

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.077.05

на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем передачи информации им. А. А. Харкевича Российской академии наук по диссертации на соискание учёной степени кандидата наук

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета

от «14» декабря 2015 года, протокол № 8

о присуждении Жилину Игорю Витальевичу учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Разработка и анализ алгоритмов декодирования МПП- и ОЛО-кодов, допускающих распараллеливание и конвейеризацию» (кодов с малой плотностью проверок и обобщённых кодов с локализацией ошибок) по специальности 05.13.17 – теоретические основы информатики технические науки, принята к защите 7 октября 2015 года, протокол № 3, диссертационным советом Д 002.077.05 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем передачи информации им. А. А. Харкевича Российской академии наук (127051, Москва, Б. Каретный пер., 19, строение 1, приказ о создании диссертационного совета от «10» июля 2015 года № 784/нк).

Соискатель Жилин Игорь Витальевич, гражданин Российской Федерации 1989 года рождения, в 2012 году окончил с отличием Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)», с 29.06.2012-28.06.2015 обучался в аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем передачи информации им. А. А. Харкевича Российской академии наук, работает младшим научным сотрудником Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем передачи информации им. А. А. Харкевича Российской академии наук.

Диссертация выполнена в секторе № 3.2 — Прикладные проблемы теории кодирования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем передачи информации им. А. А. Харкевича Российской академии наук.

Научный руководитель — доктор технических наук Зяблов Виктор Васильевич, заведующий лабораторией № 3 «Информационные технологии передачи, анализа и защиты информации» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. Федоренко Сергей Валентинович, гражданин РФ, доктор технических наук, доцент, профессор Кафедры безопасности информационных систем Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»;
2. Бочарова Ирина Евгеньевна, гражданка РФ, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация — Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», в своём *положительном* заключении, подписанном кандидатом технических наук, доцентом, Петром Владимировичем Трифоновым, доцентом кафедры распределённых вычислений и компьютерных сетей и утверждённом доктором технических наук Остапенко Олегом Николаевичем, проректором по научной работе,

указала, что предлагаемые в работе новые подходы к построению кодов и их декодирования могут быть применены разработчиками перспективных систем хранения и передачи информации. Основные результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы также в учебном процессе и для разработки помехоустойчивого кодирования в таких организациях, как ИППИ РАН, СибГУТИ, НГУ, ГУАП, СПб Политехнический университет, МГУ, МФТИ, МИЭТ. Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры распределённых вычислений и компьютерных сетей Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого «30» октября 2015 года, протокол №3.

Соискатель имеет 17 опубликованных работ, из них 6 по теме диссертации, общим объёмом 49 страниц, в том числе 2 в научных журналах, включенных в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций, и 4 работы в материалах всероссийских и международных конференций и симпозиумов. Основные положения диссертации полностью соответствуют опубликованным ранее статьям. В совместных публикациях научному руководителю В.В. Зяблову принадлежат постановки задач и указания основных направлений исследований, другим соавторам — консультации при написании работы, а основные результаты, выкладки и численные расчёты выполнены диссертантом.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Igor Zhilin, Victor Zyablov, «LDPC Code Construction as a Generalized Concatenated Code», proceedings of the XIV International Symposium «Problems of Redundancy in Information and Control Systems», 2014, pp. 107—110, ISBN 978-1-4799-4896-3. DOI: 10.1109/RED.2014.7016716
2. V. Zhilin, A. A. Kreshchuk, and V. V. Zyablov, «Generalized Error-Locating Codes and Minimization of Redundancy for Specified Input and Output Error Probabilities», Journal of Communications Technology and Electronics, 2015, Vol. 60, No. 6, pp. 695–706, ISSN 1064-2269. DOI: 10.1134/S1064226915060212

3. Igor Zhilin, Pavel Rybin, Victor Zyablov, «High-Rate Codes for High-Reliability Data Transmission», Proc. IEEE International Symposium on Information Theory 2015, Hong Kong, China, pp. 256–260, ISBN: 978-1-4673-7703-4.

На диссертацию и автореферат поступило 7 отзывов, включая отзывы ведущей организации и официальных оппонентов. *Все отзывы положительные.* В отзывах указывается, что диссертационная работа написана на высоком научном уровне, содержит достаточную научную новизну, теоретическую и практическую ценность, и соответствует специальности 05.13.17 – Теоретические основы информатики. В целом диссертация удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, предъявляемых к кандидатским диссертациям по специальности 05.13.17 – теоретические основы информатики.

В отзыве ведущей организации имеются следующие замечания: 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. 2) В работе не рассматривалось сопоставление предлагаемых методов построения ОЛО-кодов с известными методами построения многоуровневых (обобщённых 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 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. 5) К сожалению, в работе не рассматривается сравнение кодов, построенных с помощью предложенного автором метода, и кодов, получаемых с помощью, например, правила равной вероятности ошибки для случая многоуровневых кодов. 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 решётка 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. Указанные недостатки не повлияли на общую положительную оценку диссертационной работы.

В отзыве официального оппонента Федоренко Сергея Валентиновича в качестве замечаний отмечено, что: 1) Основным недостатком диссертационной работы является отсутствие сравнения результатов, полученных автором, с известными результатами. 2) В результатах моделирования часто отсутствуют параметры рассматриваемых кодов. 3) Отсутствует сравнение сложности мягких и их алгоритмов декодирования. 4) Результаты моделирования (рис. 3.8 и 3.9) показывают практическое совпадение этих результатов для мягких и жёстких алгоритмов декодирования при больших скоростях (область применимости обобщённых кодов с локализацией ошибок), что вызывает сомнения в целесообразности применения мягких алгоритмов декодирования обобщённых кодов с локализацией ошибок.

В отзыве официального оппонента Бочаровой Ирины Евгеньевны указаны следующие замечания:

1) В разделе 1.2.3 утверждается, что для хранения проверочной матрицы квазициклического регулярного (l, n_0) -МПП кода над полем $GF(q)$ 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 остаётся непонятным, до какого числа ошибочных событий проводилось моделирование для каждого значения сигнал-шум. 4) В разделе 1.5 представлены результаты моделирования ЕП МПП кода длины 2032 со скоростью 0.5 для трёх предлагаемых алгоритмов декодирования, но

отсутствует сравнение этих результатов с характеристиками МПП кодов с теми же параметрами из современных стандартов, например, стандарта WIMAX. 5) Утверждение “в дискретном симметричном канале без памяти для выполнения этого требования требуется иметь, по возможности, более короткие внутренние коды” не подкреплено анализом вероятности неправильного декодирования, а только косвенно подтверждается примером. 6) В тексте отсутствуют формулы для вычисления вероятности ошибки на символ в зависимости от параметров какой-либо модели физического канала. 7) Описания конструкций равнопольных и нормальных ОЛО кодов и процедуры их кодирования 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 **0** должно быть **S**. 10) На Рис. 3.3 и 3.4 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 решётки линейного q-ичного блочного кода на стр. 92. 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. В отзыве указано, что отмеченные недостатки не препятствуют общей положительной оценке диссертационной работы.

В отзыве на автореферат **Крейнделина Виталия Борисовича**, доктора технических наук, профессора, заместителя начальника управления государственных услуг в сфере связи Федерального агентства связи, указаны

следующие замечания: 1) Не приведены в явном виде оценки сложности рассматриваемых алгоритмов декодирования. 2) Не ясно значение фразы «сравнение быстродействия на устройствах целиком». 3) Отсутствует легенда на рис. 3. 4) В автореферате присутствуют опечатки.

В отзыве на автореферат **Юрасовой Людмилы Валентиновны**, кандидата технических наук, доцента, заместителя президента Некоммерческого партнерства «Содействие развитию и использованию навигационных технологий», указаны следующие замечания: 1) В работе не приведено подробного сравнительного анализа производительности предложенных кодов и алгоритмов декодирования с кодами, применяемыми в существующих системах связи. 2) В работе присутствуют отдельные опечатки и неудачно сформулированные фразы.

В отзыве на автореферат **Габидулина Эрнста Мухамедовича**, доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой радиотехники Московского физико-технического института, указаны следующие недостатки: 1) Не указано, для каких каналов приведены результаты на рис. 2–9. 2) Неудачно длинное название и имеющиеся опечатки в тексте автореферата. 3) Часто используемое слово «эффективность» определено лишь в конце материала.

В отзыве на автореферат **Кондрашова Константина Александровича**, кандидата технических наук, разработчика ООО «Яндекс» сделаны следующие замечания: 1) Не прояснена связь степени распараллеливания m и кратности ускорения вычислений векторизованного алгоритма распространения доверия. 2) Не ясна причина выбора ji индексов в обозначении матрицы \mathbf{R}_{ji} по сравнению с общепринятым \mathbf{R}_{ij} . 3) В тексте автореферата присутствуют опечатки.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что:

Федоренко С. В. является крупным специалистом в области помехоустойчивого кодирования, включая алгебраическую и комбинаторную теорию кодирования, алгоритмы декодирования, а также преобразование Фурье над конечным полем.

Бочарова И. Е. является крупным специалистом в области кодов, исправляющих ошибки, включая свёрточные коды и коды с малой плотностью проверок.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», выполняет фундаментальные и прикладные исследования в области кодов, исправляющих ошибки, включая полярные коды, коды с малой плотностью проверок и вопросы декодирования кодов Рида-Соломона.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

предложен метод векторизации недвоичного алгоритма «распространения доверия» для недвоичных МПП-кодов, который позволяет использовать векторные процессоры, что приводит к возможности распараллеливания и конвейеризации декодирования как при моделировании, так и при построении устройств;

разработан метод применения алгоритма "распространения доверия", имеющего мягкий вход, для каналов с жёстким решением, дающий выигрыш около 1.1 дБ по сравнению с алгоритмами с жёстким входом;

разработаны программы расчёта верхней и нижней границ вероятности неправильного декодирования заданной конструкции ОЛО-кода, позволяющие оценивать эти вероятности до малых значений (до 10^{-15} и менее) без проведения ресурсоёмкого моделирования;

разработаны метод выбора структуры обобщённых кодов с локализацией ошибок и реализующая его программа, которые позволяют максимизировать скорость кода при фиксированной вероятности ошибки декодирования и заданной входной вероятности ошибки на символ;

предложена конструкция ОЛО-кодов с расширенными кодами БЧХ в качестве внутренних кодов, которая может быть использована при разработке систем кодирования для каналов с малой долей ошибок и высокими требованиями к пропускной способности, например, для волоконно-оптических линий связи и устройств хранения данных;

разработаны алгоритм декодирования ОЛО-кодов с мягким входом и алгоритм оптимизации структуры ОЛО-кода для этого алгоритма, что позволяет при использовании ОЛО-кодов в зашумлённом канале получить по отношению к жёсткому решению выигрыш, достигающий нескольких децибел.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

применительно к проблематике диссертации результативно использованы методы теории вероятностей и линейной алгебры;

доказаны границы (верхняя и нижняя) вероятности неправильного декодирования ОЛО-кодов, основанных на кодах Рида-Соломона как с одинаковым алфавитом, так и в случае, когда мощность алфавита внешних кодов является квадратом мощности алфавита внутренних кодов;

построены ОЛО-коды с использованием внешних МПП-кодов и разработан алгоритм мягкого декодирования для этого типа кодов;

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

– **планируется использовать** алгоритмы и методы выбора параметров ОЛО-кодов, а также их программные реализации, в АО «Российские космические системы» для создания бортовой и наземной аппаратуры высокоскоростных q-ичных радиолиний с ОЛО-кодами, построенными на базе кодов Рида-Соломона, так как они позволяют повысить полосовую и энергетическую эффективность радиолиний по сравнению с ранее известными;

– **использованы:**

- способ векторизации алгоритма «распространения доверия» для МПП-кодов,
- сравнение различных алгоритмов декодирования МПП-кодов с единичной памятью с циклическим замыканием,
- ОЛО-коды с использованием коротких двоичных кодов в качестве внутренних и МПП-кодов в качестве внешних

— в рамках выполнения НИР по программе фундаментальных исследований Президиума РАН «Проблемы создания национальной научной распределённой информационно-вычислительной среды на основе GRID технологий и современных телекоммуникационных сетей» в ИППИ РАН.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- достоверность результатов обоснована применением известных математических методов, в частности, математического аппарата комбинаторики, алгебры и теории вероятностей, а также подтверждением результатов с помощью современных средств имитационного моделирования,
- достоверность полученных верхних и нижних границ вероятности неправильного декодирования подтверждается совпадением этих границ с предельными случаями, когда один из компонентных кодов является тривиальным,
- достоверность положений и выводов подтверждается апробацией работы на ведущих российских и международных конференциях, а также их публикацией в рецензируемых журналах,
- выводы диссертации обоснованы и не вызывают сомнения и согласуются с современными представлениями о характеристиках конструкций МПП- и ОЛО-кодов.

Личный вклад соискателя состоит в самостоятельной разработке всех основных научных положений и выводов, составляющих содержание диссертации, разработке программной реализации предложенных алгоритмов, проведении имитационного моделирования. Теоретические и практические исследования, а также вытекающие из них выводы и рекомендации проведены и получены соискателем лично.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования, непротиворечивой методологической платформы, основной идейной линии, концептуальности и взаимосвязи выводов. По своему содержанию диссертация отвечает паспорту специальности 05.13.17 — Теоретические основы информатики (п. 11. Разработка методов обеспечения высоконадежной обработки информации и обеспечения помехоустойчивости информационных коммуникаций для целей передачи, хранения и защиты информации; разработка основ теории надежности и безопасности использования информационных технологий).

Диссертационный совет пришёл к выводу, что диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная задача разработки декодеров кодов с малой плотностью проверок и обобщённых кодов с локализацией ошибок, допускающих распараллеливание и конвейеризацию, и исследования реализуемых ими корректирующих свойств, имеющая существенное значение для развития сетей передачи данных следующего поколения.

По актуальности, новизне, практической значимости диссертация соответствует требованиям, установленным «Положением о порядке присуждения учёных степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2014 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук.

На заседании 14 декабря 2015 года диссертационный совет принял решение присудить Жилину Игорю Витальевичу учёную степень кандидата технических наук по специальности 05.13.17 – теоретические основы информатики.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 25 человек, из них 6 докторов наук по специальности и отрасли наук рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 35 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение учёной степени – 25, против присуждения учёной степени – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета Д 002.077.05

Кулешов А.П.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 002.077.05

Цитович И.И.

14 декабря 2015 г.

