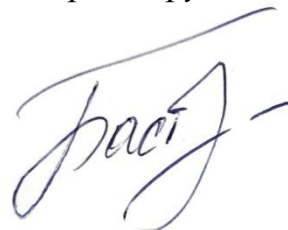


На правах рукописи



Бастрычкин Александр Сергеевич

**МЕТОД И АЛГОРИТМЫ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В БАЗИСЕ
ФУНКЦИЙ С ДВОИЧНОЙ АРИФМЕТИКОЙ**

Специальность

2.3.8. Информатика и информационные процессы
(технические науки)

АВТОРЕФРЕАТ

Диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Рязань 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» на кафедре «Электронные вычислительные машины».

Научный руководитель: **Гусев Сергей Игоревич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Космические технологии» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»

Официальные оппоненты: **Полушин Пётр Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Радиотехника и радиосистемы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Шлеймович Михаил Петрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой Автоматизированных систем обработки информации и управления Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный технологический университет» (г. Йошкар-Ола)

Защита состоится 22.12.2025 года в 13 ч 00 мин на заседании диссертационного совета 99.2.113.02 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1 (ауд.235).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, на сайте <http://rsreu.ru/> .

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, доцент



А.Н. Колесенков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Задачи передачи изображений по каналам связи требуют разработки специальных систем передачи данных, позволяющих быстро и достоверно транслировать информацию от передатчика к приёмнику.

Передача изображений по каналам связи является одной из самых сложных процедур в различных системах: дистанционного зондирования сред и поверхности Земли, технического зрения роботизированных комплексов, хранения и передачи наборов данных для обучения нейросетей. Особенный интерес и важность приобретает задача передачи изображений в бортовых информационных системах и комплексах, а также социализированных ЭВМ. Процедура передачи представляется сложной в том числе ввиду большого объема данных, передаваемого на пределе пропускной способности каналов связи. В связи с этим поиск простых и эффективных методов и алгоритмов уменьшения избыточности видеоданных до настоящего времени остается актуальной задачей. Разработка таких алгоритмов требует принятия во внимание особенностей продвижения строк и кадров изображений через каналобразующее оборудование.

Задачу сжатия изображений в общем виде можно представить как применение алгоритмов сжатия данных к изображениям, представленным в цифровом формате. В результате сжатия уменьшается количество данных, описывающих изображение, что уменьшает время передачи изображения и экономит пространство для хранения.

При сжатии изображений с потерями оказалось достаточно удобно работать с ортогональными преобразованиями, основанными на различных наборах базисных функций. Важным аспектом при выборе набора базисных функций является свойство делимости преобразований. Наличие подобного свойства позволяет разделить преобразование на два этапа: по строкам и по столбцам.

Самыми распространёнными на сегодняшний день являются следующие ортогональные преобразования: дискретное косинусное преобразование (ДКП), преобразование Уолша-Адамара (преобразование Уолша), преобразование Карунена — Лоэва, преобразование Фурье, некоторые виды вейвлет-преобразований.

Рассматриваемое в работе преобразование Уолша, основанное на функциях Уолша, реализуемых в двоичной арифметике, имеет ряд следующих особенностей:

- матрицы прямого и обратного преобразования полностью совпадают (свойство симметричности);
- базисные функции преобразования принимают значения «1» и «-1», соответственно, преобразование может быть реализовано с помощью операций сложения и вычитания целых чисел;
- самая энергетически затратная часть спектра — постоянная составляющая — может быть рассчитана на основе остальных значений спектра.

Эти и некоторые другие особенности преобразования Уолша делают его интересным для исследования на предмет применения в задачах сжатия и передачи изображений в системах, где важна простота архитектуры, а значит и надёжность передающего и каналообразующего оборудования.

В настоящее время в области сжатия изображений разработано множество подходов, каждый из которых имеет свои плюсы и минусы: методы эффективного энтропийного кодирования, кодирование с предсказанием и групповое кодирование изображений, методы блочного и фрактального кодирования, кратномасштабная обработка изображений. Однако ни один не дает полного и эффективного решения проблемы.

Так, методы, используемые в форматах сжатия без потерь (PNG, GIF, JPEG-LS) обладают наивысшим качеством восстановления, однако показатели степени сжатия таких форматов довольно низкие (до 3 раз).

Методы сжатия с потерями, основанные на ДКП (JPEG, WebP) и вейвлет-преобразованиях (JPEG2000) включают в себя вычислительно сложные операции: работу с числами с плавающей точкой, операции умножения и деления при реализации ортогональных преобразований, кодирование Хаффмана. Зачастую подобные форматы предполагают формирование и передачу большого объёма служебной информации, косвенно относящейся к информационной составляющей изображений, такой как словари и таблицы квантования.

Известно, что при выполнении процедуры обработки изображения выполнение перехода в спектральное пространство может занимать 75-80% от общего времени. Поэтому задача уменьшения времени выполнения преобразований является актуальной. Поскольку изображение определено на конечном значении своих номеров элементов строк и столбцов, имеет смысл рассмотреть в качестве базы спектрального анализа теорию дискретных сигналов, определенных на конечных интервалах, базисные функции которой также конечны.

Степень разработанности темы.

Широкое распространение в методах сжатия данных с потерями получило основанное на преобразовании Фурье дискретное косинусное преобразование (ДКП), разработанное Н. Ахмедом, Т. Натараджаном и К. Рао в 1974г.

Не менее популярны методы, применяющие вейвлет-преобразования, основы которых заложены в работах А. Хаара в начале XX века. Идеи получили развитие в 1980-х годах, особый вклад в развитие данного подхода внесли И. Добеши, С. Малла и другие.

Вопросы сжатия данных исследовали такие учёные как Д. Хаффман, А. Лемпель, Я. Зив, Т. Велч, Ф. Кац, Ю. Алакуйяла, Д. Сэломон и другие.

Методы цифровой обработки изображений изучены и систематизированно описаны в трудах таких учёных, как Р. Вудс, Р. Гонсалес Э. Претт, Д. Форсайт.

Следует также отметить вклад российских исследователей в сфере обработки изображений. Работы Алпатова Б.А., Визильтера Ю.В., Еремеева В.В., Желтова С.Ю., Злобина В.К. – создателя научной школы «Цифровая

обработка изображений», Сергеева В.В., Соифера В.А. оказывают существенное влияние на развитие данной области. Исследованию и сравнению алгоритмов сжатия видеоданных посвящено множество публикаций Лаборатории компьютерной графики и мультимедиа ВМК МГУ им. М.В. Ломоносова, В.П. Дворковича, А.В. Дворковича.

Также в качестве базиса, состоящего из ортогональных функций, в своих работах Трахтман А.М., Сюзев В.В., Костров Б.В. предлагают использовать функции Уолша. В традиционном понимании ортогональное преобразование применяют последовательно к строкам и столбцам изображения, что несет большие вычислительные затраты. Методология применения одностороннего (квазидвумерного) преобразования была предложена Костровым Б.В. Разработаны методы обработки изображений на основе перехода к квазидвумерному спектральному представлению.

Обзор публикаций по теме сжатия изображений показывает, что вектор современных исследований направлен на увеличение степени сжатия и качества восстановления изображений. Разработке алгоритмов, ориентированных на простоту и скорость преобразования, в настоящее время уделяется мало внимания, тогда как в системах обработки и передачи изображений такие алгоритмы нашли бы применение.

Анализ современного состояния проблематики сжатия изображений для их передачи по каналам связи позволяет сформулировать **научную задачу** повышения эффективности функционирования инфокоммуникационных систем за счёт разработки и исследования метода сжатия изображений в базисе функций с двоичной арифметикой и алгоритмов, его реализующих.

Целью данной работы является повышение эффективности передачи изображений по каналам связи за счёт разработки метода сжатия изображений в базисе функций с двоичной арифметикой, определённых на конечных интервалах, и алгоритмов его реализующих, позволяющих существенно снизить время передачи изображений и сократить объём передаваемой информации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- анализ возможности применения известных алгоритмов сжатия изображений в системах передачи информации, имеющих существенные ограничения вычислительных возможностей каналообразующего оборудования;
- исследование различных способов устранения информационной избыточности, основанных на свойствах функций с двоичной арифметикой для квазидвумерного спектрального представления изображений;
- разработка метода и алгоритмов сжатия изображений, представленных в квазидвумерном спектральном пространстве;
- экспериментальное исследование разработанного метода и алгоритмов.

Объект исследования – ортогональные преобразования, использующие функции с двоичной арифметикой, определённые на конечных интервалах.

Предмет исследования – возможности применения ортогональных преобразований на основе функций с двоичной арифметикой, определённых на конечных интервалах, в алгоритмах сжатия сигналов.

Научная новизна данной работы заключается в решении актуальной научной задачи повышения эффективности функционирования инфокоммуникационных систем при передаче изображений по каналам связи.

Предложен метод сжатия изображений, основанный на методологии перехода к квазидвумерному спектральному пространству ортогональных базисных функций с двоичной арифметикой, с сохранением постоянной составляющей, квантованием и энтропийным кодированием значений спектра и алгоритмы, его реализующие:

- алгоритм сжатия изображений в квазидвумерном спектральном пространстве с равномерным квантованием составляющих, обеспечивающий степень сжатия от 4 до 10 раз и позволяющий сократить время сжатия от 2 до 4 раз по сравнению с известными;

- алгоритм сжатия изображений в квазидвумерном спектральном пространстве с оптимальным квантованием составляющих, обеспечивающий лучшее качество и детализацию по сравнению с равномерным квантованием, позволяющий сократить время сжатия на 50-80% по сравнению с известными;

Предложен алгоритм сжатия изображения в квазидвумерном спектре с восстановлением постоянной составляющей и устранением высокочастотных составляющих, позволяющий сжать изображения в 4-8 раз и сократить время сжатия на 60-80% по сравнению с известными.

Все предложенные алгоритмы могут быть реализованы средствами целочисленной арифметики без использования операций умножения и деления.

Теоретическая значимость работы состоит в адаптации существующего математического аппарата теории дискретных сигналов, определённых на конечных интервалах, к области сжатия данных.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработаны и исследованы метод сжатия изображений и алгоритмы, его реализующие, созданы программные реализации разработанных алгоритмов, позволяющих повысить эффективность функционирования инфокоммуникационных систем при передаче изображений по каналам связи.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы дискретной математики, вычислительной математики, теории вероятностей и математической статистики, спектральные методы обработки двумерных массивов данных, а также методы секвентного анализа. Использована методология применения квазидвумерного преобразования к изображениям, представленным в виде двумерных массивов данных, а также методы сжатия данных.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод сжатия изображений в базисе функций с двоичной арифметикой, основанный на квазидвумерном спектральном представлении изображения, с

сохранением постоянной составляющей, квантованием и энтропийным кодированием значений спектра реализованный в виде следующих алгоритмов:

1.а Алгоритм сжатия изображений в квазидвумерном спектральном пространстве с равномерным квантованием составляющих, позволяющий сократить время обработки по сравнению с известными аналогами;

1.б Алгоритм сжатия изображений в квазидвумерном спектральном пространстве с оптимальным квантованием составляющих, обеспечивающий лучшее качество и детализацию по сравнению с равномерным квантованием, позволяющий значительно сократить время сжатия по сравнению с известными алгоритмами;;

2. Алгоритм сжатия изображения в квазидвумерном спектре с восстановлением постоянной составляющей и устранением высокочастотных составляющих, обеспечивающий высокую степень сжатия изображения при существенном сокращении время сжатия по сравнению с известными аналогами.

Соответствие паспорту специальности. Содержание работы соответствует паспорту специальности 2.3.8. «Информатика и информационные процессы» (технические науки) по следующим областям исследований:

п. 3 «Разработка методов и алгоритмов кодирования, сжатия и размещения информации для повышения эффективности и надежности функционирования инфокоммуникационных систем при её хранении и передаче»;

Личный вклад автора. Все выносимые на защиту результаты получены автором лично.

Реализация и внедрение результатов работы. Разработанные метод и алгоритмы внедрены в рамках учебного процесса в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина» в курсах «Теория информации», «Теория информации и цифровая обработка сигналов» которые изучаются в рамках направлений магистратуры 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника» и 02.04.03 «Математическое обеспечение и администрирование информационных систем».

Метод и алгоритмы, разработанные в ходе диссертационного исследования, внедрены в производственный процесс компании ООО «Квантрон Групп» в системе передачи изображений для обнаружения (детекции) продукции на инспекционном столе, а также в модуле хранения видеопотока кадров для расследования случаев, связанных с обнаружением остановок на линии.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских научно-технических конференциях:

1. Международной научно-технической и научно-методической конференции «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2016 (Рязань, 2016 г.);

2. Всероссийской научно-технической конференции "Интеллектуальные и информационные системы" ИНТЕЛЛЕКТ - 2016 (Тула, 2016 г.);

3. VI средиземноморской конференции по встроенным вычислениям, МЕСО 2017 (Черногория, г. Бар, 2017 г.);
4. II международной научно-технической и научно-методической конференции «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2017 (Рязань, 2017 г.);
5. VII международной научно-технической конференции "К.Э.ЦИОЛКОВСКИЙ - 160 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ. КОСМОНАВТИКА. РАДИОЭЛЕКТРОНИКА. ГЕОИНФОРМАТИКА (Рязань, 2018 г.);
6. VII средиземноморской конференции по встроенным вычислениям, МЕСО 2018 (Черногория, г. Будва, 2018 г.);
7. VIII средиземноморской конференции по встроенным вычислениям, МЕСО 2019 (Черногория, г. Будва, 2019 г.);
8. XI средиземноморской конференции по встроенным вычислениям, МЕСО 2020 (Черногория, г. Будва, 2020 г.);
9. XIII международной конференции по электротехнике и информационным технологиям «EЛЕКТРО 2020». (Италия, Таормин, 2020 г.);
10. X средиземноморской конференции по встроенным вычислениям, МЕСО 2021 (Черногория, г. Будва, 2021 г.);
11. IV международном научно-техническом форуме "СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ", СТНО 2021 (Рязань, 2021г);
12. V Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2022 (Рязань, 2022).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 12 статей, 4 из которых в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, 7 статей в рецензируемых изданиях, включённых в международную наукометрическую базу Scopus, 5 тезисов докладов в материалах международных и всероссийских конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка использованных источников. Основной текст работы содержит 130 страниц, 61 рисунок и 8 таблиц. Список использованных источников включает 101 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе содержится постановка задачи сжатия изображений. Выявлены основные характеристики современных алгоритмов сжатия с потерями: степень сжатия и качество восстановленных изображений. Такие характеристики, как затраты времени и памяти, а также сложность операций при разработке современных алгоритмов учитываются довольно редко. В то же время, развитие методов сжатия, направленных на работу в условиях существенных ограничений вычислительной мощности оборудования, может быть полезно при построении простых и надёжных систем передачи изображений.

Представлен обзор распространённых алгоритмов сжатия изображений с потерями: JPEG, JPEG2000, WebP. Произведён обзор их достоинств и недостатков.

Среди достоинств алгоритма JPEG выделяют его широкую распространённость и поддержку многими программами отображения, обработки и передачи изображений по сети Internet. Также к достоинствам относят сравнительно невысокую вычислительную сложность. Алгоритм JPEG был разработан специально для сжатия цифровых фотоснимков, и из-за этого сжатие снимков объектов физического мира осуществляется довольно качественно с точки зрения визуальной оценки восстановленных изображений. Также алгоритм JPEG обеспечивает достаточно высокую степень сжатия изображений (в 15-17 раз для полутоновых изображений при приемлемом качестве, СКО до 8).

Однако данный алгоритм имеет и ряд существенных недостатков. Во-первых, как и любой алгоритм сжатия с потерями, JPEG обладает артефактами сжатия: резкие изменения яркости на границах блоков, потеря мелких деталей и проявление блочной структуры при высокой степени сжатия.

В силу того, что JPEG использует алгоритм Хаффмана, он перенимает ряд недостатков такого способа кодирования. Во-первых, для восстановления содержимого сжатого сообщения декодер должен знать таблицу частот, которой пользовался кодер. Следовательно, длина сжатого сообщения увеличивается на длину таблицы частот, которая должна посылаться впереди данных. Кроме того, необходимость наличия полной частотной статистики перед началом собственно кодирования требует двух проходов по сообщению: одного для построения модели сообщения (таблицы частот и H-дерева), другого для собственно кодирования. Во-вторых, избыточность кодирования обращается в ноль лишь в тех случаях, когда вероятности кодируемых символов являются обратными степенями числа 2.

Помимо хранения 4-х таблиц кодирования Хаффмана формат также предполагает хранение таблиц квантования. В общем случае таблицы для различных цветовых компонент будут различным, что также негативно сказывается на результирующей степени сжатия.

В дополнение к перечисленным недостаткам, хранение служебной информации, а также хранение данных о составляющих в виде дельта-кодов и кодированных длин серий может привести к существенной потере качества или даже невозможности восстановить изображение при передаче по каналу с шумами. Например, изображение практически невозможно восстановить, если ошибки будут в таблице кодов Хаффмана или в первом значении низкочастотной составляющей. Результат восстановления изображения после передачи по каналу связи с помехами изображён на рисунке 1

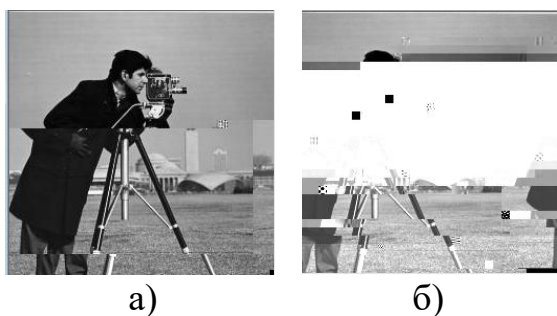


Рисунок 1 – Результат восстановления изображения в формате JPEG при моделировании передачи по каналу связи с помехами

а) Вероятность ошибки 0.00005, б) Вероятность ошибки 0.0005

Также следует отметить, что в основе алгоритма JPEG лежит двумерное ДКП, выполнение которого выполняется в два этапа, а операции производятся над числами с плавающей точкой, в ходе вычисления участвуют операции умножения; все эти особенности делают ДКП малоприменимым в задачах, где вычислительные устройства на передающей стороне должны обладать простыми архитектурами и минимальными энергетическими затратами.

Среди достоинств алгоритма JPEG2000 выделяют высокую степень сжатия при хорошем качестве изображения, возможность декодировать изображение с разным уровнем детализации, множеств модификаций стандарта сжатия для различных задач (хранение записей фильмов, широковебчательная рассылка изображений, хранение в архивах, обработка медицинских изображений, хранение и передача документов и другие).

Однако у стандарта присутствует и ряд существенных недостатков. В первую очередь, как и у любых форматов обработки изображений с потерями информации, при высоких степенях сжатия на изображениях проявляются артефакты. В то же время, артефакты JPEG2000 имеют более гладкие и визуально приемлемые очертания в сравнении с блоковым JPEG (рисунок 2).



Рисунок 2 – Сравнение артефактов JPEG и JPEG2000 (сжатие в 20 раз)

а) Исходное изображение, б) Сжатие JPEG, в) Сжатие JPEG2000

Также существенным недостатком JPEG2000 является существенное увеличение сложности алгоритма, затрат ресурсов памяти и времени обработки изображения в сравнении с JPEG. Самой трудоёмкой с точки зрения времени и памяти частью стандарта является алгоритм кодирования битовых плоскостей EBCOT.

Также существенным препятствием для распространения стандарта являются патентные ограничения. Методы арифметического кодирования долгое время были защищены патентами, что сильно влияет на скорость исследования

и развития подобных методов. В настоящее время запатентованные алгоритмы открыты для их применения в стандарте JPEG2000, однако сфера изучения, модификации и исследования алгоритма до сих пор развивается с осторожностью.

Сильными сторонами алгоритма WebP считаются высокая степень сжатия, менее заметные при визуальной оценке артефакты (в сравнении с JPEG).

Среди недостатков алгоритма WebP выделяют нестабильность результатов (в некоторых случаях JPEG и PNG показывают лучшие результаты), резкое ухудшение качества изображения при увеличении степени сжатия, необходимость подбора параметров качества сжатия для достижения оптимального результата.

Во второй главе рассмотрен математический аппарат ортогональных преобразований в задачах сжатия изображений.

Даны определения множества ортогональных функций, разложения непрерывного одномерного сигнала по ортогональным функциям. Далее определения распространяются на случай двумерного дискретного сигнала, частным случаем которого можно считать цифровое полутоновое изображение. Приведено понятие множества ортонормированных функций для подобных сигналов. Рассмотрена матричная форма ортогональных унитарных преобразований, а также свойство разделимости для подобных преобразований.

Способы представления сигналов с помощью ортогональных функций можно разделить на две основные группы:

1. система ортогональных базисных функций $\{\varphi_{u,v}(i, j)\}, i, j = \overline{1, N}$ состоит из тригонометрических функций;
2. система ортогональных базисных функций $\{\varphi_{u,v}(i, j)\}, i, j = \overline{1, N}$ состоит из нетригонометрических функций.

В процессе дальнейшего изложения интерес будет представлять второй случай, представленный обобщёнными дискретными преобразованиями Виленкина-Крестенсона, основанными на системах функций Виленкина-Крестенсона (ВКФ).

Применение систем ВКФ для обработки двумерных сигналов изучено только для двух простейших случаев существования данных функций. Эти крайние случаи приводят к системе Уолша — Адамара или к системе дискретных экспоненциальных функций (ДЭФ), являющихся основой для построения дискретного преобразования Фурье (ДПФ). В общем случае функция ВКФ представляет собой комплексную функцию, которую можно определить как (1):

$$VKF(p, x) = w^{\sum_{i=1}^n p_i x_i} \quad (1)$$

где $w = e^{j\left(\frac{2\pi}{m}\right)}$, p_i и x_i — разрядные коэффициенты чисел p и x , представленных в m -ичной системе счисления.

В простейшем случае, когда $m=2, w=e^{j\pi}=-1$ ВКФ представляется функциями Уолша. В другом случае, при $n=1$, область определения функций выражается, как $N=m^n=m$ и ВКФ переходит в ДЭФ (2):

$$def(p, x) = e^{j\left(\frac{2\pi}{N}\right)px}. \quad (2)$$

Исследование всех возможных вариантов построения базисов на основе ВКФ, представляется нецелесообразным ввиду особенностей архитектур современных вычислительных средств. В этой ситуации особое внимание следует уделить исследованию наиболее экономичного с точки зрения вычислительных затрат варианта построения при $m=2$, а именно функций Уолша, принимающих только два значения $\{-1, 1\}$. Поскольку при дискретном спектральном анализе сигналов с N отсчетами число спектральных составляющих должно быть равно N , число функций, включаемых в систему, обычно равно числу отсчетов каждой функции.

В зависимости от упорядочивания функции Уолша имеют разные названия и свойства: система Уолша-Адамара, система Уолша-Пэли, система Уолша.

На рисунке 3 показана строка исходного сигнала (строка изображения) после представления в виде функций Уолша в различных упорядочениях.

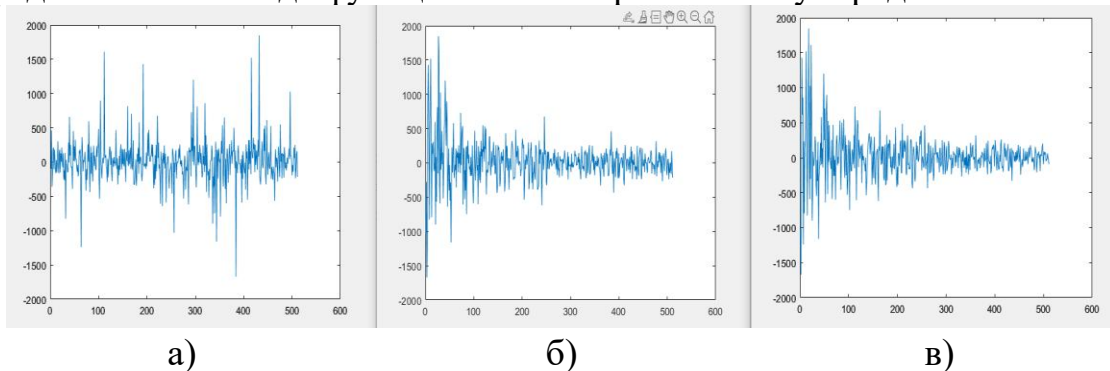


Рисунок 3 – Строки исходного сигнала после преобразования Уолша:

- а) упорядочение по Уолшу-Адамару,
- б) упорядочение по Уолшу-Пэли,
- в) упорядочение по Уолшу

При визуальной оценке рисунка 3 можно увидеть, что система Уолша-Адамара показывает наибольшую пульсацию преобразованного сигнала. Наименьшей пульсацией обладает система Уолша: значения идут «по нисходящей», приближаясь по модулю к нулю.

Данное свойство системы Уолша целесообразно использовать в задачах устранения информационной избыточности сигналов: при наличии информации, в каких частях преобразованного сигнала скапливаются наименее энергетически значащие составляющие, можно предложить методы и алгоритмы, учитывающие данные особенности преобразованных сигналов.

Преобразование Уолша является разделимым унитарным преобразованием. Поэтому можно попытаться преобразовать только строки

матрицы входных данных $\mathbf{I} = [f(n_1, n_2)]$. Введя обозначение:

$F_x(u, n_2) = \frac{1}{N} \sum_{n_1=0}^{N_1-1} f(n_1, n_2) \cdot (-1)^{\langle n_1, u \rangle}$, можно записать в матричном виде (3):

$$[F_x(u, n_2)] = \begin{bmatrix} F_x(0,0) & F_x(0,1) & \dots & F_x(0, N_2-1) \\ F_x(1,0) & F_x(1,1) & \dots & F_x(1, N_2-1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_x(N_1-1,0) & F_x(N_1-1,1) & \dots & F_x(N_1-1, N_2-1) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Данная матрица представляет собой квазидвумерный спектр – одномерный спектр изображения, записанный построчно в виде двумерного массива. Соответственно, прямое преобразование в матричном виде будет записано как (4):

$$\mathbf{F} = \mathbf{H}_w \mathbf{I} \quad (4)$$

и обратное (5):

$$\mathbf{I} = \frac{1}{N} \mathbf{H}_w^T \mathbf{F}. \quad (5)$$

На рисунке 4 показан пример квазидвумерного спектра для изображения размером 512x512.

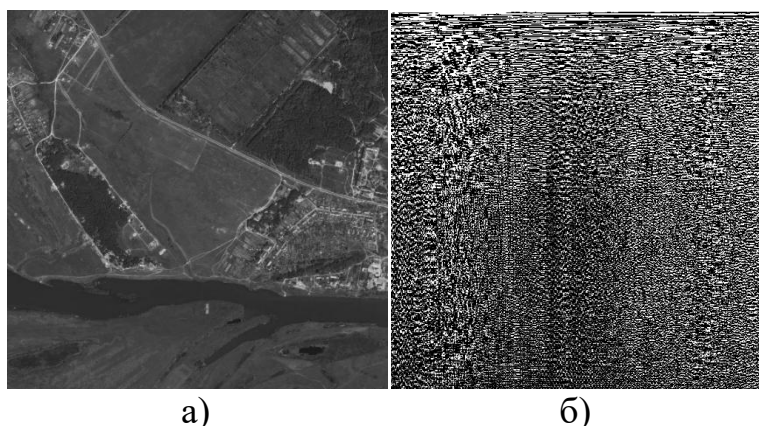


Рисунок 4 – Изображение (а) и его квазидвумерный спектр (б)

Вариант отображения спектра, изображённый на рисунке 4, белым цветом задаёт положительные компоненты спектра, а чёрным цветом задаёт отрицательные и нулевые компоненты.

В разделе «Сравнительный анализ ортогональных систем базисных функций. Выбор систем и размерностей базисных функций с наименьшим временем преобразований» приведены распространённые системы ортогональных базисных функций и соответствующие им преобразования, используемые при сжатии изображений.

Рассмотрены дискретное косинусное преобразование (ДКП), преобразование Хаара, вейвлеты Козна-Добеши-Фово (CDF), преобразование Уолша.

Для рассматриваемых преобразований ставится задача выбора размерности базисных функций для сокращения времени перехода в спектральное пространство. При обработке изображения размерность базисных функций будет задавать используемый размер блока.

Эксперимент по переходу к спектральным представлениям 500 случайно сгенерированных матриц изображений был реализован в системе Matlab на стандартном персональном компьютере, в качестве исследуемых были выбраны стандартные реализации перечисленных выше преобразований.

Результаты замера времени преобразования от размера блока представлены в виде графика на рисунке 5.

На данном графике DCT2 – дискретное косинусное преобразование, HAAR2 – преобразование Хаара, WALSH1 – преобразование Уолша-Адамара, квазидвумерный спектр, CDF9/7 – вейвлет CDF 9/7.

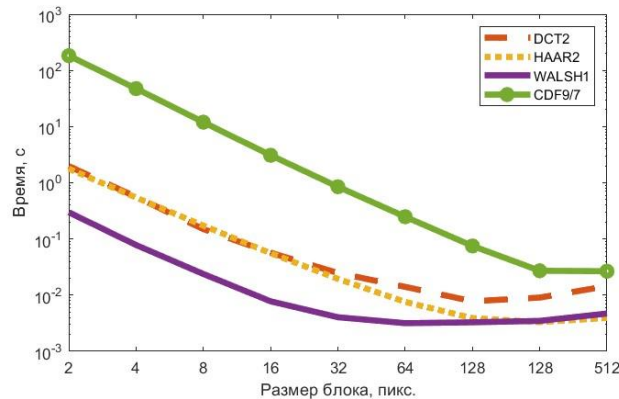


Рисунок 5 – Зависимость времени преобразования от размера блока

При использовании квазидвумерного преобразования Уолша и размера блока от 8x8 до 64x64 можно получить выигрыш во времени в 1.5 – 2 раза по сравнению с ДКП и преобразованием Хаара.

Таким образом, для разработки алгоритмов сжатия двумерных сигналов, ориентированных на существенное упрощение и сокращение времени работы целесообразно использовать квазидвумерное представление сигналов.

Далее в главе рассмотрены свойства квазидвумерного спектрального представления, на основе которых возможно осуществление устранения избыточности, а затем и сжатие данных.

Данные свойства нашли выражение в двух теоремах.

1. Теорема о постоянной составляющей спектра

Если предположить, что $I(0, j) = 0$ или конкретное значение элемента изображения в каждой строке, то нет необходимости передавать постоянную составляющую изображения через канал связи – её можно всегда восстановить по формуле (6):

$$F_0 = - \sum_{u=1}^{N-1} \mathbf{F}(u-1, j) (-1)^{\sum_{g=1}^n \langle (u-1)_g j_g \rangle}, \quad (6)$$

где g – номер разряда и n – разрядность двоичного представления порядка функций Уолша.

Передаваемый спектр в этом случае не имеет постоянной составляющей.

Для использования этого свойства при сжатии в передаваемую матрицу изображения $[f(i, j)]$ размером $N \times N$, необходимо ввести строку (или столбец) элементов, соответствующих уровню «черного» (или «белого», или любого

другого уровня), который на приемной стороне можно будет использовать для восстановления постоянной составляющей всего изображения.

2. Теорема об энергетической полноте квазидвумерного спектрального представления.

Если $[f(i, j)]$ – матрица цифрового изображения размером $N \times N$, и $[F(u, j)]$ – коэффициенты его квазидвумерного спектрального представления, то справедливо равенство (7):

$$\frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(i, j)^2 = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} F(u, j)^2 \quad (7)$$

Выражение (7) является равенством Парсеваля для квазидвумерного представления двумерных сигналов.

На основе теоретических выводов, полученных в главе, произведена разработка алгоритма сжатия изображения в квазидвумерном спектре с восстановлением постоянной составляющей и устранением высокочастотных составляющих.

На рисунке 6 приведена схема предложенного алгоритма.



Рисунок 6 – Схема алгоритма сжатия изображения в квазидвумерном спектре с восстановлением постоянной составляющей и устранением высокочастотных составляющих

При переходе к квазидвумерному спектральному представлению сигнала в нем могут быть выявлены составляющие, не вносящие существенного вклада в изобразительные свойства изображения. Их можно исключить, выполнив прореживание спектра (8), подготовив, таким образом, возможность для сжатия изображений:

$$F(u, j) = 0, \quad (8)$$

для тех u, j , в которых $F(u, j) \leq \bar{F}(u, j)$, где $\bar{F}(u, j) = k$ – пороговое значение, выбираемое исходя из необходимого качества передачи изображений.

При прореживании из спектра исключается некоторое количество его элементов, это влечёт за собой нарушение равенства Парсеваля между спектром и исходным изображением, что неизбежно приведет к искажению постоянных составляющих в столбцах принятого изображения. Для устранения данного эффекта необходимо добавить значения отброшенных элементов в корректирующую строку, которая будет записана вместо строки постоянных составляющих(9):

$$F_k(u, 0) = \sum_j F(u, j)_{\leq \bar{F}(u, j)} \quad (9)$$

В связи с вышеизложенным предлагается следующий протокол передачи сформированного сигнала. Протокол описывает форматы 9-битных данных для передачи кадра изображений размером 512x512 пикселей.

Корректирующий формат, изображённый на рисунке 7, используется для передачи корректирующей строки $F(0, u), u = 0, N-1$. Все поля используются как единое число для передачи нормированной корректирующей строки, все элементы которой поделены на 256.



Рисунок 7 – Формат данных корректирующей строки

Формат передачи данных, показанный на рисунке 8, используется для передачи кодов спектральных составляющих изображения. Поле S 0/1 определяет знак числа, в поле M записывается значение элемента сигнала, деленное на 16. Если полученное число меньше или равно 63, то значение поля $P = 0$. Если в результате деления получается число больше 63, то оно дополнительно делится на 32 и значение $P = 1$.

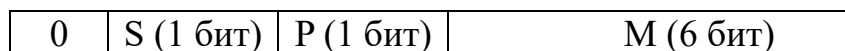


Рисунок 8 – Формат передачи кодов спектральных составляющих

Формат сжатия нулевых последовательностей представлен на рисунке 9. Бит Z хранит значение 1, в то время как остальные 8 бит (поле M на рисунке 8) – число нулевых элементов, следующих за текущим в строке.

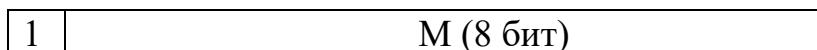


Рисунок 9 – Формат сжатия нулевых последовательностей

В работе представлены схемы алгоритмов сжатия и восстановления изображений с подробным текстовым описанием.

В третьей главе представлено сравнение таких методов устранения информационной избыточности, как пороговое и пространственное исключение составляющих спектра, а также квантование составляющих.

В качестве меры оценки качества восстановленного изображения была выбрана среднеквадратическая ошибка (СКО, RMSE – Root Mean Square Error) σ , представляющая собой попиксельное сравнение двух фрагментов изображения (10):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} (\hat{\mathbf{I}}(i, j) - \mathbf{I}(i, j))^2}, \quad (10)$$

где $N \times M$ – размер изображения, $i = \overline{0, N}, j = \overline{0, M}, \mathbf{I}(i, j)$ – пиксель исходного изображения, $\hat{\mathbf{I}}(i, j)$ – пиксель восстановленного изображения.

Показано, что, даже в случае высоких показателей СКО, при визуальной оценке восстановленных изображений метод квантования способен сохранить мелкие детали изображения даже при малом числе уровней квантования (рисунок 10).

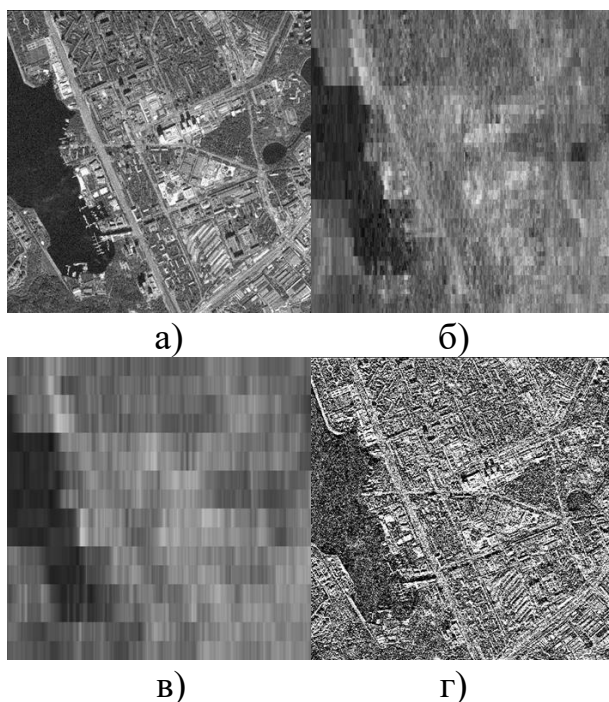


Рисунок 10 – Влияние операций устранения информации в составляющих квазидвумерного спектра
а) Исходное изображение

б) Пороговое исключение, устранено 98% спектра, СКО = 34,1

в) Пространственное исключение, устранено 98% спектра, СКО = 37,5

г) Квантование значений, 2 бита на значение из спектра, СКО = 84,7

В соответствии с данным наблюдением был предложен метод сжатия изображений в базисе функций с двоичной арифметикой, основанный на

квазидвумерном спектральном представлении изображения, с сохранением постоянной составляющей, квантованием и энтропийным кодированием значений спектра, реализованный в виде двух алгоритмов сжатия с равномерным и оптимальным квантованием.

Метод сжатия предназначен для изображений в градациях серого размером $N \times N$, где N – степень числа 2.

Основные составляющие метода представлены диаграммой потоков данных, изображённой на рисунке 11.



Рисунок 11 – Диаграмма потоков данных предложенного метода сжатия изображения

На основе предложенного метода были разработаны алгоритмы сжатия изображений с равномерным и оптимальным квантованием квазидвумерного спектра.

Далее будет приведено описание действий, обозначенных цифрами на рисунке 10 для пошаговой реализации алгоритмов.

1. Исходное изображение преобразуется в квазидвумерный спектр (4).

2. В полученном спектре выделяется постоянная составляющая и хранится отдельно в формате 32 бита на элемент. Для изображения 512x512 пикселей это добавит около 0.06 бит/пиксель к сжатому изображению. Этот шаг необходим для повышения точности восстановления и для уменьшения разброса квантуемых значений.

3. Оставшийся квазидвумерный спектр прореживается по порогу k (8).

Такое прореживание позволяет создать закономерности для сжатия, а также дополнительно уменьшить диапазон квантуемых значений. Следует отметить, что значение порога должно быть не слишком высоким, чтобы не устранить значимую часть спектра.

4. Прореженный спектр квантуется равномерным или оптимальным методом, после чего матрица квазидвумерного спектра заменяется на матрицу

уровней. Количество уровней – 2^m , где m – число бит, отводящееся под 1 элемент матрицы.

5. В качестве алгоритма энтропийного кодирования в предлагаемых алгоритмах используется метод сжатия Deflate, который используется при создании .zip-архивов.

Таким образом, в сжатом формате будет храниться вектор постоянных составляющих и матрица уровней квантованных значений квазидвумерного спектра.

Для восстановления изображения, кроме его размера, необходимо дополнительно знать:

- в случае равномерного квантования: число бит на уровень и диапазон квантуемых значений;
- в случае неравномерного (оптимального) квантования: вектор интервалов (partition) и вектор квантованных значений (codebook).

Схемы предложенных алгоритмов представлены на рисунке 12.



Рисунок 12 – Схемы алгоритмов сжатия изображений в квазидвумерном спектральном пространстве с равномерным и оптимальным квантованием составляющих

В четвёртой главе приведены шаги по реализации и исследованию предложенных алгоритмов.

Дано описание разработанного программного обеспечения для проверки работоспособности алгоритмов.

В таблице 1 представлены результаты экспериментальной проверки алгоритмов, реализующих метод сжатия с квантованием квазидвумерного спектра, на аэрокосмических изображениях природного ландшафта и городской застройки.

Таблица 1 – Квантование спектров на разное число уровней

Метод квантования	Число бит на уровень	Ландшафт		Город	
		СКО	Бит/пикс	СКО	Бит/пикс
Равномерное	8	5,13	2,43	4,99	4,20
	7	6,57	1,89	7,62	3,04
	6	10,5	1,41	13,38	1,96
Оптимальное	8	4,55	2,52	3,88	4,68
	6	4,61	1,66	4,2	3,14
	4	5,07	0,94	7,12	1,61
	3	6,54	0,60	12,7	0,95

Методы оптимального квантования квазидвумерного спектра по сравнению с равномерным квантованием позволяют достичь более высокой степени сжатия или более высокого качества восстановленного изображения. Оптимальное квантование будет занимать больше времени, чем равномерное, однако, если один раз рассчитать оптимальные значения для типового представителя класса обрабатываемых сигналов, и применять их к остальным спектрам, время выполнения сравняется с равномерным квантованием.

Далее приведено сравнение предложенных в работе алгоритмов с известными по критериям степени сжатия, качества восстановления, производительности.

При разработке алгоритмов, ориентированных на сокращение и упрощение вычислительных операций при сжатии, важнейшей характеристикой будет являться измерение производительности сжатия. Измерение временной оценки производительности представляет собой нетривиальную задачу, единого подхода к подобным измерениям не выявлено в силу различных особенностей, отличия средств реализаций (программные и аппаратные реализации алгоритмов могут давать совершенно разный результат), различия критериев оценки (время работы в секундах, количество операций на пиксель, количество процессорных циклов и так далее). В данной работе производительность будет оцениваться как время в секундах, затрачиваемое на сжатие изображения.

Программные реализации алгоритмов представлены в системе Matlab. Для измерения времени работы использовались встроенные средства

профилирования. Все испытания проходили на не изменявшейся аппаратной платформе.

Для оценки качества восстановления и времени работы были выбраны следующие алгоритмы сжатия:

1. алгоритм JPEG;
2. алгоритм SPIHT (Set partitioning in hierarchical trees), использующий в качестве ортогонального базиса вейвлеты CDF9/7;
3. алгоритм EZW (Embedded Zerotrees of Wavelet transforms), также использующий в качестве ортогонального базиса вейвлеты CDF9/7;
4. предложенный алгоритм сжатия с исключением высокочастотных составляющих квазидвумерного спектра;
5. предложенный алгоритм сжатия с квантованием высокочастотных составляющих квазидвумерного спектра;
6. предложенный алгоритм сжатия, основанный на равномерном квантовании значений квазидвумерного спектра;
7. предложенный алгоритм сжатия, основанный на оптимальном квантовании квазидвумерного спектра.

При замере времени использовались оптимальные значения квантователей, заранее полученные в ходе обработки 60 высоко детализированных изображений.

Результаты зависимости качества восстановленных изображений от степени сжатия для исследуемых алгоритмов представлены на рисунке 13.

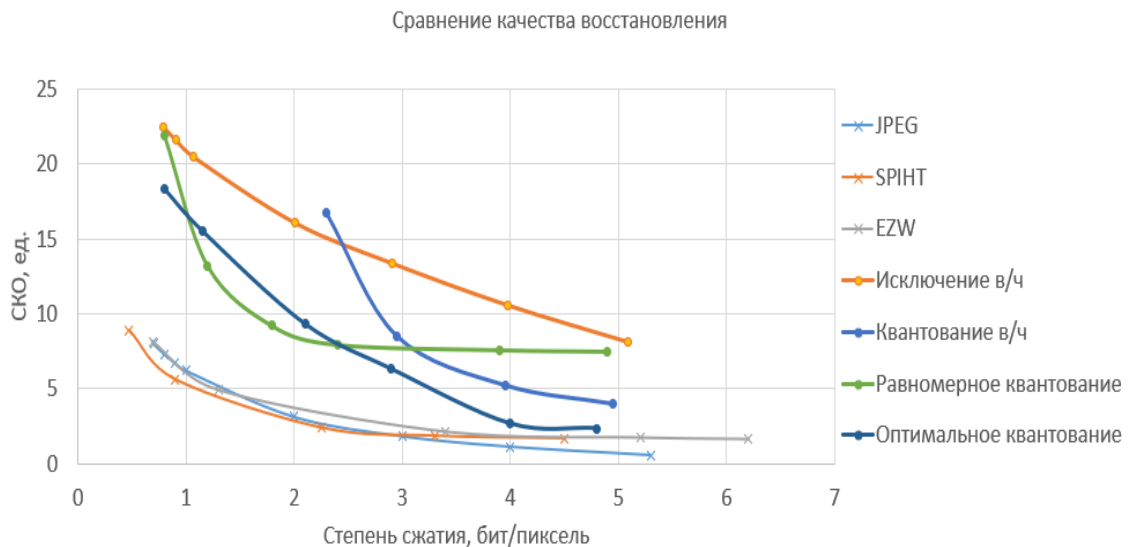


Рисунок 13 – Сравнение качества восстановления исследуемых алгоритмов

Результаты зависимости времени сжатия изображений от степени сжатия для исследуемых алгоритмов представлены на рисунке 14.

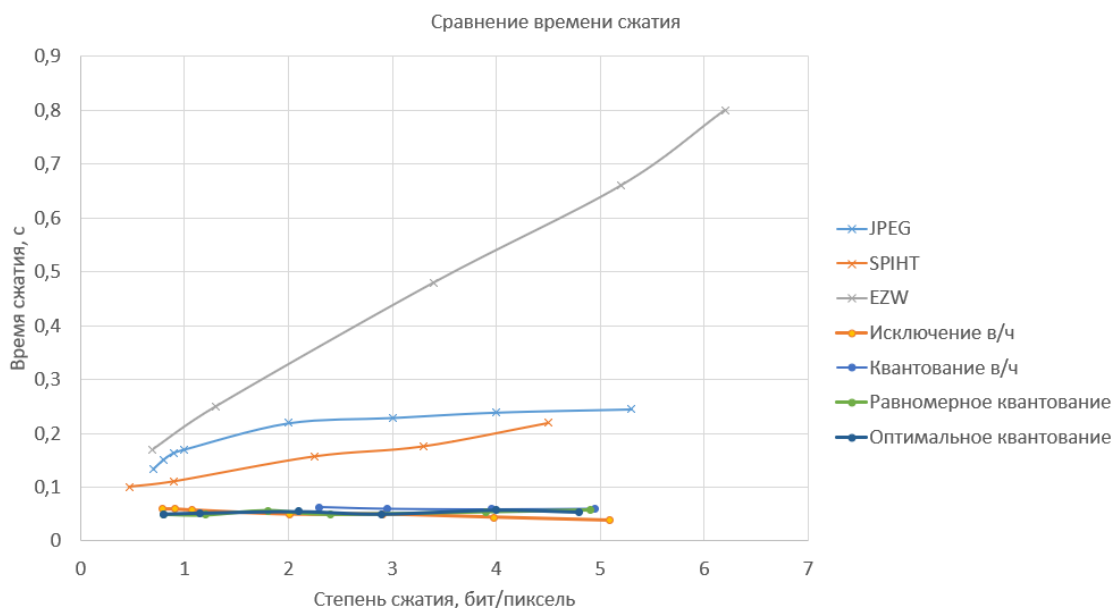


Рисунок 14 - Сравнение времени сжатия исследуемых алгоритмов

Графики на рисунке 13 и рисунке 14 показывают, что предложенные алгоритмы, несмотря на снижение качества изображений по сравнению с известными методами обладают лучшим временем обработки при фиксированной степени сжатия. Выигрыш по данному показателю варьируется в пределах от 1,8 до 4 раз (за исключением метода EZW). В среднем выигрыш во времени сжатия составил 3,4 раза.

В заключении сформулированы основные выводы и перечислены полученные в работе результаты.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В представленной работе выполнены разработка и исследование метода и алгоритмов сжатия изображений в базисе функций с двоичной арифметикой.

Предложенные метод и алгоритмы могут являться решением задачи повышения эффективности функционирования инфокоммуникационных систем при передаче изображений по каналам связи.

При этом в ходе работы были получены следующие результаты:

1. Произведён анализ возможности применения известных алгоритмов сжатия изображений в системах передачи информации, имеющих существенные ограничения вычислительных возможностей каналообразующего оборудования;
2. Исследованы различные способы устранения информационной избыточности, основанные на свойствах функций с двоичной арифметикой для квазидвумерного спектрального представления изображений;
3. Предложен метод сжатия изображений в базисе функций с двоичной арифметикой, основанный на квазидвумерном спектральном представлении изображения, с сохранением постоянной составляющей, квантованием и энтропийным кодированием значений спектра;
4. Разработан реализующий предложенный метод алгоритм сжатия изображений в квазидвумерном спектральном пространстве с равномерным квантованием составляющих, обеспечивающий степень сжатия от 4 до 10 раз и позволяющий сократить время сжатия от 2 до 4 раз по сравнению с известными

5. Разработан реализующий предложенный метод алгоритм сжатия изображений в квазидвумерном спектральном пространстве с оптимальным квантованием составляющих, обеспечивающий лучшее качество и детализацию по сравнению с равномерным квантованием, позволяющий сократить время сжатия на 50-80% по сравнению с известными

6. Разработан алгоритм сжатия изображения в квазидвумерном спектре с восстановлением постоянной составляющей и устранением высокочастотных составляющих, позволяющий сжать изображения в 4-8 раз и сократить время сжатия на 60-80% по сравнению с известными;

7. Произведено экспериментальное исследование разработанного метода и алгоритмов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в изданиях из перечня ВАК

1. **Бастрычкин А.С.** Дифференциально-импульсная кодовая модуляция в задачах сжатия изображений с использованием нетригонометрических базисов / А.С. Бастрычкин, С.И. Гусев, Б.В. Костров, С.И. Бабаев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 55-61.

2. **Бастрычкин А.С.** Определение степени сжатия и качества восстановленных изображений по заранее заданным параметрам / А.С. Бастрычкин, Б.В. Костров, С.И. Бабаев [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. — 2024. — №12 (150) . — URL: <https://research-journal.org/archive/12-150-2024-december/10.60797/IRJ.2024.150.80> (дата обращения: 20.12.2024). — DOI: 10.60797/IRJ.2024.150.80

3. **Бастрычкин А.С.** Метод передачи изображений с квантованием высокочастотной составляющей / Б. В. Костров, А. С. Бастрычкин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 2. – С. 75-82.

4. **Бастрычкин А.С.** Сжатие изображений на основе ортогональных преобразований / Б. В. Костров, А. С. Бастрычкин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 9. – С. 113-119

Работы, индексируемые в базе данных Web of Science и Scopus

5. **Bastrychkin A.S.** The Issues of Orthogonal Basis Dimension Selection in Embedded Image Processing Systems / A. I. Baranchikov, S. I. Babaev, Bastrychkin A.S. [et al.] // 2021 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2021 : 10, Budva, 07–10 июня 2021 года. – Budva, 2021. – P. 9460233. – DOI 10.1109/MECO52532.2021.9460233.

6. **Bastrychkin A.S.** Calculation of Image Transmission Partial Spectrum / A. S. Bastrychkin, B. V. Kostrov, N. N. Grinchenko, G. V. Svetlov // 2020 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2020 : 9, Budva, 08–11 июня 2020 года. – Budva, 2020. – P. 9134144. – DOI 10.1109/MECO49872.2020.9134144.

7. **Bastrychkin A.S.** Image Compression Using Optimal Quantization / A. Bastrychkin, S. I. Babaev, B. V. Kostrov, N. N. Grinchenko // 2020 9th Mediterranean

Conference on Embedded Computing, MECO 2020 : 9, Budva, 08–11 июня 2020 года. – Budva, 2020. – P. 9134169. – DOI 10.1109/MECO49872.2020.9134169

8. **Bastrychkin A.S.** Image compression based on Walsh spectra / B. V. Kostrov, S. I. Babaev, A. Bastrychkin [et al.] // 13th International Conference ELEKTRO 2020, ELEKTRO 2020 - Proceedings : 13, Taormina, 25–28 мая 2020 года. Vol. 2020-May. – Taormina, 2020. – P. 9130274. – DOI 10.1109/ELEKTRO49696.2020.9130274.

9. **Bastrychkin A.S.** Aspects of Binary Images Spectral Analysis / S. I. Babaev, A. Bastrychkin, B. V. Kostrov [et al.] // 2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2019 - Proceedings : 8, Budva, 10–14 июня 2019 года. – Budva, 2019. – P. 8760003. – DOI 10.1109/MECO.2019.8760003.

10. **Bastrychkin A.S.** Image compression in quasi-two-dimensional spectrum with quantizing of high-frequency component / A. Y. Gromov, D. S. Stepanov, E. P. Koroleva, A. S. Bastrychkin // 2018 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2018 - Including ECYPS 2018, Proceedings : 7, Budva, 10–14 июня 2018 года. – Budva, 2018. – P. 1-4. – DOI 10.1109/MECO.2018.8406074.

11. **Bastrychkin A.S.** Image compression and restoration in embedded computing systems / B. V. Kostrov, A. G. Svirina, S. I. Babaev [et al.] // 2017 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2017 - Including ECYPS 2017, Proceedings : 6, Bar, 11–15 июня 2017 года. – Bar, 2017. – P. 7977192. – DOI 10.1109/MECO.2017.7977192

Работы, опубликованные в других изданиях

12. **Бастрычкин А.С.** Формирование трафика в системах передачи данных / А. С. Бастрычкин, Б. В. Костров, Н. Н. Гринченко, Б. А. Костров // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2022 : Сборник трудов V Международного научно-технического форума. В 10-ти томах, Рязань, 02–04 марта 2022 года / Под общей редакцией О.В. Миловзорова. Том 4. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2022. – С. 115-120.

13. **Бастрычкин, А.С.** Выбор размерности ортогонального базиса для передачи изображений / А. С. Бастрычкин // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2021 : Сборник трудов IV Международного научно-технического форума: в 10 т., Рязань, 03–05 марта 2021 года. Том 4. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф.Уткина, 2021. – С. 103-106.

14. **Бастрычкин А.С.** Реализация преобразования Хаара / Б. В. Костров, А. С. Бастрычкин // Методы и средства обработки и хранения информации: Межвузовский сборник научных трудов. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью Издательство "КУРС", 2017. – С. 171-173.

15. **Бастрычкин А.С.** Прореживание изображений при передаче по каналу связи / А. С. Бастрычкин, Б. В. Костров // 7-я международная научно-техническая конференция "К.Э.Циолковский - 160 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика" : Тезисы докладов, Рязань, 04–06 октября 2017 года. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2017. – С. 382-387

16. **Бастрычкин А.С.** Методическая ошибка протокола передачи изображения / Б. В. Костров, А. С. Бастрычкин // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2017 : сборник трудов II Международной научно-технической и научно-методической конференции: в 8 т., Рязань, 01–03 марта 2017 года / Рязанский государственный радиотехнический университет. Том 3. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2017. – С. 250-253

17. **Бастрычкин А.С.** Модификация метода передачи изображений без постоянной составляющей / Б. В. Костров, А. С. Бастрычкин // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2016 : Сборник трудов международной научно-технической и научно-методической конференции: в 4 томах, Рязань, 02–04 марта 2016 года / Рязанский государственный радиотехнический университет; Под общей редакцией О.В. Миловзорова. Том 1. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2016. – С. 311-313.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

18. Программа сжатия изображений в квазидвумерном спектре с восстановлением постоянной составляющей и устранением высокочастотных элементов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024687272/ Костров Б.В., Бастрычкин А.С., Бабаев С.И. // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 15.11.2024 г

19. Программа сжатия изображений в квазидвумерном спектре с квантованием высокочастотных элементов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686884/ Костров Б.В., Бастрычкин А.С., Бабаев С.И. // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13.11.2024г.

Бастрычкин Александр Сергеевич

**МЕТОД И АЛГОРИТМЫ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В БАЗИСЕ
ФУНКЦИЙ С ДВОИЧНОЙ АРИФМЕТИКОЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 20.10.2025. Формат бумаги 60х84 1/16

Бумага офсетная. Печать трафаретная.

Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф.Уткина.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.