

## **Отзыв официального оппонента**

кандидата технических наук, доцента, Мартышкина Алексея Ивановича, заведующего кафедрой «Программирование» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» на диссертационную работу Усатюка Василия Станиславовича «Метод, аппаратно-ориентированный алгоритм и специализированное устройство для построения низкоплотностных кодов архивной голографической памяти», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления» в диссертационный совет Д 212.105.02, при ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

### **1. Актуальность темы диссертационного исследования**

Задача повышения надежности хранения информации при помощи коррекции ошибок помехоустойчивыми кодами в различных каналах хранения информации является актуальной на протяжении многих лет, отсчет которых можно начать с фундаментальной работы Клода Шеннона по Теории Информации. Значительные успехи в решении этой задачи были получены на основе использования низкоплотностных (LDPC) кодов с мягкими решениями из демодулятора при помощи декодеров, основанных на методе распространения доверия (Belief Propagation).

Диссертационное исследование В.С. Усатюка вносит вклад в решении этой задачи в частном случае коррекции ошибок для канала воспроизведения носителя архивной голографической памяти ЭВМ. В диссертации для этого предлагаются новый метод, аппаратно-ориентированный алгоритм и специализированное устройство построения низкоплотностных кодов.

Таким образом, представленные в исследовании метод, аппаратно-ориентированный алгоритм и специализированное устройство для построения низкоплотностных кодов архивной голографической памяти являются актуальными, поэтому тема диссертационной работы Усатюка Василия Станиславовича является актуальной.

### **2. Новые научные результаты диссертации**

Полученные в диссертации результаты образуют научную новизну работы. В качестве научных результатов следует отметить следующие:

1. Метод построения низкоплотностных 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.

2. 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 нахождение кодового расстояния.

3. 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.

4. Специализированное устройство поиска кратчайшего вектора в решетке, включающее операции модификации координатных компонент вектора и блоков вычисления частичных сумм совместно с блоком модификации/вычисления приращений координат и его 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.

### **3. Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций**

Выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе, в достаточной мере обоснованы корректным применением методов алгебры и комбинаторики, теории вероятности, теории графов, теории помехоустойчивого кодирования, теории проектирования ЭВМ, Разработанные теоретические положения подтверждаются результатами экспериментальных исследований и их сравнением с данными по выбранным аналогам, обсуждением результатов на всероссийских, международных и зарубежных конференциях, получением патентов на изобретения.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждаются:

- отсутствием противоречий с известными научными положениями;
- доказательством корректности математических результатов;
- сравнением результатов, полученных в диссертации, с известными результатами;
- положительными рецензиями, полученными при соответствующих публикациях в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для публикации основных результатов диссертаций;
- результатами практической апробации, обсуждением результатов исследований на международных и всероссийских научных конференциях.

Диссертационная работа прошла апробацию на 11 Международных и 5 Всероссийских научно-технических конференциях. По теме представленной диссертации опубликовано 29 научных работ, в их числе 5 статей в научных рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, 8 работ проиндексированы в международной базе Scopus. Оригинальность технических решений, предложенных автором, подтверждена тремя Международными патентами на изобретения.

#### **4. Оценка изложения материала диссертации и автореферата**

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 147 наименований и 5 приложений. Объем работы составляет 160 страниц и включает 60 рисунков, 12 таблиц и 5 приложений.

**Во введении** обосновывается актуальность исследования и формулируются: противоречие, которое ложится в основу научно-технической задачи, цель исследования и список задач, которые необходимо решить для достижения поставленной цели. Здесь же приводятся научная новизна исследования и положения, выносимые на защиту.

**Первый раздел** посвящен анализу существующих методов и алгоритмов построения низкоплотностных кодов для коррекции ошибок в голографической памяти ЭВМ. Дано описание двух классов методов: основанных на аппарате статистической физики и комбинаторно-алгебраических методах. Недостатком методов статистической физики является отсутствие учета дистантных свойств кодов конечной длины и их спектров связности. Недостатками комбинаторно-алгебраических методов являются ограниченный набор параметров низкоплотностных кодов (длина, скорость кода, обхват и диаметр графа, и прочие параметры), для которых осуществимо построение кодов, и необходимость построения маски для получения нерегулярных низкоплотностных кодов.

Обозначены два ключевых этапа построения низкоплотностных кодов: построение базовой матрицы (протографа) и ее расширение квазициклическими матрицами – циркулянтами.

**Второй раздел** посвящен разработке метода построения низкоплотностных кодов для архивной голографической памяти.

Предложенный метод использует метод статистической физики «Эволюция плотностей» для получения начального распределения весов строк и столбцов в проверочной матрице. Затем на основе использования метода статистической физики Protograph Exit-chart (PEXIT-chart) осуществляется выбор базовой матрицы (протографа) с наилучшим порогом декодирования из соображений бесконечной длины кода, шаги 1-2.

На третьем шаге осуществляется оценка возможности получения требуемой вероятности ошибки в соответствие с верхней оценкой кодового расстояния по базовой матрице. Для этого применяется неравенство Буля для оценки вероятности ошибки на бит. Верхняя оценка кодового расстояния получается по методу Маккея-Вонтобеля-Смарандаши-Батлера-Сигеля по базовой матрице, соответствующей протографу низкоплотностного кода. Таким образом выбирается протограф с наилучшим порогом итеративного декодирования, характеризующим эффективность низкоплотностного кода в области «водопада» кривой помехоустойчивого кодирования.

На четвертом шаге осуществляется уменьшение размера циркулянта с соответствующим увеличением размера базовой матрицы (протографа) с целью получения требуемых дистантных свойств, если требуемая вероятность ошибки на бит недостижима или полученный порог итеративного декодирования на шаге 2 больше требуемого.

В результате шагов 1-4 получена базовая матрица для последующего квазициклического расширения на шагах 5-9.

На 5 шаге осуществляется расширение полученной базовой матрицы методом запрещенных коэффициентов.

На 6 шаге уточняется кодовое расстояние.

На шаге 7 для поиска треппин-сетов предложено использовать метод Коула. Взвешивание треппин-сета для оценки вероятности ошибки на бит осуществляется в соответствии с линейной моделью Шлегеля-Занга.

На 8 шаге осуществляется оценка штрафной функции от порога итеративного декодирования, обусловленной линейного размера треппин-сетом, при помощи метода «Эволюции Ковариации».

На шаге 9 используется предложенный автором диссертации алгоритм имитации отжига для квазициклического расширения базовой матрицы с целью улучшения спектра связности. С помощью этого алгоритма удалось уменьшить минимальные значения циркулянтов в базовой матрице регулярного кода (уменьшение минимального значения требуемого циркулянта позволяет улучшить помехоустойчивость кода) и на порядок повысить вероятность успешного расширения базовой матрицы. Приведено сравнение предложенного алгоритма расширения с другими алгоритмами квазициклического расширения базовых матриц (протографов), предложенный метод превзошел все ранее известные алгоритмы: Guest-and-Test, улучшенный PEG, Hill-climbing.

На 10 шаге метод завершается и возвращает накопленные коды кандидаты.

Повышение надежности низкоплотностных кодов в канале архивной голографической памяти требует улучшение дистантных свойств кода. Вычислительная сложность расчета кодового расстояния известными методами на 6 шаге растет экспоненциально от информационной длины кода. В связи с чем в диссертации был разработан более быстродействующий метод вычисления кодового расстояния.

**В третьем разделе** приводится разработанный автором метод оценки кодового расстояния линейных блочных кодов. Метод основан на вложении Каннана низкоплотностного кода в геометрическую решетку, с последующим приведением базиса решетки методом Коркина А. Н. и Золотарева Е. И. или субоптимальным блочным методом Шнора-Охнера. В топологии такой класс вложений, осуществляющей уменьшение кривизны пространства, известен как абелизация.

Автором предложены следующие модификации метода оценки кодового расстояния:

- Применение параллельных методов QR-разложения: поворота Гивенса в случае выполнения на видеокартах (NVIDIA CUDA), преобразования Хаусхолдера (Intel MKL, AMD CML).
- Декомпозиция метода ветвей и границ с целью параллельного вычисления координатных компонент в методе поиска кратчайшего вектора Каннана-Финке-Поста (КФП).

Поскольку для метода КФП характерен рост требуемой точности вычислений от однократной точности (float, 32 бита) до 4 кратной точности (128 бит, два double 64 бит) и выше, вызывающий рост сложности вычислений, вводится ограничение на размер подблока в плавающем окне, проходящем по базису подрешетки. Для быстрого отсека веток

применяется зигзагообразный обход координатных компонент. Для начального отсечения веток применяется ранее рассчитанная верхняя оценка кодового расстояния.

Предложенные параллельные модификации обеспечивают уменьшение времени оценки кодового расстояния от 3 до 10 раз.

Для дальнейшего ускорения оценки дистантных свойств низкоплотных кодов, применяемых в голографической памяти, разработаны аппаратно-ориентированный алгоритм и специализированное устройство поиска кратчайшего вектора в решетке (подрешетке).

**Четвертый раздел** посвящен разработке аппаратно-ориентированного алгоритма и специализированного устройства поиска кратчайшего вектора в решетке (подрешетке).

Для чего были осуществлены аппаратно-ориентированные модификации алгоритма поиска кратчайшего вектора в решетке:

- Параллельное выполнение наиболее вычислительно затратных мультипликативных операций, обеспечивших ускорение алгоритма минимум в 1,5 раза.
- Ограничение размера подрешеток, сокративших количество требуемых DSP процессоров в 4 раза.

Предложенный аппаратно-ориентированный алгоритм был реализован в специализированном устройстве поиска кратчайшего вектора в решетке.

Специализированное устройство содержит интерфейс с шиной PCI-E хост-компьютера, блок управления, блок вычисления частичных сумм, блок вычисления проекций коэффициентов Грама-Шмидта на координаты и блок модификации координат. Особенностью устройства является использование регистровых стеков и параллельное выполнение мультипликативных операций в одном временном интервале.

Устройство было синтезировано в САПР Vivado v2016.3 (64-bit) на ПЛИС Virtex 7 Ultrascale (xc7vx485tffg1930-2L) с тактовой частотой 213 МГц.

Сложность устройства при размерности подрешетки 512 составила 1,9 миллиона вентилей.

Предложенный метод, аппаратно-ориентированный алгоритм и специализированное устройство обеспечили построение низкоплотного кода со скоростью 0.5 длиной  $N=32000$  для канала воспроизведения архивной голографической памяти, применение которого в декодере обеспечило повышение надежности воспроизведения информации от 8,9 раз при отношении сигнал-шум 1.1 дБ в сравнение с F-LDPC кодом, рекомендованным стандартом HVD.

Заключение диссертации содержит основные результаты и выводы по диссертационной работе

В приложении приведены: проверочная матрица построенного низкоплотного кода для архивной голографической памяти, акты о внедрении, расширенные протографы из примеров, список ссылок на открытый репозиторий Github, содержащий исполняемые и исходные файлы метода, результат применения предложенного автором метода поиска кратчайшего вектора на конкурсе по Геометрии Чисел технического университета г. Дармштадта.

Работа выполнена на хорошем научном уровне, достаточном для кандидатских диссертаций, и оформлена в соответствии с требованиями, предъявляемыми ВАК Минобрнауки России.

Краткое содержание глав диссертационной работы, основные выводы и результаты представлены в автореферате диссертации, содержание которого соответствует содержанию диссертации.

Текст диссертации изложен профессиональным языком, теоретические и практические результаты обоснованы. По отдельным главам и по работе в целом приведены соответствующие выводы, отражающие полученные научные и практические результаты. Диссертационная работа хорошо структурирована, использованные термины корректно отображают область исследований. Использованные в диссертации публикации сторонних авторов приведены в списке литературы, все ссылки по тексту диссертационной работы сделаны корректно.

### **5. Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Результаты диссертационной работы соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности 05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»: 3. «Разработка принципиально новых методов анализа и синтеза элементов и устройств вычислительной техники и систем управления с целью улучшения их технических характеристик», в части синтеза специализированного устройства поиска кратчайшего пути, необходимого для построения низкоплотного кода, позволяющего в подрешетке  $m$ -размерности сократить количество DSP процессоров в устройстве. 4. «Разработка научных подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих надежность, контроль и диагностику функционирования элементов и устройств вычислительной техники и систем управления», в части создания метода и аппаратно-ориентированного алгоритма построения низкоплотного кода, позволяющего повысить надежность воспроизведения данных голографической памяти ЭВМ.

### **6. Практическая значимость и внедрение результатов работы**

Свидетельством практической ценности работы служат акты внедрения, указывающие на использование результатов работы в ООО «Техкомпания Хуавей» и в учебном процессе на кафедре вычислительной техники ЮЗГУ при преподавании дисциплин: «Защита информации» по направлению подготовки 09.03.01, «Схемотехника (элементная база перспективных ЭВМ)» по направлению подготовки 09.04.01.

Результаты, представленные в работе, могут найти применение при разработке новых контроллеров архивной голографической памяти, а также могут быть использованы при разработке систем помехоустойчивого кодирования для спутниковой связи, радиорелейной связи, беспроводной связи, оптических каналов передачи данных.

## **7. Замечания по диссертационной работе:**

1. В диссертационной работе не приведено значение совокупного повышения надежности архивной голографической памяти с учетом всех последующих уровней (глав, книг и онтологий), использующих внешние коды Рида-Соломона, коды проверки на четность, перемежитель.

2. На шаге 7 метода построения низкоплотностного кода применяется метод выборки по значимости Коула для поиска треппин-сетов. Поиск треппин-сетов осуществим так же методами линейного программирования Степанова-Черткова, Веласкеса-Субрамани. Однако сравнение этих методов с используемым методом Коула в диссертации не приведено.

3. Используемый в третьем разделе метод оценки кодового расстояния Брауэра-Циммермана осуществлен при помощи алгебраического пакета Magma версии 2.20.09, выпущенного 5 сентября 2014. При наличии возможности приобретения алгебраического пакета лучше осуществить сравнение с использованием последней его версии 2.25-5 от 29 апреля 2020 с видеокарты, поддерживающей NVIDIA CUDA.

4. В диссертации не рассматривается возможность использования нескольких специализированных устройств поиска кратчайшего вектора в подрешетке для ускорения построения низкоплотностного кода.

5. Предложенное специализированное устройство поиска кратчайшего вектора в решетке выполняет аппаратное ускорение метода ветвей и границ. Интересным вопросом является возможность его применение при решении рюкзаковых задач и задач линейного программирования

6. Судя по автореферату и диссертации, в работе не приведена перспективная оценка технико-экономической эффективности предложенных научно-технических решений.

7. По тексту диссертации и автореферата имеют место стилистические неточности, грамматические ошибки и погрешности.

Отмеченные замечания не носят принципиального характера, не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования, не снижают значимость проведенной работы, не влияют на теоретические и практические результаты диссертационного исследования и не ставят под сомнение достоверность полученных выводов и результатов.

## **8. Заключение по работе**

Диссертация Усатюка Василия Станиславовича является завершённой научно-квалификационной работой, содержащей ряд новых научных результатов, и выполнена на высоком для кандидатских диссертаций научно-техническом уровне. Рукопись оформлена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к диссертациям. Она написана достаточно правильным научно-техническим языком. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. Совокупность результатов, полученных автором лично, позволяет квалифицировать работу как кандидатскую диссертацию

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления», содержит новые научные и практические результаты в области решения важной научно-технической задачи разработки метода, аппаратно-

ориентированного алгоритма и специализированного устройства для построения низкоплотностных кодов для декодеров, обеспечивающих повышение надежности чтения в архивной голографической памяти, и отвечает требованиям к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленных п.9 действующего «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842. Автор диссертационной работы Усатюк Василий Станиславович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления».

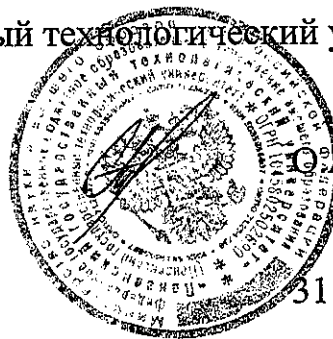
**Официальный оппонент:**

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Программирование»  
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный  
технологический университет»



А.И. Мартышкин

Подпись Мартышкина А.И. заверяю  
Ученый секретарь Ученого совета  
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»  
кандидат педагогических наук, доцент



О.А. Петрунина

31 мая 2022 г.

Мартышкин Алексей Иванович,  
ФГБОУ ВО, «Пензенский государственный технологический университет»  
Кафедра «Программирование»  
Почтовый адрес (рабочий): 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ ул. Гагарина,  
д. 1а/11  
Телефон: +7 (8412) 49-54-41  
Сайт организации: <http://www.penzgtu.ru>  
e-mail: [rector@penzgtu.ru](mailto:rector@penzgtu.ru)  
Кандидатская диссертация защищена в 2013 году по специальности 05.13.18  
– Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.