

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и инновациям
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет



им. В.Ф. Уткина» доктор технических наук

С.И. Гусев

2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Усатюка Василия Станиславовича

«Метод, аппаратно-ориентированный алгоритм и специализированное устройство для построения низкоплотных 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»

Актуальность работы. Диссертационная работа посвящена решению актуальной проблемы – повышению надёжности хранения информации на носителях архивной голографической памяти ЭВМ. Особенностью канала считывания информации голографического носителя является группирование ошибок и высокий уровень вероятности ошибки на бит на входе до $5 \cdot 10^{-2}$. Тогда как современные требования к надёжности считывания архивной голографической памяти определяют вероятности ошибки на бит на порядки ниже. Для достижения такой надёжности ошибки, возникающие при хранении и считывании данных в голографической памяти, исправляют с помощью кодов с низкой плотностью проверок по четности (низкоплотных кодов). Используемые в настоящее время программные реализации методов и алгоритмов построения низкоплотных кодов имеют большую вычислительную сложность и недостаточную производительность, в них слабо учитываются комбинаторно-алгебраические свойства графа Таннера и дистантные свойства кода, что приводит к появлению треппин-сетов и

кодовых слов малого веса, отрицательно влияющих на корректирующую способность кодов.

В процессе исследования была поставлена и решена **научно-техническая задача** разработки методов, аппаратно-ориентированного алгоритма и специализированного устройства для построения низкоплотностных кодов для декодеров, обеспечивающих повышение надежности чтения в архивной голографической памяти.

Целью диссертационной работы является повышение надежности воспроизведения информации в накопителях архивной голографической памяти за счет понижения вероятности ошибки на бит в области рабочих значений диапазона отношений сигнал-шум устройствами коррекции ошибок, применяющих низкоплотные коды с повышенной корректирующей способностью.

Новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. В диссертационной работе получены следующие результаты, удовлетворяющие критериям научной новизны:

– разработан метод построения низкоплотностных кодов, состоящий из 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;

– разработан метод оценки кодового расстояния, основанный на вложение кода в решетку, отличающийся применением для поиска кратчайших векторов параллельным перебором линейных комбинаций базисных векторов решётки, 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;

– разработан 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;

– разработано 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.

Оценка содержания диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и приложений. Работа содержит 160 страниц текста (с учетом приложений) и иллюстрируется 60 рисунками и 12 таблицами; список литературы включает 147 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, определяется область исследований, цель и задачи, научная новизна и практическая значимость работы. Изложены основные положения, выносимые на защиту, приводится информация об апробации и общей структуре диссертации.

Первый раздел содержит анализ существующих методов и алгоритмов построения низкоплотностных кодов применительно к архивной голографической памяти ЭВМ.

Во втором разделе основное внимание уделяется созданию метода построения низкоплотностных кодов для архивной голографической памяти.

Метод включает 10 этапов. На этапах с первого по четвертый осуществляется поиск базовой матрицы с минимальным порогом

итеративного декодирования, потенциально обеспечивающий достижение требуемой вероятности ошибки на бит.

На этапах 5-10 выполняется квазициклическое расширение базовой матрицы и оценка ее графовых (спектра связности, спектра треппин-сетов) и кодовых свойств (кодového расстояния, кратности слов наименьшего веса Хэмминга). Также осуществляется оценка вклада треппин-сетов и слов минимального веса кода кандидата в вероятность ошибки на бит для конкретной проверочной матрицы.

В диссертации были предложены алгоритмы построения квазициклических кодов при помощи жадного метода запрещенных коэффициентов (Алгоритм А) и метода имитации отжига (алгоритм Б). Оригинальность Алгоритма Б в предлагаемом методе построения квазициклических низкоплотностных кодов заключается в пропуске значительного числа локальных минимумов числа треппин-сетов, что позволяет получить квазициклические коды с дистантными свойствами и спектром связности, не достижимыми предложенными ранее методами. Также Алгоритм Б обеспечивает на порядок более высокую вероятность успешного расширения протографов. Комбинирование этих алгоритмов в предложенном методе построения низкоплотностных кодов позволяет улучшить дистантные свойства кодов и их спектры связности, обеспечивая повышение надежности считывания информации в голографической памяти.

Третий раздел посвящен методу оценки кодového расстояния линейных блочных кодов. В разделе предложен быстродействующий метод оценки кодového расстояния, основанный на поиске кратчайшего вектора в решетке. В разделе при помощи вложения кода в решетку (абелизации) осуществляется оценка дистантных свойств кода в метрическом пространстве Хемминга при помощи евклидова пространства дискретных абелевых подгрупп методом Каннана-Финке-Поста (КФП). Для повышения быстродействия предложенного метода были применены параллельные методы:

– QR-разложения матриц: блочный метод Хаусхолдера при использовании многоядерных процессоров и метод поворота Гивенса при использовании видеокарт;

– параллельный перебор значений координатных компонент дерева КФП-метода на многоядерных процессорах общего назначения или процессорах видеокарт.

Четвертый раздел посвящен разработке аппаратно-ориентированного алгоритма и специализированного устройства поиска кратчайшего вектора в решетке (подрешетке). В нем осуществляется дальнейшее ускорение наиболее вычислительно затратной части метода оценки кодового расстояния – КФП метода.

В начале раздела приведен аппаратно-ориентированный алгоритм поиска кратчайшего вектора в решетке. Для осуществления ускорения поиска кодового расстояния было разработано специализированное устройство, реализующее этот алгоритм в виде ПЛИС, подключенной к интерфейсу PCI-E хост-компьютера.

Ключевыми особенностями разработанного устройства являются следующие. Управление механизмом накопления ошибки позволяет ограничить требуемую точность вычислений 32 битами, что приводит к уменьшению числа DSP блоков, используемых в ПЛИС для умножения. Параллельное выполнение всех мультипликативных операций, требующих наибольших временных затрат при аппаратной реализации, повышает быстродействие устройства не менее чем в 1,5 раза.

Специализированное устройство поиска кратчайшего вектора было синтезировано на ПЛИС, для него приведены оценки аппаратной сложности и быстродействия.

С использованием предложенного метода, аппаратно-ориентированного алгоритма и специализированного устройства был построен низкоплотностный код, позволивший значительно повысить надежность воспроизведения информации по сравнению с

низкоплотностным квазициклическим кодом, предложенным компанией TrellisWare для голографической архивной памяти.

В заключении приводятся основные результаты, достигнутые в процессе решения поставленной научно-технической задачи.

Диссертация написана технически-грамотным языком, обладает свойствами целостности и внутреннего единства. Качество оформления и содержимое диссертации соответствует требованиям, предъявляемым к работам на соискание ученой степени кандидата технических наук. Автореферат диссертации достаточно полно отражает ее содержание и соответствует требованиям п.25 «Положения о порядке присуждения ученых степеней».

Значимость полученных результатов диссертации для науки и производства соответствующей отрасли. Практическая значимость полученных результатов определяется тем, что разработанные метод, аппаратно-ориентированный алгоритм и специализированное устройство для построения низкоплотностных кодов архивной голографической памяти могут найти своё применение при создании новых контроллеров архивной голографической памяти с повышенной надежностью хранения информации, а также в средствах коррекции ошибок для беспроводной связи (WI-FI, 6G) и оптических каналов передачи данных.

Практическая ценность работы подтверждается актами внедрения результатов в ООО «Техкомпания Хуавей». Используемые результаты защищены компанией Huawei Technologies Co. тремя международными патентами. Результаты диссертационной работы используются 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. Внедрение подтверждается соответствующими актами.

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 значения сигнал-шум 1,1 дБ по сравнению с F-LDPC кодом, предложенным компанией TrellisWare для голографической архивной памяти. Созданный метод оценки кодового расстояния линейных блочных кодов позволил дать оценки расстояний для низкоплотностных кодов длиной 32000 бит, используемых в голографической памяти. Разработанное специализированное устройство поиска кратчайшего вектора в решетке обеспечивает выигрыш по быстродействию в сравнении с программной реализацией в 33,93 раза для подрешетки 512-размерности для низкоплотных кодов.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов диссертации. Обоснованность и достоверность результатов диссертации обеспечивается обоснованным и корректным применением положений и методов математического аппарата алгебры и комбинаторики, теории вероятности, теории графов, теории помехоустойчивого кодирования, теории проектирования ЭВМ, а также подтверждается совпадением теоретических выводов с результатами имитационного моделирования.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления», проблематика, рассмотренная в диссертации, соответствует пунктам 3, 4 паспорта специальности. 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 низкоплотностного 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 низкоплотностного кода, позволяющего повысить надежность воспроизведения данных голографической памяти ЭВМ.

По теме диссертации опубликованы 29 научных работ, в том числе 5 статей в научных рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, 8 работ проиндексированы в международной базе Scopus. Представленный список публикаций свидетельствует о том, что научные положения, выносимые на защиту, достаточно полно отражены в печатных работах. Оригинальность технических решений, предложенных автором, подтверждена тремя Международными патентами на изобретения.

Основные положения диссертационной работы были представлены и получили одобрение на 11 Международных и 5 Российских научно-технических конференциях.

Замечания по работе. К числу основных замечаний можно отнести следующие:

1. На шаге 7 метода построения низкоплотностного кода для оценки вероятности ошибки на бит при взвешивании треппин-сети применяется линейная модель Шлегеля-Занга. Она точно оценивает вероятность ошибки в случае, если дополнение подграфов треппин-сетов сильно связано с точки зрения спектра связности графа. В диссертации остался открытым вопрос, как строить низкоплотностные коды при помощи предложенной процедуры, чьи спектры связности ограничены малыми размерами циркулянта?

2. На шаге 7 для поиска треппин-сетов применяется метод выборки по значимости Коула. Оригинальный метод эффективен при поиске треппин-сетов низкоплотностных кодов, чьи длины не превосходят нескольких тысяч, а вес столбца сравнительно мал. Остается открытым вопрос как удалось применить метод Коула для больших длин кода?

3. В случае поиска треппин-сетов с размером подграфа, сравнимого с кодовым расстоянием, спектр связности в своих старших компонентах циклов содержит подграфы слов наименьшего веса (кодовые расстояния). В таких случаях можно бы отказаться от оценки дистантных свойств кода, оценивая только спектр треппин-сетов.

4. Представленные в работе результаты имитационного моделирования низкоплотностного кода получены без учета внешнего кода Рида-Соломона, соответственно полученные вероятности ошибки на бит не меньше 10^{-10} . Целесообразно осуществить имитационное моделирование коррекции ошибок совместно с внешним кодом Рида-Соломона.

5. Пространственный модулятор, применяемый в архивной голографической памяти, характеризуется ошибкой оценки отношения сигнал-шум, что приводит к смещенной оценке отношений правдоподобия, применяемых в декодере низкоплотностных кодов. На наш взгляд полезно оценить вклад несовершенства оценки сигнал-шум в надежность считывания голографической памяти.

Вместе с тем перечисленные замечания не снижают качества научной и значимости практической частей диссертационного исследования и не влияют на общую положительную оценку выполненной работы и полученных соискателем результатов.


Заключение. Диссертация Усатюка Василия Станиславовича на тему «Метод, аппаратно-ориентированный алгоритм и специализированное устройство для построения низкоплотностных кодов архивной голографической памяти» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена научная задача разработки метода, аппаратно-ориентированного алгоритма и специализированного устройства, позволяющих построить низкоплотностные коды, повышающие надежность чтения в архивной голографической памяти, имеющая существенное значение для развития производства устройств вычислительной техники и систем управления.

Диссертация выполнена автором самостоятельно на актуальную тему, обладает внутренним единством и содержит новые научные результаты, связанные с разработкой совокупности научно-обоснованных технических решений, позволяющих строить эффективные низкоплотностные коды для голографической памяти. Сформированные выводы достаточно обоснованы, основные полученные результаты в полной мере отражены в имеющихся авторских публикациях, в том числе в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

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.

Отзыв рассмотрен и одобрен на расширенном заседании кафедры вычислительной и прикладной математики. Присутствовали 25 человек. Результаты голосования: «за» - 25, «против» - нет, «воздержались» - нет. Протокол №9 от «30» мая 2022 года.

Зав. кафедрой вычислительной
и прикладной математики
д.т.н., доцент



Овечкин Геннадий Владимирович

Сведения о лице, подписавшем отзыв:

Овечкин Геннадий Владимирович

Шифр научной специальности, по которой защищена диссертация:
05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет
им. В.Ф. Уткина»

Заведующий кафедрой вычислительной и прикладной математики, д.т.н., доцент

E-mail: ovechkin.g.v@rsreu.ru

Тел.: (4912) 72-03-64

Адрес: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, ауд. 206.