

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.105.02,
созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Юго-Западный государственный университет»
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, по диссертации
на соискание ученой степени кандидата наук**

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от «5» июля 2022 г. № 13

О присуждении Усатюку Василию Станиславовичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Метод, аппаратно-ориентированный алгоритм и специализированное устройство для построения низкоплотностных кодов архивной голографической памяти» по специальности 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления принята к защите 4 мая 2022 (протокол заседания № 10) диссертационным советом Д 212.105.02, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Юго-Западный государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (305000, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94) приказом №717/нк от 09 ноября 2012 года.

Соискатель Усатюк Василий Станиславович, 23.06.1985 года рождения. В 2009 году соискатель окончил государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Братский государственный университет» по направлению подготовки «Математика с дополнительной специальностью Информатика», в 2018 г. окончил заочную аспирантуру при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Юго-Западный государственный университет», в настоящее время работает старшим научным сотрудником кафедры информационной безопасности в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Юго-Западный государственный университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре вычислительной техники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Юго-Западный государственный университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель - Егоров Сергей Иванович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет», кафедра вычислительной техники, профессор кафедры.

Официальные оппоненты:

Назаров Лев Евгеньевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Фрязинский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт радиотехники и электроники им В.А. Котельникова» Российской академии наук, лаборатория инструментальных и информационных методов исследования окружающей среды средствами дистанционного зондирования, главный научный сотрудник;

Мартышкин Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный технологический университет», кафедра программирования, заведующий кафедрой
дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» (г. Рязань), в своем положительном отзыве, подписанном **Овечкиным Геннадием Владимировичем**, доктором технических наук, заведующим кафедрой вычислительной и прикладной математики, утвержденном проректором по науке и инновациям **Гусевым Сергеем Игоревичем**, доктором технических наук, профессором, указала, что

- комбинация метода построения низкоплотностных кодов для архивной голографической памяти, аппаратно-ориентированного алгоритма и специализированного устройства поиска кратчайшего вектора в решетке позволила построить новый низкоплотностный код для архивной голографической памяти, декодер которого обеспечивает повышение надежности воспроизведения информации от 8,9 раз при отношении сигнал-шум 1,1 дБ по сравнению с F-LDPC кодом, предложенным компанией TrellisWare для голографической архивной памяти;

- разработанные метод, аппаратно-ориентированный алгоритм и специализированное устройство для построения низкоплотностных кодов архивной голографической памяти могут найти свое применение при создании новых контроллеров архивной голографической памяти с повышенной надежностью хранения информации, а также в аппаратных средствах коррекции ошибок для беспроводной связи (Wi-Fi, 6G) и оптических каналов передачи данных.

- диссертация отвечает требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» и соответствует паспорту научной специальности 05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления», а ее автор, Усатюк В.С., заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Соискатель имеет 29 опубликованных работ, общим объемом 7 печатных листов, в том числе по теме диссертации опубликованы 29 научных работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликованы 5 (2,26 п.л., авторский вклад 80%), 8 работ в журналах, индексируемых в международной наукометрической базе Scopus (2,31 п.л., авторский вклад 65%). Соискателем опубликованы 13 работ в материалах Международных, Всероссийских и региональных конференциях (2,43 п.л., авторский вклад 90%), получено три Международных патента на изобретения. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Усатюк, В.С. Устройство для оценки кодового расстояния линейного блочного кода методом геометрии чисел. [Текст] / В.С. Усатюк, С. И. Егоров // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. - 2017. - № 4 (25). - С. 24-33.

2. Usatyuk V., I. Vorobyev, "Simulated Annealing Method for Construction of High-Girth QC-LDPC Codes," Int. Conf. on Telecom. and Signa Proc. (TSP), 2018, pp. 1-5.

3. Усатюк, В.С. Реализация параллельных алгоритмов ортогонализации в задаче поиска кратчайшего базиса целочисленной решетки. [Текст] / Усатюк В.С. // Прикладная дискретная математика. Приложение. –2012. – № 5. – С. 120-122.

4. Усатюк, В.С. Вероятностный метод определения кодового расстояния линейного блочного кода. [Текст] / Усатюк В.С. // III International Conference «Engineering & Telecommunication En&T 2016». November 29-30, 2016. Book of Abstracts. – Moscow – Dolgoprudny: MIPT, 2016. С. 43-46

5. Усатюк, В.С. Построение квазициклических недвоичных низкоплотностных кодов на основе совместной оценки их дистантных свойств и спектров связности. [Текст] / В.С. Усатюк, С. И. Егоров // Телекоммуникации. – 2016. - №8. - С. 32-40

На диссертацию и автореферат поступило 7 положительных отзывов из организаций: **Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН**, подписан доктором физико-математических наук, профессором, главным научным сотрудником Лаборатории № 16 «Динамики нелинейных процессов управления им. Е.С. Пятницкого» Рапопортом Львом Борисовичем (Замечания: 1) Автор использует технику вложения Каннана (Kannan embedding techniques) для поиска кодового расстояния двоичного линейного блочного кода, путем вложения порождающей матрицы кода в геометрическую решетку и поиска кратчайшего вектора в ней. Остается открытым вопрос приложения этого метода для поиска кодового расстояния недвоичных помехоустойчивых кодов; 2) Автором был предложен метод имитации отжига для квазициклического расширения базовых матриц, продемонстрировавший увеличение на порядок вероятности успешного расширения, по сравнению с ранее предложенными методами. Метод отжига применительно к таким задачам слабо приспособлен к распараллеливанию); **Института проблем проектирования в микроэлектронике РАН**, подписан доктором технических наук, главным научным сотрудником Джиганом Виктором Ивановичем (Замечания: 1) Не указаны методы цифровой обработки сигналов, позволяющие перейти от нелинейной модели канала архивной голографической памяти к АБГШ-каналу; 2) В качестве входных параметров при построении низкоплотного кода автором не используется минимальная требуемая пропускная способность декодера и его аппаратная сложность. Использование этих входных параметров при построении помехоустойчивых кодов повысило бы практическую значимость предложенного метода); **Курского государственного университета**, подписан Макаровым Константином Сергеевичем, кандидатом технических наук, исполняющим обязанности заведующего кафедрой программного обеспечения и администрирования информационных систем (Замечания: 1) В автореферате не хватает оценки фактора увеличения скорости (эффективности) поиска треппин-сетов, с которой статистика метода выборки по значимости достигнет такой же точности, как и статистика оценки «полки», полученная методом имитационного моделирования; 2) в автореферате для оценки штрафной функции решается задача построения ковариационной матрицы нелинейной системы мягкого декодера низкоплотных кодов при помощи метода «Эволюции Ковариации». Большой интерес имеет возможность его статистической линеаризации на основе модели броуновского движения с параметризацией (например, параболическим дрейфом, квадратичным сдвигом) относительно решения, полученного методом «Эволюции плотностей» при помощи функции Эйри (Airy function)); **Поволжского государственного университета сервиса**, подписан Воловачем Владимиром Ивановичем, доктором технических наук, доцентом, заведующим кафедрой информационного и электронного сервиса (Замечания: 1) В автореферате имеют место пунктуационные, грамматические ошибки и погрешности. В частности: - страница 4, первый абзац содержит лишние запятые; - страница 6, первый абзац в разделе «СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ» - написано «диссертационный работы» вместо «диссертационной работы»; 2) В автореферате отсутствует сравнение аппаратной сложности декодера для предложенного автором низкоплотного кода с декодером F-LDPC низкоплотного кода компании TrellisWare); **Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых**, подписан Самойловым Александром Георгиевичем, доктором технических наук, профессором, заместителем директора по научной работе Института информационных технологий и радиоэлектроники (Замечания: 1) Из автореферата следует, что повышение эффективности исправления ошибок низкоплотными кодами ограничено типовой моделью канала с гауссовым шумом. Имело смысл рассмотреть и каналы с замираниями при различных законах распределения их вероятностей; 2) В автореферате не затронут вопрос совместной оптимизации построения низкоплотного

кода при мягком декодировании, что дало бы возможность ослабить требования к спектру связности низкоплотного кода); **Ярославского государственного университета им. П. Г. Демидова**, подписан **Муриным Дмитрием Михайловичем**, кандидатом физико-математических наук, директором института информационной безопасности, доцентом кафедры компьютерной безопасности и математических методов обработки информации (Замечания: 1) При исследовании преимущества от повышения надежности воспроизведения информации в голографической памяти для различных значений отношения сигнал-шум целесообразно провести исследование преимущества в виде уменьшения избыточности в хранимых данных при фиксированной надежности их воспроизведения; 2) При исследовании преимущества от повышения надежности воспроизведения информации в голографической памяти на отдельном секторе размером 32 000 бит представляет интерес оценка Q-фактора (уменьшения вероятности битовой ошибки на выходе по сравнению с входной битовой ошибкой) для оценки совокупного повышения надежности голографической памяти; 3) В работах Александра Сергеевича Рыбакова 2021 года были получены оценки длин ненулевых кратчайших векторов некоторых решеток. Представляет интерес исследование применимости используемой в этих работах техники для задач оценки кодового расстояния низкоплотного кода; 4) На наш взгляд, в автореферате мало внимания уделено вероятностным алгоритмам решения поставленных задач, в том числе и предложенным автором работы. Целесообразно провести сравнительный обзор существующих и предложенных автором вероятностных алгоритмов; 5) При оформлении рекомендуем использовать русскую нотацию, в частности отделять дробную часть десятичной дроби запятой, а не точкой, во избежание недоразумений); АО «**Российский Сельскохозяйственный банк**», подписан **Анзиным Максимом Михайловичем**, кандидатом физико-математических наук, главным специалистом отдела онлайн-систем управления автоматизации операций с платежными картами Департамента платежных технологий и дистанционных каналов (Замечания: 1) Предложенную методику построения кодов имеет смысл распространить и на сильноплотные коды; 2) Имеется ряд однотипных замечаний по оформлению текста. Все они относятся к несоблюдению требований ГОСТ, предъявляемых к оформлению научно-технических документов. Например, рисунок 2 «Аппаратно-ориентированный алгоритм поиска кратчайшего вектора в решетке» (стр. 15), расположен «на боку», что не соответствует ГОСТ, его следует повернуть на 90 градусов по часовой стрелке).

На все поступившие замечания соискателем даны исчерпывающие ответы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью и научными достижениями в области синтеза устройств коррекции ошибок, проектирования и применения помехоустойчивых кодов в технических средствах хранения информации, знаниями и практическим опытом разработки низкоплотных кодов, параллельных алгоритмов оценки их характеристик, наличием публикаций за последние пять лет в ведущих рецензируемых научных изданиях по тематике создания специализированных устройств построения, кодирования и декодирования низкоплотных кодов и их функциональных узлов, что позволило им определить научную и практическую ценность диссертации.

Ведущая организация широко известна научной деятельностью в Российской Федерации, специализирующейся на исследовании и проектировании цифровых вычислительных устройств, систем контроля и управления. Выбор ведущей организации обоснован высокой квалификацией сотрудников в сфере, связанной с разработкой контролеров накопителей информации и систем управления, их проектирования, практическому применению и оценки производительности. Официальные оппоненты не имеют совместных проектов и совместных публикаций с соискателем. Ведущая организация не имеет договорных отношений с соискателем.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны:

- метод построения низкоплотных кодов, состоящий из двух фаз построения и расширения протографа, отличающийся комбинированием «жадного» алгоритма запрещенных коэффициентов и стохастического алгоритма отжига, позволяющих улучшить дистантные свойства кодов и их спектры связности для фильтрации кодов кандидатов, обеспечивающий повышение надежности считывания информации в голографической памяти, величина которого определяется отношением вероятности ошибки на бит низкоплотного кода F-LDPC к вероятности ошибки на бит предложенного решения;

- метод оценки кодового расстояния, основанный на вложении кода в решетку, отличающийся применением для поиска кратчайших векторов параллельным перебором линейных комбинаций базисных векторов решетки, а также применением на этапе ортогонализации параллельных методов QR-разложения матриц, применением метода ветвей и границ в скользящем окне по подрешеткам m -размерности, позволяющий ускорить вычисление кодового расстояния;

- аппаратно-ориентированный алгоритм поиска кратчайшего вектора в решетке, отличающийся этапом распараллеливания вычисления координатных компонент с использованием зигзагообразного обхода Шнора элементов решетки, позволяющий оперативно получить необходимые индексы и кратчайший вектор нахождения кодового расстояния;

- специализированное устройство поиска кратчайшего вектора в решетке, необходимое для построения квазициклического низкоплотного кода, включающее операции модификации координатных компонентов вектора и блоков вычисления частичных сумм совместно с блоком модификации/вычисления приращений координат и их границ, отличающееся использованием регистровых стеков и параллельным выполнением мультипликативных операций в одном временном интервале, позволяющее в подрешетке m -размерности сократить количество DSP-процессоров в устройстве;

предложен принцип совместной оптимизации спектра связности и кодового расстояния низкоплотных кодов, основанный на комбинации методов статистической физики и комбинаторно алгебраических методов, в частности методов геометрии чисел;

доказана перспективность использования разработанного специализированного устройства поиска кратчайшего вектора в решетке, необходимого для построения квазициклического низкоплотного кода, позволившая повысить надежность архивной голографической памяти за счет снижения времени оценки кодового расстояния низкоплотных кодов;

введены новые аппаратно-ориентированные правила оценки дистантных свойств низкоплотных кодов, что позволило с приемлемой сложностью реализовать специализированное устройство на ПЛИС, необходимое для построения низкоплотных кодов, предназначенных для повышения надежности хранения информации контроллерами архивной голографической памяти.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

представлены и обоснованы: ранее не используемая оценка параметров необходимых для вложения низкоплотного кода в геометрическую решетку; асимптотическая оценка улучшения спектров связности (структуры циклов) для методов расширения базовой матрицы квазициклического кода;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы методы теории информации и кодирования, геометрии чисел, прикладной теории цифровых автоматов,

программирования, схемотехнического проектирования, теории графов, теории динамических систем, теория проектирования ЭВМ;

изложены особенности функционирования методов, аппаратно-ориентированного алгоритма и специализированного устройства, осуществляющего построение низкоплотных кодов, заключающиеся во введении оригинальных методов расширения базовой матрицы низкоплотных кодов и оценивания дистантных свойств кода и спектра связности его Таннер-графа;

раскрыто противоречие между необходимостью повышения надежности чтения в накопителях голографической памяти данных и отсутствием методов построения низкоплотных кодов с необходимыми дистантными свойствами с использованием аппаратно-ориентированных алгоритмов и специализированных устройств;

изучены методы и алгоритмы построения низкоплотных кодов контроллеров архивной голографической памяти.

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

разработаны и внедрены в ООО «Техкомпания Хуавей» (Московский филиал центра исследований и разработок) метод вычисления кодового расстояния, аппаратно-ориентированный алгоритм и специализированное устройство для построения низкоплотных кодов. Результаты диссертационной работы используются на кафедре вычислительной техники ЮЗГУ при преподавании дисциплин: «Схемотехника (элементная база перспективных ЭВМ)» по направлению подготовки 09.04.01, «Защита информации» по направлению подготовки 09.03.01 в части создания аппаратных средств кодирования, что подтверждается соответствующими актами;

определены перспективы практического использования предложенного метода, аппаратно-ориентированного алгоритма и специализированного устройства для построения низкоплотных кодов контроллеров голографической памяти, применяемых в составе оборудования систем хранения данных, что позволит повысить надежность хранения информации контроллерами архивной голографической памяти;

представлена структурно-функциональная организация специализированного устройства поиска кратчайшего вектора в решетке, необходимого для построения квазициклического низкоплотного кода, позволяющая при реализации на ПЛИС сократить количество DSP процессоров в 4 раза в подрешетки 512-размерности.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

теория построена на известных, проверяемых данных и фактах, все теоретические результаты согласуются с опубликованными экспериментальными данными и результатами практического внедрения созданного метода, аппаратно-ориентированного алгоритма и специализированного устройства для построения низкоплотных кодов архивной голографической памяти;

идея базируется на анализе структур циклов в графе Таннера в процессе итеративного декодирования низкоплотных кодов, оценке дистантных свойств низкоплотных кодов методами геометрии чисел;

использовано сравнение авторских данных, относящихся к аппаратным особенностям, полученных при разработке специализированного устройства поиска кратчайшего вектора в решетке, необходимого для построения квазициклического низкоплотного кода, и данных, полученных ранее по рассматриваемой тематике;

установлено, что повышение надежности архивной голографической памяти, величина которого определяется отношением вероятности ошибки на бит низкоплотного кода F-LDPC к вероятности ошибки на бит предложенного решения, зависит от весового спектра и спектра трешпин-сетов низкоплотных кодов, что

согласуется с теоретической оценкой при помощи неравенства Буля, метода выборки по значимости и «Эволюции Ковариации».

Личный вклад соискателя состоит в разработке: метода построения низкоплотных кодов для архивной голографической памяти, заключающегося в выборе протографа и его квазициклического расширения, метода оценки кодового расстояния при помощи вложения кода в решетку, параллельной ортогонализации базиса решетки, параллельного поиска кратчайшего вектора в решетке; аппаратно-ориентированного алгоритма с распараллеливанием вычисления координатных компонент с использованием зигзагообразного обхода Шнора элементов решетки; специализированного устройства, необходимого для построения квазициклического низкоплотного кода, отличающегося использованием регистровых стеков и параллельным выполнением мультипликативных операции в одном временном интервале.

Результаты работы могут быть использованы в составе систем хранения данных, системах передачи данных, по оптическому и радиоканалу: АО «НПП «Рубин»» (г. Пенза), ООО «Т8» (г. Москва), АО «НПП «Квант»» (г. Москва), ФГБОУ ВО РГРТУ (г. Рязань), ООО «Булат» (г. Курск), АО «Концерн «Автоматика»» (г. Москва).

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1. Не рассматривалась возможность использования нескольких специализированных устройств поиска кратчайшего вектора в подрешетке для ускорения построения низкоплотного кода.

2. Отсутствует сравнение аппаратной сложности декодера, предложенного автором низкоплотного кода, с декодером F-LDPC кода.

Соискатель Усатюк В.С. исчерпывающе ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и критические замечания:

1. Исследование возможно, но требует наличие отладочной платы с несколькими ПЛИС.

2. Аппаратная сложность декодера F-LDPC кода сопоставима с предложенными техническими решениями, так как метод декодирования и параметры декодера соответствуют применяемым в стандарте архивной голографической памяти.

На заседании 05.07.2022 г. диссертационный совет принял решение: за успешное решение научно-технической задачи по разработке метода, аппаратно-ориентированного алгоритма и специализированного устройства для построения низкоплотных кодов архивной голографической памяти, позволяющих повысить надежность чтения архивной голографической памяти, имеющей значение для улучшения качественных характеристик контроллеров архивной голографической памяти, присудить Усатюку Василию Станиславовичу ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 7 докторов наук по специальности 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за - 15, против - 0.

Председатель
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сизов Александр Семенович

Титенко Евгений Анатольевич

«05» июля 2022 г.