность результатов не вызывает сомнений, поскольку они математически доказаны с применением математического аппарата комбинаторики, алгебры и теории вероятностей. Результаты подкреплены компьютерным моделированием.

### **Замечания по работе**

К недостаткам диссертационной работы следует отнести следующее:

1. В разделе 1.2.3 рассматриваются недвоичные МПП коды над полем  $GF(q), q = p^m, p \geq 2$  - простое число. Утверждается, что для хранения проверочной матрицы квазициклического регулярного  $(l, n_0)$ -МПП кода над этим полем достаточно  $ln_0(m \log_2 q + \log_2 m)$  бит, а в общем случае для хранения проверочной матрицы МПП кода над этим полем требуется  $mln_0(\log_2 q + \log_2 m)$  бит, что обеспечивает  $m$ -кратную экономию памяти.

Однако, из формул следует, что в обоих случаях основной член пропорционален  $\ln_0 m^2$ , а разница проявляется только в величине второго слагаемого, имеющего меньший порядок по  $m$ .

2. В разделе 1.3.4 в предложении после формулы (1.8) непонятно, что означает выражение «мягкий минимум».
3. В разделе 1.4.3 указано, что при сравнении алгоритмов декодирования МПП кодов выполнялось моделирование с числом экспериментов  $2 \cdot 10^4$  кодовых слов. Результаты сравнивались при вероятности ошибки на бит  $10^{-5}$ . Остается непонятным, до какого числа ошибочных событий проводилось моделирование для каждого значения сигнал-шум.
4. В разделе 1.5 изучается подкласс квазициклических МПП кодов – МПП коды с единичной памятью (ЕП МПП коды). В этом разделе представлены только результаты моделирования ЕП МПП кода длины 2032 со скоростью 0.5 для трех предлагаемых алгоритмов декодирования, но отсутствует сравнение этих результатов с характеристиками МПП кодов с теми же параметрами из современных стандартов, например, стандарта WIMAX.
5. В главе 2 рассматривается подкласс обобщенных каскадных кодов – обобщенные коды с локализацией ошибок, которые эффективны в каналах с малым числом ошибок, а именно, когда большинство столбцов принятого слова не содержит ошибок. Автор неоднократно утверждает, что “в дискретном симметричном канале без памяти для выполнения этого требования требуется иметь, по возможности, более короткие внутренние коды”. Однако, это утверждение не подкреплено анализом вероятности неправильного декодирования, а только косвенно подтверждается примером. С другой стороны, интуитивно понятно, что длина внутреннего кода не может быть выбрана  $n_A = 1$  и, по-видимому, существует оптимальное значение.
6. В главе 2 приведены зависимости верхней границы вероятности ошибочного декодирования от входной вероятности ошибки на символ. Однако, в тексте отсутствуют формулы для вычисления вероятности ошибки на символ в зависимости от параметров какой-либо модели физического канала.
7. Описание конструкции равнопольных ОЛО кодов, так же, как и процедуры их кодирования содержит много общего с описанием и процедурой кодирования нормальных ОЛО кодов. Соответствующие описания следовало бы сократить, выделив в них общие функции.
8. В разделе 2.4.4 корректность сравнения (18396,16408) ОЛО-кода с в 2 раза более коротким (9200, 8192) БЧХ кодом вызывает сомнения. Также осталось

неясным, каким образом вычислялась входная вероятность ошибки на символ.

9. В разделе 3.2.1 формула (3.3) вместо  $\theta$  должно быть  $S$ .
10. На Рис. 3.3 и 3.4 сравнивается вероятность ошибки на бит и блок для различных алгоритмов мягкого декодирования для ОЛО кода с длиной 3000 и скоростью  $1/2$ . В качестве примера для сравнения можно взять результаты моделирования МПП кода длины 2048 со скоростью  $1/2$  из работы G. Liva, S. Song, L. Lan, Y. Zhang, W. Ryan, and S. Lin, "Design of LDPC codes: A survey and new results," *J. Comm. Software Syst.*, vol. 2, no. 3, pp. 191–211, Sep. 2006. В этой работе вероятность ошибки на бит (блок) составляет порядка  $10^{-8}$  ( $10^{-6}$ ) при отношении сигнал-шум на бит порядка 2.5 дБ, что значительно лучше, чем для лучшего из предложенных алгоритмов декодирования рассматриваемой конструкции с внешними МПП кодами. Интересным представляется объективное сравнение с учетом сложности алгоритмов.
11. Неточным представляется рассуждение по поводу сложности решетки линейного  $q$ -го блочного кода на стр. 92. Известно, что минимальная решетка линейного блочного кода с числом информационных и проверочных символов  $k$  и  $r$ , соответственно, единственна и что число ее состояний не превышает  $\exp_q\{\min\{k, r\}\}$ , независимо от того, в порождающем или проверочном пространстве она была построена.
12. Выбор конкурирующих вариантов МПП кодов на Рис. 3.13 является неудачным, так как не отражает последних достижений в области построения МПП кодов.
13. В тексте диссертации и автореферата содержится значительное количество опечаток.

### **Апробация результатов**

Основные результаты диссертации опубликованы в 6 печатных работах и получили широкую апробацию, в том числе докладывались на конференции IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT 2015), представляющей собой ведущую международную конференцию в области теории информации и помехоустойчивого кодирования. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

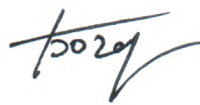
### **Заключение**

Отмеченные недостатки не препятствуют общей положительной оценке диссертационной работы Жилина И. В., в которой решена актуальная научная задача разработки и исследования декодеров ОЛО- и МПП-кодов, допускающих распараллеливание и конвейеризацию, имеющая существенное значение для

развития сетей передачи данных следующего поколения. Содержание диссертации в полной мере соответствует области исследования «Разработка методов обеспечения высоконадежной обработки информации и обеспечения помехоустойчивости информационных коммуникаций для целей передачи, хранения и защиты информации» специальности 05.13.17 «Теоретические основы информатики» по техническим наукам.

На основании вышеизложенного можно заключить, что диссертация Жилина Игоря Витальевича на тему «Разработка и анализ алгоритмов декодирования МПП- и ОЛЮ-кодов, допускающих распараллеливание и конвейеризацию» является законченной научно-квалификационной работой и удовлетворяет критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 по специальности 05.13.17 – «Теоретические основы информатики». Автор работы Жилин Игорь Витальевич заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности.

Доцент кафедры информационных систем  
ИТМО, кандидат технических наук, доцент



Бочарова И.Е.

E-mail: irina.bocharova@eit.lth.se  
Тел. +7(812)-372-16-30.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»  
Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49,

17. 11. 2015



Ирина Бочарова И.Е.