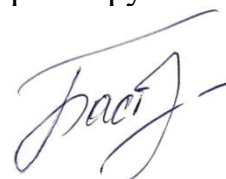


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВО «РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. В.Ф. УТКИНА»

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

Диссертация
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
доцент ГУСЕВ С.И.

Рязань, 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ОБЗОР И АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ.....	17
1.1 Представление изображений в цифровом формате	17
1.2 Задача сжатия изображений	20
1.3 Алгоритмы сжатия изображений	23
1.3.1 Алгоритм JPEG	23
1.3.2 Алгоритм JPEG2000	27
1.3.3 Алгоритм WebP.....	38
1.4 Достоинства и недостатки алгоритмов сжатия изображений	39
1.5 Выводы по главе	43
2 ОРТОГОНАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ.....	44
2.1 Представление изображений с использованием нетригонометрических ортогональных преобразований.....	44
2.2 Обобщенные дискретные преобразования Виленкина- Крестенсона	46
2.3 Нетригонометрические ортогональные базисные функции в задачах сжатия изображений	47
2.3.1 Двумерное и квазидвумерное преобразование Уолша	50
2.4 Сравнительный анализ ортогональных систем базисных функций. Выбор систем и размерностей базисных функций с наименьшим временем преобразований	52

2.4.1 Дискретное косинусное преобразование (ДКП)	52
2.4.2 Преобразование Хаара	53
2.4.3 Вейвлет Коэна-Добеши-Фово (CDF).....	54
2.4.4 Преобразование Уолша.....	55
2.4.5 Деление изображений на блоки	56
2.4.6 Результаты сравнения	57
2.5 Свойства квазидвумерного спектрального представления, позволяющие осуществлять устранение избыточности данных	60
2.6 Разработка алгоритма сжатия изображений с исключением высокочастотной составляющей	61
2.7 Выводы по главе	78
3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА И АЛГОРИТМОВ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В БАЗИСЕ ФУНКЦИЙ С ДВОИЧНОЙ АРИФМЕТИКОЙ, ОСНОВАННЫХ НА КВАНТОВАНИИ КВАЗИДВУМЕРНОГО СПЕКТРА	80
3.1 Влияние применения методов устранения информационной избыточности в спектре на качество восстановления изображений	80
3.2 Алгоритм сжатия с квантованием высокочастотной составляющей	88
3.3 Метод сжатия изображений в базисе функций с двоичной арифметикой, основанный на квазидвумерном спектральном представлении изображения. Алгоритмы сжатия изображения в квазидвумерном спектральном пространстве с равномерным и оптимальным квантованием составляющих	95
3.3.1 Оптимальное квантование	95
3.3.2 Описание метода сжатия. Разработка алгоритмов сжатия...	96
3.4 Выводы по главе	99

4 РЕАЛИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМЫХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ.....	100
4.1 Разработка программных стендов для исследования алгоритмов с квантованием и исключением высокочастотных составляющих	100
4.2 Исследование алгоритмов с равномерным и оптимальным квантованием квазидвумерного спектра	104
4.3 Сравнение разработанных алгоритмов и существующих методов сжатия по критериям качества восстановленных изображений и времени сжатия	107
4.4 Выводы по главе	111
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	112
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	114
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Акты внедрения результатов кандидатской диссертации	127
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.....	129

ВВЕДЕНИЕ

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. Это связано с большим объемом данных, передаваемых на пределе пропускной способности каналов связи. Поэтому поиск простых и эффективных методов и алгоритмов уменьшения избыточности видеоданных до настоящего времени остается актуальной задачей. Также при разработке таких алгоритмов необходимо учесть особенности продвижения строк и кадров изображений через каналобразующее оборудование [2].

Сжатие изображений — применение алгоритмов сжатия данных к изображениям, представленных в цифровом формате. В результате сжатия уменьшается количество данных, описывающих изображение, что уменьшает время передачи изображения и экономит пространство для хранения.

Сжатие изображений подразделяют на сжатие с потерями качества и сжатие без потерь. Сжатие без потерь часто предпочтительней для искусственно построенных изображений, таких как графики, значки программ, объектов компьютерной графики, либо для специальных случаев, например, если изображения предназначены для последующей обработки алгоритмами распознавания изображений. Алгоритмы сжатия с потерями при увеличении степени сжатия могут порождать хорошо заметные человеческому глазу артефакты.

Однако преимущество методов сжатия с потерями над методами сжатия без потерь состоит в том, что первые делают возможной большую степень

сжатия, продолжая удовлетворять поставленным требованиям, а именно — искажения должны быть в допустимых пределах чувствительности человеческих органов физических чувств.

В общем случае, данные можно сжать, если в них присутствует избыточность.

В настоящее время в задачах сжатия изображений выделяют три основных вида избыточности: кодовая, межэлементная и визуальная. [50]

Кодовая избыточность возникает в том случае, когда при кодировании яркостей пикселей не учитывается гистограмма распределения яркостей. Один из методов устранения кодовой избыточности заключается в применении методов неравномерного кодирования, когда более вероятным значениям присваиваются более короткие коды, и наоборот, самый длинный код имеют наименее вероятные значения яркостей.

Межэлементная избыточность позволяет осуществить сжатие на основе пространственных (внутрикадровых, геометрических) закономерностей в изображении. Выявление этих закономерностей позволяет реализовывать более компактные способы хранения данных, которые, чаще всего, не являются «визуальными» (например, кодирование длин серий).

Визуальная избыточность связана с информацией, которая способна восприниматься зрительными органами человека. Устранение визуальной избыточности может быть реализовано посредством методов сжатия с потерями, или, по-другому, компрессии информации.

Компрессия информации достигается путем удаления или сокращения избыточности данных. При сжатии с потерями используется концепция, которая предполагает сжатие путем удаления несущественной, нерелевантной информации. Изображение можно сжать с потерей, удалив несущественную информацию, даже если в нем нет избыточности[55,56].

Отдельного внимания заслуживают трансформационные методы сжатия изображений. В их основе лежит переход от исходного пиксельного

представления к какому-либо другому посредством различных операций над строками и столбцами матрицы изображения.

На практике оказалось достаточно удобно работать с ортогональными преобразованиями, основанными на различных наборах базисных функций[31,38,43,48]. Дополнительным, но важным при выборе набора подобных функций, преимуществом является свойство делимости преобразований. Наличие подобного свойства позволяет разделить преобразование на два: 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 имеет ряд следующих особенностей:

- матрицы прямого и обратного преобразования полностью совпадают (свойство симметричности);
- базисные функции преобразования принимают значения «1» и «-1», следовательно, 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.

При переходе к спектральным представлениям изображение часто делят на блоки различных размеров. Данный подход имеет как преимущества, так и недостатки.

Деление на блоки позволяет сделать алгоритм обработки более универсальным, подходящим для изображений разных размеров. Также подобное разбиение уменьшает максимальные абсолютные значения составляющих спектра, что делает возможным применение более компактных типов данных для хранения чисел.

Из недостатков блоковых преобразований выделяют существенное увеличение временных затрат при малых размерах блока. Также переход к спектральному представлению в малом блоке будет содержать небольшое количество информации, в том числе избыточной или подходящей для устранения, что может сделать применение последующих алгоритмов упаковки малоэффективным.

Так, в стандарте JPEG для ДКП применяется разбиение на блоки 8x8.

Для преобразований с отличающейся от ДКП концентрацией энергии в низкочастотных коэффициентах целесообразно выбрать оптимальный размер блока, который может не соответствовать размерам, принятым в распространённых алгоритмах. Однако оптимальный размер блока поможет сократить время обработки изображения, а также, возможно, будет способствовать накоплению большего количества информации, а значит, и возможности устранения несущественных данных.

Распространённым подходом в сжатии с потерями является квантование значений. Однако прямое квантование значений яркостей или цветовых составляющих пикселей зачастую может привести к появлению ложных контуров и существенному снижению визуального восприятия изображения.

Среди методов квантования выделяют две большие группы: равномерное и неравномерное. Равномерное квантование может быть достаточно просто реализовано, а также иметь высокую скорость работы, но

подобный подход обладает сравнительно низким качеством воспроизведения исходного сигнала.

В задачах неравномерного квантования выделяют оптимальное квантование, минимизирующее ошибку восстановления сигнала. При реализации данного метода могут возникнуть сложности, связанные с расчётом оптимальных коэффициентов квантования для каждого поступающего изображения (или блока изображения), что является достаточно трудоёмкой и занимающей время задачей. В качестве альтернативы применяется метод предварительного вычисления оптимальных коэффициентов для множества типичных изображений сходной природы, а затем эти коэффициенты используются аналогично коэффициентам равномерного квантования. Подобный подход всю сложность расчётов оставляет на предварительном этапе, а при использовании в действующих системах ориентирован на скорость и простоту.

Следует отметить, что применение квантования делает данные более удобными для сжатия, с этой точки зрения применение квантования достаточно выгодно. Но выделение недостаточного числа уровней квантования для значений яркостей изображений может существенно снизить его чёткость и не гарантирует сохранения мелких деталей на изображении.

Один из вариантов устранения подобного противоречия – применение методов квантования не к исходному пространственному представлению изображения, а к иному его представлению (коэффициенты преобразования Фурье, ДКП, вейвлет-преобразование).

В данной работе рассматривается применение методов квантования для квазидвумерного спектра, полученного с помощью преобразования Уолша.

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, нейросетевые методы[3,83,91,100]. Однако ни один не дает полного и эффективного решения проблемы.

Так, методы форматы сжатия без потерь (PNG, GIF, JPEG-LS) обладают наивысшим качеством восстановления, однако показатели степени сжатия таких форматов довольно низкие (до 3 раз)[14,24, 28].

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 объема 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. При переходе от пространственной области к частотной используются ортогональные функции. В настоящее время наибольшее распространение получил переход через преобразование Фурье.

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 других.

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., Сойфера 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.

В качестве базиса, состоящего из ортогональных функций, в своих работах Трахтман А.М., Сюзов В.В., Костров Б.В. предлагают использовать преобразование 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.

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.

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.

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 нетригонометрических базисных функций с двоичной арифметикой, и алгоритмы, его реализующие, отличающиеся простотой вычислительных

операций и позволяющие сократить время сжатия изображения на 50-80% при степени сжатия от 3 до 10 раз.

Все предложенные алгоритмы могут быть реализованы средствами целочисленной арифметики, а также 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, обеспечивающий

степень сжатия от 4 до 10 раз и позволяющий сократить время сжатия от 2 до 4 раз по сравнению с известными;

1.6 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;

2. 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.

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.

Акты, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы, приведены в Приложении 1.

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

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

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

— 6-ой средиземноморской конференции по встроенным вычислениям, МЕСО 2017 (Черногория, г. Бар, 2017 г.);

— II международной научно-технической и научно-методической конференции «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2017 (Рязань, 2016 г.);

— 7-ой международной научно-технической конференции "К.Э.ЦИОЛКОВСКИЙ - 160 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ. КОСМОНАВТИКА. РАДИОЭЛЕКТРОНИКА. ГЕОИНФОРМАТИКА (Рязань, 2018 г.);

— 7-ой средиземноморской конференции по встроенным вычислениям, МЕСО 2018 (Черногория, г. Будва, 2018 г.);

— 8-ой средиземноморской конференции по встроенным вычислениям, МЕСО 2019 (Черногория, г. Будва, 2019 г.);

- 9-ой средиземноморской конференции по встроенным вычислениям, МЕСО 2020 (Черногория, г. Будва, 2020 г.);
- 13-ой международной конференции по электротехнике и информационным технологиям «ELEKTRO 2020». (Италия, Таормин, 2020 г.);
- 10-ой средиземноморской конференции по встроенным вычислениям, МЕСО 2021 (Черногория, г. Будва, 2021 г.);
- IV международном научно-техническом форуме "СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ", СТНО 2021 (Рязань, 2021г);
- 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, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Копии свидетельств о регистрации программ приведены в Приложении 2.

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.

1 ОБЗОР И АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

1.1 Представление изображений в цифровом формате

Цифровые изображения в настоящее время имеют множество различных способов представления. Это обусловлено множеством задач, для которых используются цифровые изображения.

Цифровые изображения могут быть растровыми или векторными. Основные составляющие растровых изображений – пиксели, элементы матрицы изображения. В случае векторных изображений элементарными частями, на которых строится изображение, являются графические примитивы – простейшие фигуры, точки и кривые, из которых строятся более сложные изображения [2].

Важной особенностью векторных изображений является их низкая способность реалистично отображать объекты реального мира. Фиксация сцен физического мира на данный момент возможна только с помощью сенсоров, формирующих растровые изображения.

Регистрация изображений возможна с помощью различных конфигураций светочувствительных сенсоров. Это может быть одиночный сенсор, линейка сенсоров или матрица сенсоров.

В качестве сенсоров в настоящее время широкое распространение получили два вида датчиков: прибор с зарядовой связью (ПЗС) и комплементарный металл-оксидный проводник (КМОП) [30].

Также стоит отметить, что цифровые изображения возможно получать, обрабатывая сигналы различной природы, например, рентгеновское излучение, звук, данные радиолокационного зондирования Земли, информационно-измерительных систем [50, 53, 78].

При классификации цифровых растровых изображений по количеству и устройству цветовых каналов выделяют различные их типы.

Монохромные изображения представляют собой изображения с одним цветовым каналом. Среди монохромных растровых изображений выделяют бинарные изображения, состоящие из компонентов только чёрного или белого цвета, и полутоновые изображения, диапазон яркости которых зависит от используемого количества бит. Так, при хранении яркости каждого пикселя в 8 битах число возможных градаций серого будет равно $2^8 = 256$. При этом 0 будет означать чёрный цвет, а 255 – белый.

Полноцветные изображения хранят несколько цветовых каналов для каждого пикселя. Значения каналов могут хранить различную информацию в зависимости от выбранной цветовой схемы: RGB, CMYK, HSV, YCbCr, и так далее.

Особо следует выделить цветные индексированные изображения, цвет пикселей которых задаётся особыми таблицами – палитрами цветов. Цветные индексированные изображения часто применяются в задачах, где важно выделить цветом области интереса (обработка медицинских изображений, интерпретация данных спутниковых снимков, геологическая разведка и другие)[4].

Рассмотрим полутоновые изображения, которые представляют собой двумерные дискретные сигналы вида:

$$[f(x, y)] = I,$$

где I – яркость или интенсивность изображения, а x, y – пространственные координаты точек (пикселей) изображения, $x = \overline{1, N}, y = \overline{1, M}$, N, M – размер изображения.

Светочувствительные сенсоры, регистрирующие электромагнитные волны, получают на вход значения, пропорциональные энергии волн. То есть в общем случае:

$$0 < f(x, y) < \infty.$$

С другой стороны, энергия регистрируемых волн зависит от освещённости сцены $i(x, y)$, и коэффициента отражения объектов сцены $r(x, y)$, причём

$$0 < i(x, y) < \infty,$$

$$0 < r(x, y) < 1.$$

Для коэффициента r ноль будет означать полное поглощение, а единица полное отражение света от объектов сцены.

Произведение функций $i(x, y)$ и $r(x, y)$ будет являться яркостью изображения или уровнем серого l в каждой точке изображения:

$$l = i(x, y)r(x, y) = f(x, y)$$

Из ограниченности интервалов значений $i(x, y)$ и $r(x, y)$ следует, что и яркость изображения также ограничена:

$$l_{min} \leq f(x, y) \leq l_{max}.$$

Или, сместив диапазон яркостей, можно получить выражение:

$$0 \leq f(x, y) \leq L - 1,$$

где $L - 1$ – максимальная яркость в новом интервале.

Если значения яркостей в системе регистрации и обработки изображений представлены отсчётами из конечного множества, то говорят о квантовании диапазона яркостей на L уровней[50].

Для обработки и хранения яркостей пикселей в вычислительной технике представляется удобным L выбрать равным степени числа 2:

$$L = 2^k.$$

То есть каждая яркостная компонента изображения будет занимать k бит.

Регистрация изображения ограниченным набором сенсоров приводит к тому, что изображение будет представлено конечным набором отсчётов не только в яркостной, но и в пространственной области. Процесс представления координат изображения в виде конечного множества отсчётов называется дискретизацией.

В вычислительной технике яркость изображения может храниться в различных форматах данных.

В работе предполагается, что яркость занимает 8 бит и представляет собой градации серого. Значения яркости находятся в диапазоне от 0 (чёрный цвет) до 255 (белый цвет). Пример цифрового полутонового изображения представлен на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Пример цифрового полутонового изображения

Учитывая, что цифровое изображение – дискретный двумерный сигнал, множество его значений можно представить в виде матрицы.

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} f(1,1) & \dots & f(1,N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f(M,1) & \dots & f(M,N) \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Элементы матрицы представляют собой значения яркостей пикселей. Размер матрицы $M \times N$ представляет собой разрешение изображения.

1.2 Задача сжатия изображений

В области обработки изображений особенно остро стоят вопросы выявления информационной избыточности и разработки методов её устранения.

Исследователями было создано множество методов сжатия неподвижных изображений. Эти методы обладают различной эффективностью и различной вычислительной сложностью, что позволяет находить решение для очень широкого спектра задач[44].

Задача сжатия изображений актуальна во многих областях, таких как передача, обработка и хранение документов, медицинских изображений, обработка снимков, полученных средствами дистанционного зондирования Земли, видеоконференции, управление летательными аппаратами, подготовка огромных обучающих наборов данных для обучения нейросетей.

Задача сжатия данных подразумевает устранение информационной избыточности[37,50]. При сжатии изображений выделяют визуальную, межэлементную и кодовую избыточность. Независимо от вида избыточности и способа её устранения мерой сжатия данных может служить коэффициент сжатия C_R (1.2):

$$C_R = \frac{n_1}{n_2}, \quad (1.2)$$

где n_1 – число элементов носителей информации (например, бит или байт) исходного набора данных, n_2 – число элементов носителей информации конечного набора данных. Для изображений схожей с коэффициентом сжатия метрикой может быть количество бит, приходящееся на 1 пиксель в сжатом виде (1.3):

$$bpp = \frac{n_2}{N*M}, \quad (1.3)$$

где N, M – высота и ширина исходного изображения в пикселях.

Для сжатия и передачи изображений существует общепринятая модель, изображённая на рисунке 1.2.

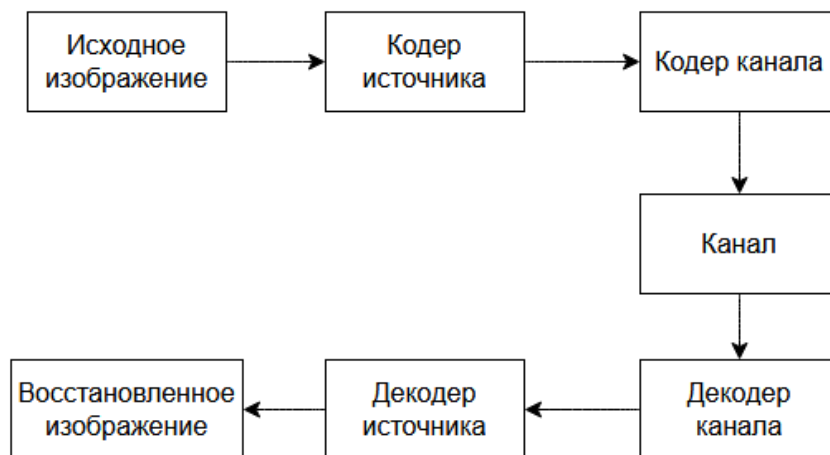


Рисунок 1.2 – Модель сжатия и восстановления изображения

Кодер источника устраняет информационную избыточность исходного изображения. Подавляющее большинство алгоритмов сжатия изображений являются кодерами источника[95]. Кодер канала направлен на увеличение помехоустойчивости передаваемого каналу сигнала. В общем случае предполагается, что в канале могут присутствовать шумы различной природы.

В зависимости от задач и вычислительных возможностей передающего и принимающего оборудования к алгоритмам сжатия могут предъявляться различные требования[54]. Например, если на передающей стороне устройство имеет существенные ограничения по производительности, то алгоритм сжатия должен содержать минимальные с точки зрения вычислительной сложности методы преобразования данных.

В условиях ограничений на время сжатия и на время доступа или отображения изображений важной характеристикой может оказаться симметричность алгоритма (1.4):

$$S = \frac{t_1}{t_2}, \quad (1.4)$$

Где t_1 – время, затрачиваемое кодирование источника, t_2 – время, затрачиваемое на декодирование источника. Чем ближе характеристика S к значению 1, тем симметричнее алгоритм.

В зависимости от точности отображения на приёмной стороне выделяют сжатие без потерь и сжатие с потерями, или компрессию изображения[2,4,89].

Сжатие без потерь предполагает точное воспроизведение результатов на приёмной стороне. Подобный подход важен в задачах, где сохранение деталей изображения играет очень важную роль.

Сжатие данных без потерь обеспечивают такие алгоритмы как, LZ77, LZ78, LZW, Deflate, алгоритмы, основанные на кодировании Хаффмана, арифметическое кодирование. Алгоритм LZW используется в таких графических форматах, как GIF, TIFF. Алгоритм Deflate нашёл применение в формате PNG, а также используется в стандарте PDF. Методы арифметического кодирования только недавно стали доступны широкому

кругу исследователей ввиду патентных ограничений. Распространён подход использования сжатия без потерь в качестве составных частей алгоритмов сжатия с потерями. Алгоритмы сжатия без потерь обеспечивают наивысшее качество восстановления, однако отличаются сравнительно невысокими степенями сжатия, в среднем до 4 раз.

Значительно больших степеней сжатия (10-20 раз) можно добиться, применяя алгоритмы сжатия с потерями. Среди подходов к сжатию с потерями можно выделить методы кодирования с предсказанием, квантования, а также методы трансформационного кодирования.

Потери в визуальном качестве являются прямым следствием использования данных методов. Устранение большого количества информации без возможности восстановления может привести к искажениям получаемого изображения. Подобные искажения, называемые артефактами сжатия, проявляются систематически, вид их зависит от используемого преобразования (в случае трансформационных методов), а также точности квантования и кодирования.

1.3 Алгоритмы сжатия изображений

В настоящее время разработано множество алгоритмов сжатия изображений с потерями, наиболее популярными из них являются JPEG, JPEG2000, WebP.

1.3.1 Алгоритм JPEG

Название алгоритма совпадает с названием организации-разработчика - Joint Photographic Experts Group (Объединённая группа экспертов в области фотографии).

Последовательность действий при сжатии по алгоритму JPEG приведена на рисунке 1.3.

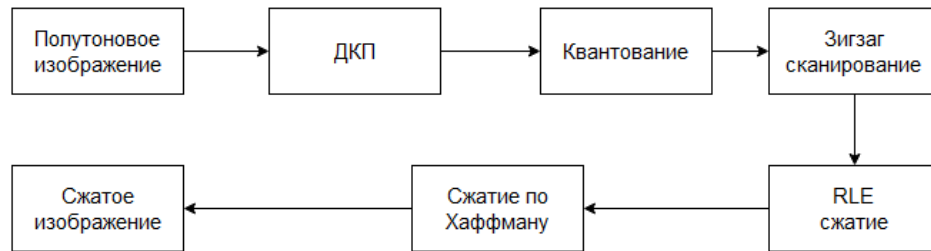


Рисунок 1.3 – Сжатие JPEG

Первый этап обработки изображения – переход от цветовой модели RGB к YUV. YUV состоит из яркостной компоненты Y и двух цветоразностных компонент U и V. Применяемое в JPEG цифровое представление YUV – формат YCbCr. Компоненты формата из исходных R, G, B значений можно получить по следующим формулам (1.5), (1.6), (1.7):

$$Y = 0 + (0.299 * R) + (0.587 * G) + (0.114 * B), \quad (1.5)$$

$$Cb = 128 - (0.168736 * R) - (0.331264 * G) + (0.5 * B), \quad (1.6)$$

$$Cr = 128 + (0.5 * R) - (0.418688 * G) - (0.081312 * B). \quad (1.7)$$

Цветоразностные компоненты подвергаются прореживанию, которое может быть реализовано по следующему принципу: каждому блоку размером 2×2 присваиваются, а затем хранятся для каждого блока вместо исходных значений, усреднённые значения Cr и Cb (схема «4:2:0»). Возможны и другие принципы хранения цветоразностных компонент [16,81].

Особое внимание следует уделить процессу сжатия яркостной компоненты Y, которая соответствует полутонному изображению I.

Для сокращения абсолютного значения постоянных составляющих спектров ДКП значения пикселей исходного изображения смещают в сторону нулевого среднего (1.8):

$$I_0 = I - 128. \quad (1.8)$$

Матрицы компонентов Y, Cb, Cr делятся на блоки размером 8×8 пикселей. Для каждого блока рассчитываются спектры ДКП (1.9):

$$D(u, v) = C I_{08} C^T, \quad (1.9)$$

где $\mathbf{I}_{08}$ – блок изображения размером 8×8 , $\mathbf{C}$ и $\mathbf{C}^T$ – матрицы двумерного преобразования (1.10), (1.11).

$$\mathbf{C}(u, v) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{N}}, u = 1 \\ \sqrt{\frac{2}{N}} \cos \left[\frac{(u-1)(2v-1)\pi}{2N} \right], v \neq 1 \end{cases}, \quad (1.10)$$

$$\mathbf{C}^T(u, v) = \sqrt{\frac{2}{N}} \cos \left[\frac{(2u-1)(v-1)\pi}{2N} \right]. \quad (1.11)$$

Полученные спектры ДКП подвергаются квантованию. Квантование в данном случае может быть реализовано как поэлементное деление составляющих ДКП на заданную заранее (и часто хранящуюся в файле изображения) матрицу квантования:

$$\mathbf{Q}_D = \text{round} \left(\frac{\mathbf{D}(u, v)}{\mathbf{Q}(u, v)} \right), \quad (1.12)$$

где $\mathbf{Q}_D$ – матрица квантования. Для компонент Y и Cb , Cr матрицы квантования в общем случае разные. Пример стандартной матрицы для яркостных компонент представлен формулой (1.13).

$$\mathbf{Q}_D = \begin{bmatrix} 16 & 11 & 10 & 16 & 24 & 40 & 51 & 61 \\ 12 & 12 & 14 & 19 & 26 & 58 & 60 & 55 \\ 14 & 13 & 16 & 24 & 40 & 57 & 69 & 56 \\ 14 & 17 & 22 & 29 & 51 & 87 & 80 & 62 \\ 18 & 22 & 37 & 56 & 68 & 109 & 103 & 77 \\ 14 & 35 & 55 & 64 & 81 & 104 & 113 & 92 \\ 49 & 64 & 78 & 87 & 103 & 121 & 120 & 101 \\ 72 & 92 & 95 & 98 & 112 & 100 & 103 & 99 \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

Далее блоки ДКП преобразуются в вектор с помощью «зигзаг сканирования» – принципа обхода элементов ДКП, учитывающего распределение высокочастотных квантованных составляющих, которые равны нулю[92]. Благодаря данному принципу обхода есть возможность получить длинные последовательности нулевых элементов, которые затем целесообразно сжимать с помощью кодирования длин серий (Run Length Encoding, RLE). Принцип зигзаг сканирования изображён на рисунке 1.4.

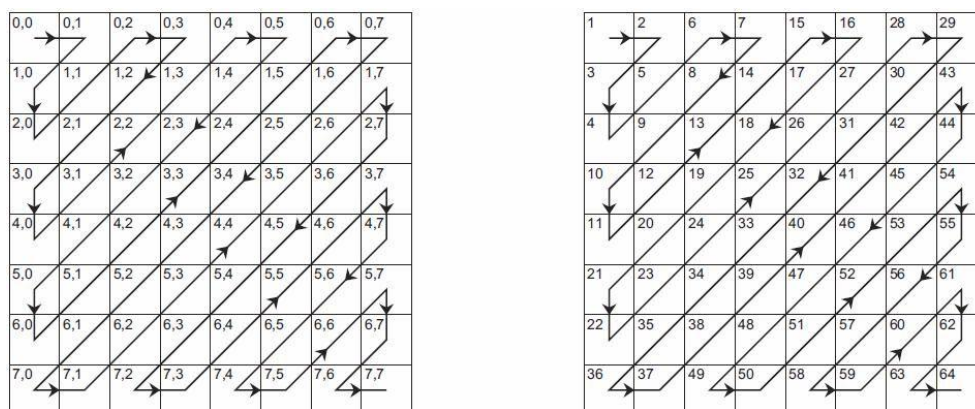


Рисунок 1.4 – Демонстрация принципа «зиг-заг сканирования»

Особое место в кодировании занимают низкочастотные составляющие (DC) блоков, на рисунке 1.4 они обозначены координатой (0,0) или номером 1. Эти составляющие кодируются с помощью принципов дельта-кодирования. За основу выбирается значение DC первого блока, значения DC остальных блоков хранятся в виде разности с первым блоком. Подобный подход позволяет снизить амплитудный диапазон низкочастотных составляющих, что позволит сократить словарь используемого далее кодирования по Хаффману[26].

Высокочастотные значения (AC) кодируются с помощью алгоритма RLE. Длинные последовательности одинаковых значений кодируются значением и количеством повторений этого значения. Например, последовательность «0 0 0 0» будет закодирована в RLE как «0 4».

Преобразованные посредством дельта-кодирования и RLE значения блоков ДПКМ кодируются с помощью алгоритма Хаффмана.

Классический алгоритм Хаффмана на начальном этапе рассчитывает таблицу частот встречаемости символов в сообщении. Далее на основании этой таблицы строится дерево кодирования Хаффмана (H-дерево).

1. Символы входного алфавита образуют список свободных узлов. Каждый лист имеет вес, который может быть равен либо вероятности, либо количеству вхождений символа в сжимаемое сообщение.

2. Выбираются два свободных узла дерева с наименьшими весами.
3. Создается их родитель с весом, равным их суммарному весу.
4. Родитель добавляется в список свободных узлов, а два его потомка удаляются из этого списка.
5. Одной дуге, выходящей из родителя, ставится в соответствие бит 1, другой — бит 0. Битовые значения ветвей, исходящих от корня, не зависят от весов потомков.
6. Шаги, начиная со второго, повторяются до тех пор, пока в списке свободных узлов не останется только один свободный узел. Он и будет считаться корнем дерева.

Результатом последовательного выполнения описанных операций является сжатое изображение. Процесс декодирования обратен процессу кодирования.

1.3.2 Алгоритм JPEG2000

В декабре 2000 года появился новый международный стандарт сжатия изображений JPEG 2000, в котором сжатие осуществляется при помощи разложения изображения по базису вейвлетов[58,80].

Схема сжатия изображения с потерями по стандарту JPEG2000 изображена на рисунке 1.5.

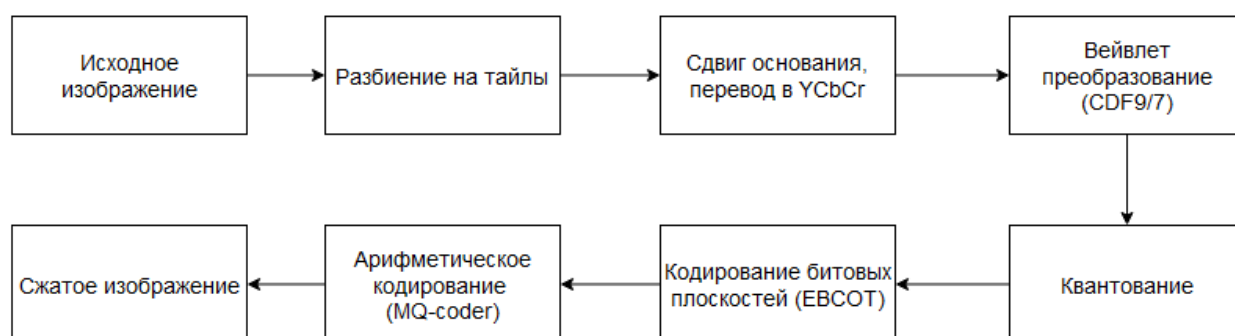


Рисунок 1.5 – Схема сжатия JPEG2000

В случае, если изображение имеет слишком большие размеры, оно разбивается на прямоугольные блоки или тайлы[57]. Данная операция

выполняется в целях экономии памяти и ускорения загрузки из-за возможности независимой обработки тайлов. Однако подобное разбиение может вызвать блочные артефакты, подобные JPEG[87,88].

Сдвиг основания и перевод в формат YCbCr осуществляется подобным JPEG образом (1.5), (1.6), (1.7).

Далее яркостная и цветоразностные компоненты подвергаются дискретному вейвлет-преобразованию (ДВП). ДВП может быть представлено в терминах субполосного кодирования, базирующегося на фильтрах с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтрах)[23,50,59,98].

Схема ДВП, основанная на свёртке, представлена на рисунке 1.6.

Получение аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов Y_L и Y_H соответственно может быть представлено (1.14) и (1.15).

$$Y_L(k) = \sum_n x(n) * h(2k - n) \quad (1.14)$$

$$Y_H(k) = \sum_n x(n) * g(2k - n) \quad (1.15)$$

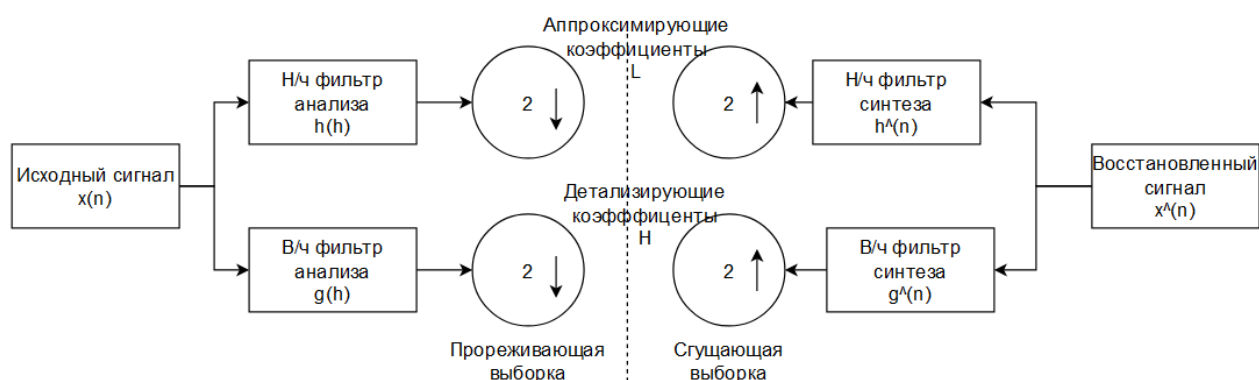


Рисунок 1.6 – Схема ДВП, основанная на свёртке

Восстановленный сигнал $\hat{x}(n)$ в таком случае описывается (1.16).

$$\hat{x}(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left[\left(Y_L(k) * \hat{h}(-n + 2k) \right) + \left(Y_H(k) * \hat{g}(-n + 2k) \right) \right] \quad (1.16)$$

В стандарте JPEG2000 при сжатии с потерями используются банки фильтров с набором коэффициентов, представленным в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Коэффициенты дискретного вейвлет-преобразования

Номер	Фильтры анализа		Фильтры синтеза	
	Низко- частотные $h(n)$	Высоко- частотные $g(n)$	Низко- частотные $\hat{h}(n)$	Высоко- частотные $\hat{g}(n)$
1	0.02674875741	0.0912717631	-0.0912717631	0.02674875741
2	-0.0168641184	-0.0575435262	-0.0575435262	0.0168641184
3	-0.0782232665	-0.5912717631	0.5912717631	-0.0782232665
4	0.2668641184	1.11508705	1.11508705	-0.2668641184
5	0.6029490182	-0.5912717631	0.5912717631	0.602949018236
6	0.26686411844	-0.0575435262	-0.0575435262	-0.26686411844
7	-0.0782232665	0.0912717631	-0.0912717631	-0.0782232665
8	-0.0168641184	-	-	0.0168641184
9	0.02674875741	-	-	0.02674875741

Подобная схема применяется к строкам и столбцам изображения. Аппроксимирующие коэффициенты могут подвергаться преобразованию несколько раз[13]. Пример трёхуровневого ДВП представлен на рисунке 1.7. Коэффициенты ДВП явно разделяются на квадранты, размер этих квадрантов зависит от уровня вейвлет-преобразования (с увеличением уровня размер квадрантов уменьшается вдвое).

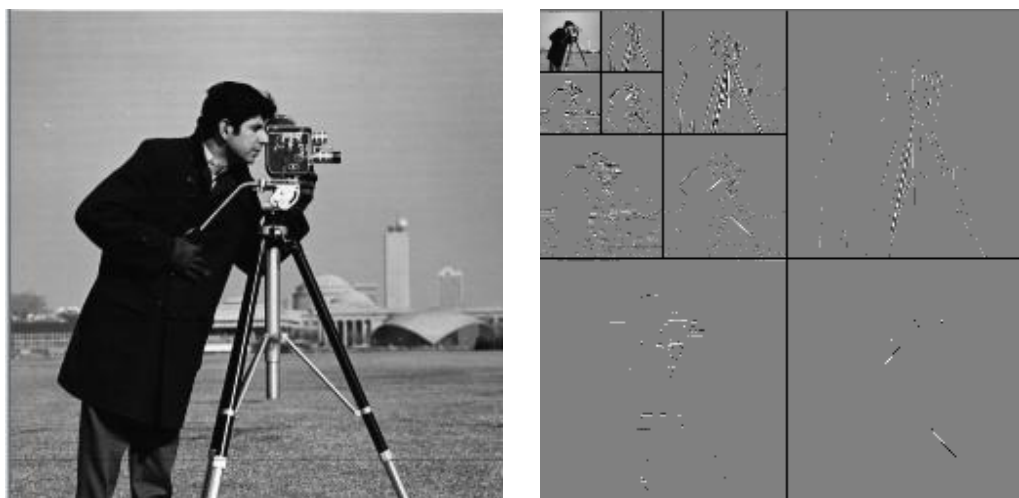


Рисунок 1.7 – Пример трёхуровневого ДВП изображения

Следует отметить, что вычисление дискретного вейвлет-преобразования возможно другими способами, например по схеме лифтинга.

После вейвлет-преобразования составляющие спектра проходят процедуру квантования. В стандарте применяется равномерное квантование с так называемой «мёртвой зоной» вокруг начала координат. Если шаг квантования равен d , то интервал «мёртвой зоны» вокруг нуля равен $2d$ (рисунок 1.8).

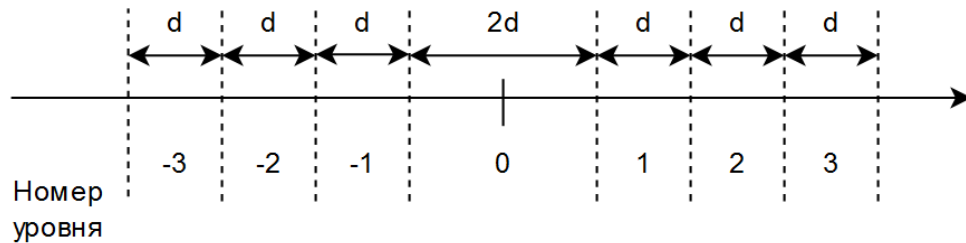


Рисунок 1.8 – Квантование с «мертвой зоной» вокруг нуля

Шаг квантования d вычисляется динамически на основе текущего диапазона – разности максимальной и минимальной составляющей в зависимости от того, в какой части вейвлет-преобразования происходит квантование (аппроксимирующие коэффициенты, вертикальные, горизонтальные, диагональные детализирующие коэффициенты, влияет текущий уровень коэффициентов). Целочисленные коэффициенты квантования вычисляются по формуле (1.17).

$$Q(i, j) = \text{sign}(Y(i, j)) \left\lfloor \frac{|Y(i, j)|}{d} \right\rfloor, \quad (1.17)$$

где $Y(i, j)$ – одна из составляющих коэффициентов вейвлет преобразования.

Далее квантованные коэффициенты делятся на блоки переменного размера в зависимости квадрантов коэффициентов вейвлет-преобразования, однако внутри квадранта блоки должны быть одного размера.

Блоки кодируются с применением алгоритма встроенного блочного кодирования с оптимизированным усечением (Embedded block coding with optimized truncation, EBCOT)[15,19,20,98].

Обход каждого блока происходит по следующей схеме: значения делятся на полосы по 4 строки, каждый столбец полосы обходится сверху вниз слева направо (рисунок 1.9).

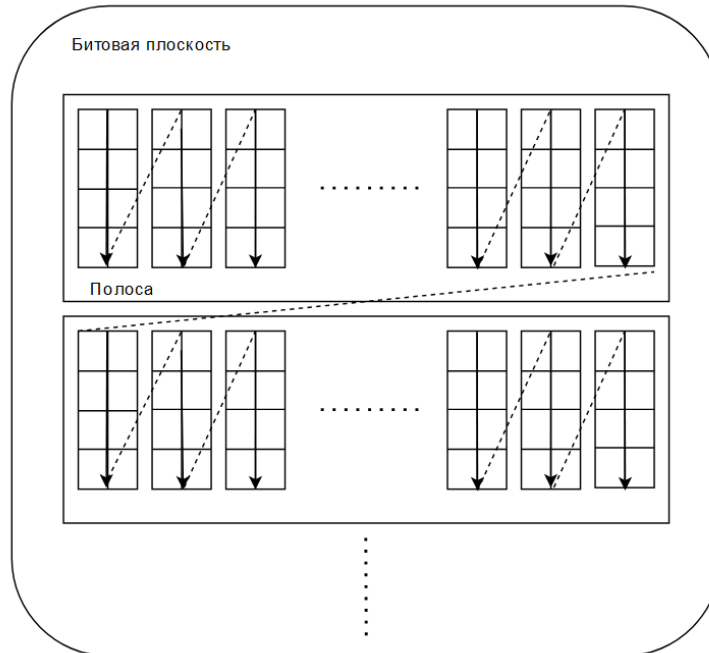


Рисунок 1.9 – Порядок обхода блока

При кодировании блоки разбиваются на битовые плоскости, одна из них составляет знаки коэффициентов квантования, а остальные – разряды номеров уровней. Плоскость знаков будет иметь обозначение χ , а разрядные битовые плоскости – v^P , где P – номера разряда.

Разрядные битовые плоскости кодируются от наиболее значимой (most significant bit-plane, MSB) до наименее значимой (least significant bit-plane (LSB)). Если битовая плоскость не содержит битов, равных единице, значащих битов, то при кодировании она пропускается, а её номер записывается в дескрипторе блока. Первой кодируемой плоскостью MSB становится плоскость, имеющая хотя бы один значащий бит.

Результатом кодирования плоскостей становится набор пар (CX, D), где CX – число, характеризующее контекст бита, то есть информацию о виде кодирования, а также о значении соседних бит, о знаке или о позиции

значащего бита. D – бит решения, определяющий значение бита, знак или позицию значащего бита в зависимости от контекста.

Алгоритм EBCOT включает 4 вида кодирования: нулевое кодирование (Zero coding, ZC), кодирование знаков (Sign coding, SC), кодирование уточнения значения (Magnitude Refinement Coding, MRC), кодирование длин серий (Run-Length Coding, RLC).

Значения CX закреплены за каждым видом кодирования (таблица 1.2).

Таблица 1.2 Значение CX в зависимости от вида кодирования

Вид кодирования	Значение CX	Вид кодирования	Значение CX
ZC	0	SC	9
	1		10
	2		11
	3		12
	4		13
	5	MRC	14
	6		15
	7		16
	8	RLC	17
		UNIFORM	18

Для кодирования создаются три вспомогательных битовых таблицы размером, равным размеру блока: σ, σ', η .

В таблице σ единицами помечаются позиции блока, в которых самый старший бит значения уже закодирован.

В таблице σ' единицами помечаются позиции блока, к которым было применено кодирование MRC.

Таблица η учитывает все биты плоскости, к которым было применено кодирование ZC на проходе распространения значимости. Следует отметить, что при переходе к другой битовой плоскости значения таблицы η обнуляются, в отличие от двух предыдущих, которые на первом шаге

инициализируются нулями и сохраняют свои значения до конца кодирования всех битовых плоскостей блока.

Этап нулевого кодирования формирует значения контекста CX в зависимости от значений соседей бита X в таблице σ (рисунок 1.10).

D_0	V_0	D_1
H_0	X	H_1
D_3	V_1	D_2

Рисунок 1.10 – Обозначение соседей бита X в таблице σ

Если бит X находится на границе таблицы, значения, выходящие за границу, принимаются равными 0. Примеры значений CX нулевого кодирования для низкочастотных и горизонтальных высокочастотных компонент приведён в таблице 1.3. Символ «х» в таблице означает, что в данном случае сумма указанных компонент не имеет значения.

Таблица 1.3 Пример таблицы значений CX при кодировании ZC

$\sum H$	$\sum V$	$\sum D$	CX
2	х	х	8
1	≥ 1	х	7
1	0	≥ 1	6
1	0	0	5
0	2	х	4
0	1	х	3
0	0	≥ 2	2
0	0	1	1
0	0	0	0

Значение бита решения D при ZC равно $v^P(m, n)$, где m, n – номера строки и столбца кодируемого бита.

Кодирование знака SC для значения битовой плоскости определяется параметрами H и V (1.18), (1.19).

$$H = \min \left(1, \max \left(\begin{array}{l} -1, \sigma(m, n-1) \times (1 - 2\chi(m, n-1)) + \\ + \sigma(m, n+1) \times (1 - 2\chi(m, n+1)) \end{array} \right) \right) \quad (1.18)$$

$$V = \min \left(1, \max \left(\begin{array}{l} -1, \sigma(m-1, n) \times (1 - 2\chi(m-1, n)) + \\ + \sigma(m+1, n) \times (1 - 2\chi(m+1, n)) \end{array} \right) \right) \quad (1.19)$$

Возможные значения H и V можно интерпретировать следующим образом:

- 0 означает ситуацию, когда оба соседа незначимы или оба соседа значимы, но имеют разные знаки;
- 1 означает ситуацию, когда оба или один из соседей значимый, при этом у значимых соседей знак положительный.
- -1 означает ситуацию, когда оба или один из соседей значимый, при этом у значимых соседей знак отрицательный.

Значения CX и D при SC определяются в соответствии с таблицей 1.4, причём $D = \chi(m, n) \oplus \hat{\chi}$.

Таблица 1.4 Значения CX и $\hat{\chi}$ при SC

H	V	$\hat{\chi}$	CX
1	1	0	13
1	0	0	12
1	-1	0	11
0	1	0	10
0	0	0	9
0	-1	1	10
-1	1	1	11
-1	0	1	12
-1	-1	1	13

Кодирование уточнения величины MRC формирует значение CX в зависимости от значения в таблице σ' и суммы элементов соседей в таблице σ . Условия получения тех или иных значений CX представлены в таблице 1.5.

Значение бита решения D при MRP равно $v^P(m, n)$, где m, n – номера строки и столбца кодируемого бита.

Таблица 1.5 Значения CX при MRC

$\sigma'(m, n)$	$\sigma(m-1, n) + \sigma(m+1, n) +$ $+ \sigma(m, n-1) + \sigma(m, n+1) +$ $+ \sigma(m-1, n-1) + \sigma(m-1, n+1) +$ $+ \sigma(m+1, n-1) + \sigma(m+1, n+1)$	CX
1	не имеет значения	16
0	≥ 1	15
0	0	14

Кодирование RLC предполагает обработку 4 бит сразу в порядке обхода, то есть всех значений одного столбца полосы. Первое значение CX, будет равно 17, соответствующее ему значение D будет равно 0, если все значения в столбце полосы равны 0, иначе 1. Если в столбце есть хотя бы одно значение 1, то номер первого такого значения (00, 01, 10 или 11) будет указан в следующих двух битах D двух пар (CX, D) с CX = 18 («UNIFORM»).

Кодирование каждой битовой плоскости v^P , кроме плоскости MSB, предполагает три прохода: проход распространения значимости (significance propagation pass, SPP), проход уточнения величины (magnitude refinement pass, MRP), проход очистки (cleanup pass, CUP). Для плоскости MSB выполняется только проход CUP. Значение кодируемого бита будет обозначаться как $v^P(m, n)$.

Проход SPP выполняется следующим образом: ZC применяется к текущему биту, если хотя бы один из его соседей в плоскости v^P равен 1, а его значение в таблице σ равно нулю. Признак кодирования ZC для текущего бита помечается занесением 1 в $\eta(m, n)$. Если $v^P(m, n) = 1$, то после ZC выполняется SC, а значению $\sigma(m, n)$ присваивается единица. Если условия ZC не выполняются, происходит переход к следующему биту в порядке обхода.

Проход MRP предполагает проход по всем битам плоскости. В случае, если $\sigma(m, n) = 1$ и $\eta(m, n) = 0$, то к биту $v^P(m, n)$ применяется MRC, а в $\sigma'(m, n)$ записывается единица.

Проход CUP включает в себя следующие шаги.

1. Выполняется проверка: $\sigma(m, n) = 0$ и $\eta(m, n) = 0$. В случае наличия единицы в одной из таблиц в указанном месте происходит переход к следующему биту.

2. Проверка на возможность применения RLC:

2.1 m – множитель числа 4 (включая 0);

2.2 $\sigma = 0$ для 4 последовательных бит в столбце, начиная со стартовой позиции;

2.3 $\sigma = 0$ для всех прилегающих соседей всех 4-х бит в столбце.

3. Если все условия истинны, применяется RLC. В противном случае применяется ZC.

4. Если $v^P(m, n) = 1$ то к данному биту применяется SC, а в $\sigma(m, n)$ заносится 1.

5. В конце прохода происходит присваивание нулей всем значениям в таблице η .

Пары значений (CX, D) передаются для кодирования с помощью MQ-кодера. MQ-кодер является адаптивным бинарным арифметическим кодером[12, 21, 22, 25-27, 98].

MQ-кодер позволяет представлять вероятности с конечной точностью с помощью процедуры ренормализации. Кроме того, аппроксимация вероятностных интервалов позволяют избежать операций умножения в процессе уточнения вероятностей. Обобщённая схема MQ-кодера изображена на рисунке 1.11 .

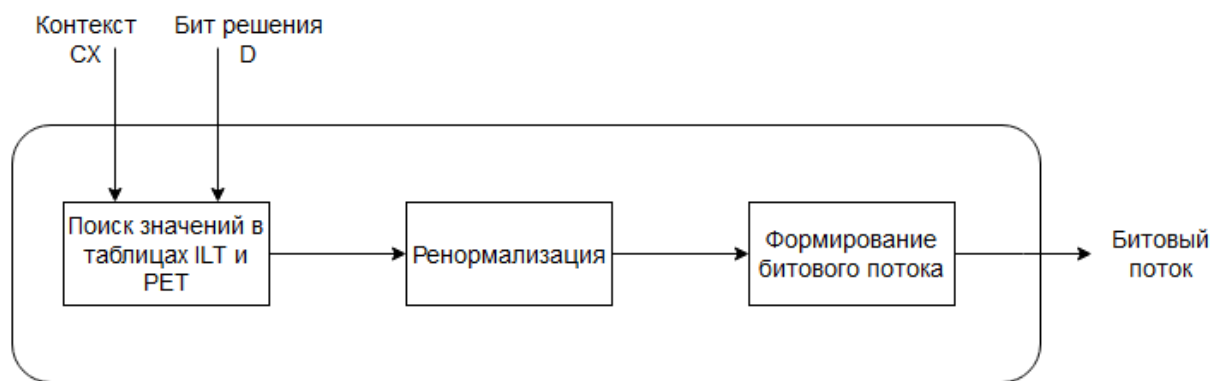


Рисунок 1.11 – Обобщённая схема MQ-кодера

Данные могут быть представлены значениям «0» и «1», однако при кодировании они принимают значения MPS и LPS (наиболее и наименее вероятного символа, most probable symbol, least probable symbol). Причём в зависимости от текущих значений вероятностей, может быть произведена перестановка значений MPS и LPS. Поиск необходимых значений интервалов вероятностей осуществляется в заранее заданных таблицах поиска индекса и оценки вероятностей (index lookup table, ILT, probability estimation table, PET).

Кодирование осуществляется с помощью двух 32-битных регистров, А (регистр интервала арифметического кодирования) и С (регистр значений), структура которых изображена на рисунке 1.12.

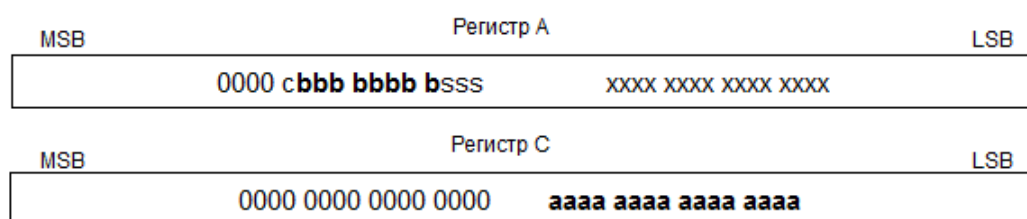


Рисунок 1.12 – Структура регистров А и С

Символами «а» на рисунке 1.12 обозначено текущее значение дробной части интервала арифметического кодирования, символами «х» - дробная часть регистра С. Символами «s» обозначены служебные биты, обеспечивающие защиту от переноса в старшие разряды. Символом «с» обозначен бит переполнения. Символами «b» обозначены биты, формирующие выходные значения битового потока.

1.3.3 Алгоритм WebP

WebP - это формат, реализующий сжатие изображений. Цель создания алгоритма – эффективная передача изображений по сети Интернет, уменьшение объёма памяти, требуемого для веб-страниц.

Программное обеспечение, связанное с WebP, выпускается под лицензией свободного ПО BSD, формат сжатия является открытым.

Формат позиционируется компанией Google как открытый стандарт для сжатия цветных изображений с потерями и без. Согласно измерениям Google, WebP приводит к уменьшению размера файла на 25% при сжатии по сравнению с PNG и на 25-34% по сравнению с JPEG при схожем качестве восстановленных изображений.

Сжатие состоит из двух этапов. На первом делается попытка «предсказать» содержимое одних блоков по уже декодированным (три блока над текущим и один блок слева от него), на втором кодируется ошибка предсказания. Блоки обрабатываются в порядке слева направо и сверху вниз. Режимы предсказания работают с 3 размерами макроблоков:

- 4x4 в канале яркости;
- 16x16 в канале яркости;
- 8x8 в канале цветности;

Для сжатия ошибок предсказания и подблоков, которые не были предсказаны, используется дискретное косинусное преобразование DCT (и иногда преобразование Уолша—Адамара, WHT). Оба преобразования работают с подблоками размером 4x4 пикселя. Реализация преобразований выполнена на представлении чисел с фиксированной точностью, чтобы уменьшить ошибки округления. Коэффициенты DCT и WHT кодируются с помощью алгоритмов арифметического сжатия.

В настоящее время просмотр изображений в формате WebP поддерживается большинством современных браузеров.

1.4 Достоинства и недостатки алгоритмов сжатия изображений

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[85]. Демонстрация артефактов сжатия JPEG приведена на рисунке 1.13.



а)

б)

Рисунок 1.13 – Артефакты сжатия JPEG

а) Исходное изображение, 8 бит/пиксель

б) Сжатое изображение 0,3 бит/пиксель

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 1.14.



а)



б)

Рисунок 1.14 – 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, множество модификаций стандарта сжатия для различных задач (хранение записей фильмов, широковещательная 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 1.15).



Рисунок 1.15 – Сравнение артефактов JPEG и JPEG2000 (сжатие в 20 раз)

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

Также существенным недостатком JPEG2000 является значительное 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.

1.5 Выводы по главе

На основании представленных в главе сведений можно сделать вывод о том, что в настоящее время научная область сжатия изображений развивается, существует множество алгоритмов сжатия с потерями и без.

Основными характеристиками современных алгоритмов являются 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.

Для разработки подобных методов и алгоритмов сжатия необходимо произвести исследования, направленные на поиск минимальных с точки зрения вычислительных затрат и времени обработки преобразований, а также на возможности применения методов устранения информационной избыточности в пространствах исследуемых преобразований.

2 ОРТОГОНАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

2.1 Представление изображений с использованием нетригонометрических ортогональных преобразований

Множество непрерывных функций действительного переменного $\{u_n(t)\} = \{u_0(t), u_1(t), \dots\}$ называется ортогональным на интервале $(t_0, t_0 + T)$, если

$$\int_{t_0}^{t_0+T} u_m(t)u_n(t)dt = \begin{cases} c, & \text{если } m = n, \\ 0, & \text{если } m \neq n \end{cases} \quad (2.1)$$

При $c = 1$ множество $\{u_n(t)\}$ называется ортонормированным.

Предположим, что $x(t)$ — действительный сигнал, заданный на интервале $(t_0, t_0 + T)$ и представленный в виде ряда

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n u_n(t) \quad (2.2)$$

где a_n представляет собой n -ый коэффициент разложения. Для того, чтобы найти a_n , достаточно обе части умножить на $u_m(t)$ и проинтегрировать в пределах $(t_0, t_0 + T)$:

$$\int_{t_0}^{t_0+T} x(t)u_m(t)dt = \int_{t_0}^{t_0+T} \sum_{n=0}^{\infty} a_n u_n(t) u_m(t)dt. \quad (2.3)$$

С учётом (2.1) получаем

$$a_m = \frac{1}{c} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t)u_m(t)dt, \quad m = 0, 1, \dots \quad (2.4)$$

Учитывая (2.1), можно сказать, что разложение по ортогональным функциям даёт возможность представить $x(t)$ в виде бесконечного счётного множества чисел $\{a_0, a_1, a_2, \dots\}$. Когда множество $\{u_n(t)\}$ является полным [36], такое представление возможно в виде конечного множества чисел.

Распространим данные определения на дискретные функции нескольких переменных.

Множество ортонормированных функций в таком случае примет вид (2.5):

$$\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \phi_{(u_1, v_1)}(i, j) \phi_{(u_2, v_2)}(i, j) = \delta_{u_1, v_1, u_2, v_2}, \quad (2.5)$$

где $\delta_{u_1, v_1, u_2, v_2} = \begin{cases} 1, & \text{если } u_1 = u_2 \text{ и } v_1 = v_2, \\ 0, & \text{если } u_1 \neq u_2 \text{ и } v_1 \neq v_2. \end{cases}$ есть двумерный вариант символа Кронекера.

Учитывая, что изображение представляется двумерной дискретной функцией, к нему может быть применен аппарат ортогональных унитарных преобразований [36,57]. Преобразование является унитарным, если выполняются условия ортогональности (2.5).

В результате прямого унитарного преобразования матрицы изображения $\mathbf{I}$ (1.1) размером $N \times N$ образуется матрица преобразованного изображения того же размера, элементы которой по определению равны

$$\mathbf{F}(u, v) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \mathbf{I}(i, j) \phi_{(u,v)}(i, j), \quad (2.6)$$

где $\phi_{(u,v)}(i, j)$ – множество ортонормированных функций, называемое также ядром прямого преобразования; u, v – переменные пространства преобразования.

Исходное изображение можно получить с помощью обратного преобразования, описываемого соотношением

$$\mathbf{I}(i, j) = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} \mathbf{F}(u, v) \phi_{(i,j)}^{-1}(u, v), \quad (2.7)$$

где $\phi_{(i,j)}^{-1}(u, v)$ – ядро обратного преобразования.

Преобразование называют разделимым, если оба его ядра можно представить в следующей форме:

$$\phi_{(u,v)}(i, j) = \phi_u(i) \cdot \phi_v(j), \quad (2.8)$$

$$\phi_{(i,j)}^{-1}(u, v) = \phi_i^{-1}(u) \cdot \phi_j^{-1}(v). \quad (2.9)$$

В (2.8) и (2.9) разделение происходит на одномерные операторы преобразования столбцов i и строк j пространства исходного изображения в случае прямого преобразования; в случае обратного преобразования разделение выполняется по столбцам u и строкам v пространства преобразования.

Результат воздействия оператора разделимого двумерного унитарного преобразования можно находить в два этапа. Сначала выполняется одномерное преобразование по всем столбцам матрицы изображения, при этом образуется матрица с элементами

$$\mathbf{P}(u, j) = \sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{I}(i, j) \phi_u(i). \quad (2.10)$$

Затем выполняется второе одномерное преобразование по всем строкам полученной матрицы, в результате которого образуется массив чисел вида

$$\mathbf{F}(u, v) = \sum_{j=0}^{N-1} \mathbf{P}(u, j) \phi_v(j). \quad (2.11)$$

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

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

В процессе дальнейшего изложения интерес будет представлять второй случай.

2.2 Обобщенные дискретные преобразования Виленкина-Крестенсона

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. В качестве базиса функции имеет смысл рассмотреть систему функций, которые предложил Виленкин и более детально изучил Крестенсон, и получивших название функций Виленкина-Крестенсона (ВКФ) [8,9,34,69,73,75,86].

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:

$$VKF(p, x) = w^{\sum_{i=1}^n p_i x_i}, \quad (2.12)$$

где $w = e^{j(2\pi/m)}$, 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:

$$def(p, x) = e^{j(2\pi/N)px}.$$

Исследование вопросов использования ДЭФ для построения дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и применением функций Уолша для обработки изображений, можно найти в различных источниках [49,77,94,97,99]. Исследование всех 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.

2.3 Нетригонометрические ортогональные базисные функции в задачах сжатия изображений

Рассмотрим функции Уолша. Данные функции принимают только два значения $\{-1, 1\}$. Поскольку при дискретном спектральном анализе сигналов с N отсчетами число спектральных составляющих должно быть равно N , поэтому число функций [94], включаемых в систему, обычно равно числу отсчетов каждой функции [77].

В зависимости от упорядочивания функции Уолша имеют разные названия и свойства [40,82,93]. Рассмотрим основные из них:

1. Система функций Уолша-Адамара. При $N = 1$ элементарная матрица Адамара примет вид: $\mathbf{H}_1 = 1$. При $N = 2$ матрица примет вид (2.13):

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

$$\mathbf{H}_4 = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_2 & \mathbf{H}_2 \\ \mathbf{H}_2 & -\mathbf{H}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

Тогда для $N = 2^n$ матрица Адамара примет вид:

$$\mathbf{H}_{2^n} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{2^{n-1}} & \mathbf{H}_{2^{n-1}} \\ \mathbf{H}_{2^{n-1}} & -\mathbf{H}_{2^{n-1}} \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

Из (2.14) можно сделать вывод: матрица Адамара есть кронекеровское произведение матриц:

$$\mathbf{H}_{2^n} = \mathbf{H}_{2^{n-1}} \times \mathbf{H}_2, \quad (2.16)$$

где $\mathbf{H}_{2^{n-1}} = \mathbf{H}_{2^{n-2}} \times \mathbf{H}_2$ и тогда:

$$\mathbf{H}_{2^n} = \mathbf{H}_2^{[n]} \quad (2.17)$$

Матрица Уолша-Адамара является симметрической.

2. Система функций Уолша-Пэли. Она может быть получена из системы Уолша-Адамара путём двоичной инверсии номеров функций.

Так, например, если номер функции в системе Уолша-Адамара при $N = 4$ равен 2 (10_2), то в системе Уолша-Пэли эта функция будет иметь номер 1 (01_2).

Для $N = 1$ и $N = 2$ матрица Уолша Пэли будет иметь тот же вид что и матрица Уолша-Адамара (2.14).

Для $N = 4$ необходимо каждую строку матрицы записать дважды, а затем к первой из них справа приписать те же элементы, а ко второй – противоположные (2.18):

$$P_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.18)$$

Эта матрица также является симметрической.

3. Система Уолша. Матрица этой системы по-прежнему является симметрической.

При данном упорядочении номера функций возрастают с увеличением количества знакоперемен в области определения. То есть можно сказать, что упорядочение по Уолшу – это упорядочение по увеличению обобщённой частоты или секвенты.

Чтобы получить номер функции в упорядочении по Уолшу при известном номере функции в упорядочении по Уолшу-Пэли, необходимо получить обратный код Грея от номера функции по Уолшу-Пэли:

$$w_i = (p_i \oplus p_{i-1} \oplus \dots \oplus p_1)_2, p_0 = 0,$$

где p_{i-k} – исходный номер функции в системе Уолша-Пэли с логическим сдвигом на k разрядов вправо.

На рисунке 2.1 показана строка исходного сигнала (строка изображения) после представления в виде функций Уолша в различных упорядочениях.

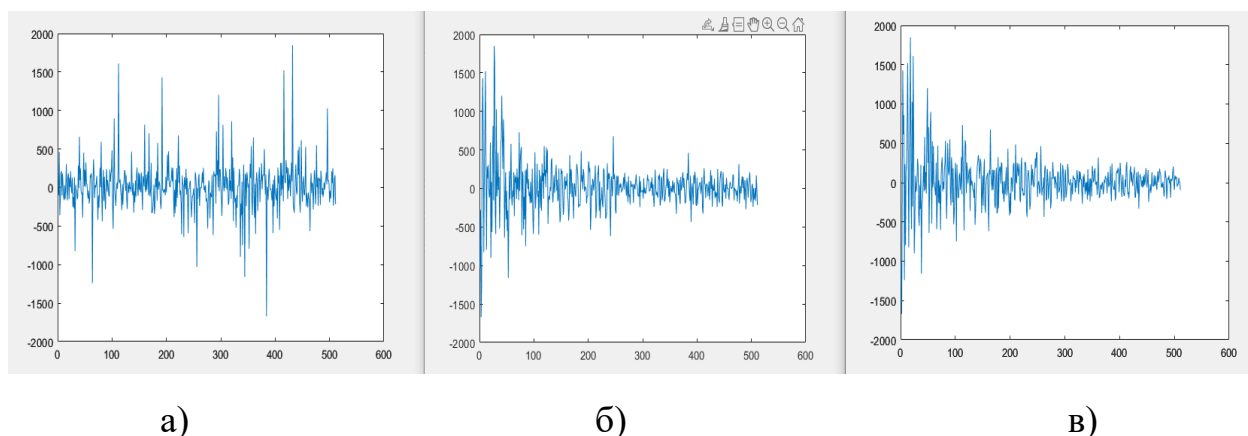


Рисунок 2.1 – Строки исходного сигнала после преобразования Уолша:

а) упорядочение по Уолшу-Адамару,

б) упорядочение по Уолшу-Пэли,

в) упорядочение по Уолшу

При визуальной оценке рисунка 2.1 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[63,74].

2.3.1 Двумерное и квазидвумерное преобразование Уолша

Прямое и обратное преобразование необходимо выполнить для преобразования сигнала из пространственной области в частотную и обратно. Например, в матричной форме преобразование Уолша имеет вид:

$$\mathbf{F} = \mathbf{H}_w \mathbf{I} \mathbf{H}_w, \quad (2.19)$$

где $\mathbf{I}$ - матрица изображения размерностью $2^n \times 2^n$, $\mathbf{H}_w$ - матрица Уолша размерностью $2^n \times 2^n$, упорядоченная по Адамару, $\mathbf{F}$ - спектр изображения.

Соответственно обратное преобразование примет вид:

$$\mathbf{I} = \frac{1}{N^2} \mathbf{H}_w \mathbf{F} \mathbf{H}_w \quad (2.20)$$

Основными недостатками данного способа преобразования являются:

- выполнение преобразования в два этапа;
- невозможность выполнения процедур второго этапа преобразования до окончания выполнения всех процедур первого этапа;
- необходима дополнительная память для хранения промежуточной матрицы.

Преобразование Уолша является разделимым унитарным преобразованием[35,63,74]. Поэтому можно попытаться преобразовать только

строки матрицы входных данных $[f(n_1, n_2)]$. Введя обозначение: $F_x(u, n_2) = \frac{1}{N_1} \sum_{n_1=0}^{N_1-1} f(n_1, n_2) \cdot (-1)^{\langle n_1, u \rangle}$, можно записать в матричном виде:

$$[F_x(u, n_2)] = \begin{bmatrix} F_x(0,0) & F_x(0,1) & \dots & F_x(0, N_2 - 1) \\ F_x(1,0) & F_x(1,1) & \dots & F_x(1, N_2 - 1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_x(N_1 - 1, 0) & F_x(N_1 - 1, 1) & \dots & F_x(N_1 - 1, N_2 - 1) \end{bmatrix}. \quad (2.21)$$

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

$$\mathbf{F} = \mathbf{H}_w \mathbf{I} \quad (2.22)$$

и обратное:

$$\mathbf{I} = \frac{1}{N} \mathbf{H}_w \mathbf{F}. \quad (2.23)$$

На рисунке 2.2 показан пример квазидвумерного спектра для изображения размером 512x512.

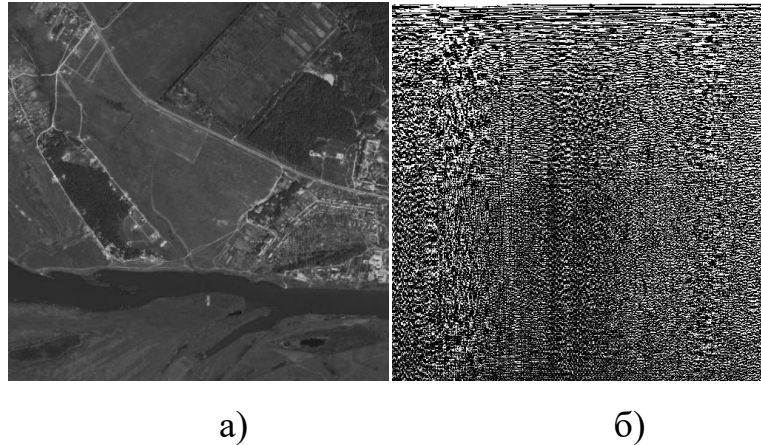


Рисунок 2.2 – Изображение (а) и его квазидвумерный спектр (б)

Вариант отображения спектра, изображённый на рисунке 2.2 белым цветом задаёт положительные компоненты спектра, а чёрным цветом задаёт отрицательные и нулевые компоненты.

2.4 Сравнительный анализ ортогональных систем базисных функций. Выбор систем и размерностей базисных функций с наименьшим временем преобразований

Отдельное место в вопросах обработки изображений занимает задача поиска оптимального преобразования для перехода в спектральное пространство. Также следует учитывать не только вид этого преобразования, но и размерность базиса, которая может значительно повлиять на время перехода от исходного сигнала к его частотному представлению.

В данном разделе рассмотрено несколько преобразований, позволяющих перейти в спектральные пространства.

2.4.1 Дискретное косинусное преобразование (ДКП)

Дискретное косинусное преобразование (ДКП) является преобразованием, которое переводит изображение в пространство косинусных компонент, при этом все операции происходят с действительными числами (2.24):

$$F(u, v) = \frac{2}{N} \alpha(u) \alpha(v) \sum_{x=0}^M \sum_{y=0}^N f(x, y) \cos \left[\frac{(2x+1)u\pi}{2M} \right] \cos \left[\frac{(2y+1)v\pi}{2N} \right], \quad (2.24)$$

где $\alpha(u), \alpha(v) = \frac{1}{\sqrt{2}}$ при $u, v = 0$ и 1 в остальных случаях.

Первые 8 базисных функций ДКП изображены на рисунке 2.3

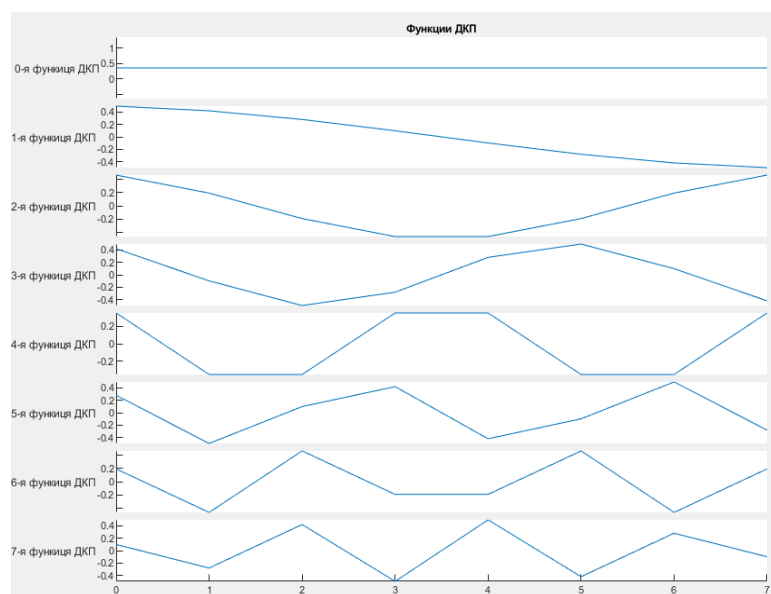


Рисунок 2.3 – Базисные функции ДКП

Данное преобразование нашло широкое применение в алгоритмах сжатия сигналов, таких как JPEG, MPEG, MP3. Причиной распространённости данного преобразования является высокая плотность упаковки информации в малое число коэффициентов[66,84,96].

2.4.2 Преобразование Хаара

Простейшее вейвлет-преобразование (преобразование Хаара) заключается в разложении исходного сигнала по аппроксимирующим и детализирующим функциям $\varphi(x)$ и $\psi(x)$:

$$\varphi(x) = \begin{cases} 1, 0 \leq x < 1, \\ 0, x \notin [0,1) \end{cases} \quad (2.25)$$

$$\psi(x) = \begin{cases} 1, 0 \leq x < \frac{1}{2} \\ -1, \frac{1}{2} \leq x < 1 \\ 0, x \notin [0,1) \end{cases} \quad (2.26)$$

Первые 8 базисных функций системы Хаара изображены на рисунке 2.4.

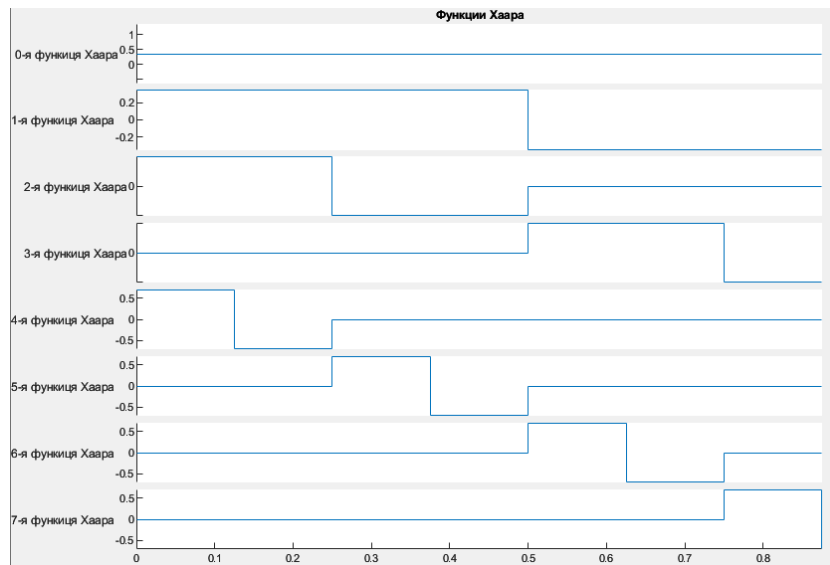


Рисунок 2.4 – Базисные функции системы Хаара

Для двумерного цифрового сигнала преобразование Хаара будет заключаться в нахождении полусумм (аппроксимирующих компонент) и полуразностей (детализирующих компонент) соседних элементов исходного сигнала[29,36,79].

2.4.3 Вейвлет Коэна-Добеши-Фово (CDF)

Вейвлет функции, как и ДКП, способны упаковывать большое количество информации в малое число коэффициентов разложения. Благодаря этим свойствам вейвлеты также нашли применение в алгоритмах сжатия.

Вейвлеты Коэна-Добеши-Фово являются биортогональными, то есть в данном классе вейвлетов функции $\varphi_n(x)$ и $\psi_n(x)$ не обязательно должны быть ортогональны. Однако должны существовать такие функции $\varphi_n^*(x)$ и $\psi_n^*(x)$, что

$$(\varphi_n(x), \varphi_k^*(x)) = \delta_{n,k}, \quad (2.27)$$

$$(\psi_n(x), \psi_k^*(x)) = \delta_{n,k}, \quad (2.28)$$

В данном случае $(\cdot, \cdot)$ – операция скалярного произведения функций.

Базисы со свойствами (2.27) и (2.28) называют взаимными или биортогональными.

Масштабирующие и вейвлет функции можно представить как:

$$\varphi(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k \varphi(2x - k), \quad (2.29)$$

$$\varphi^*(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k^* \varphi^*(2x - k), \quad (2.30)$$

$$\psi(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_k \psi(2x - k), \quad (2.31)$$

$$\psi^*(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_k^* \psi^*(2x - k), x \in \mathbb{R}, \quad (2.32)$$

где h, g – низкочастотные и высокочастотные вейвлет-коэффициенты анализа (разложения), а h^*, g^* – низкочастотные и высокочастотные вейвлет-коэффициенты синтеза (восстановления), причём $g_n = (-1)^n h_{1-n}^*$ и $g_n^* = (-1)^n h_{1-n}^*$. Числа 9 и 7 в названии вейвлет-функций обозначают число значащих низкочастотных и высокочастотных коэффициентов соответственно.

Масштабирующие и вейвлет функции для CDF9/7 изображены на рисунке 2.5.

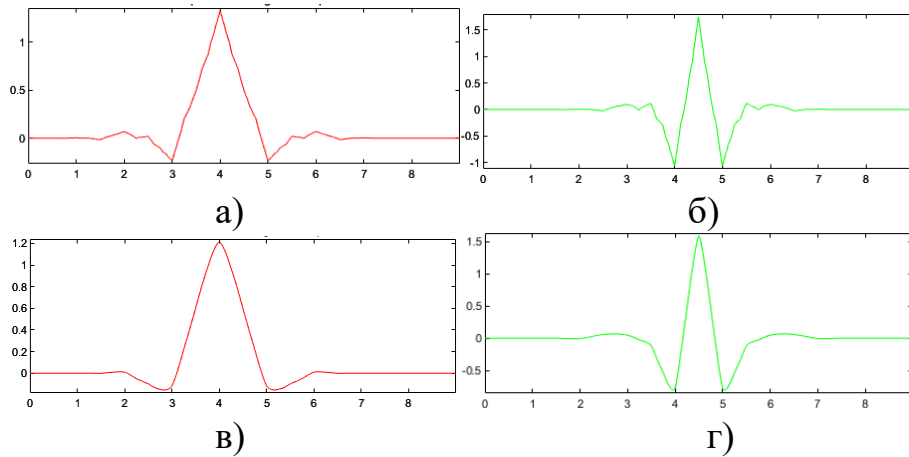


Рисунок 2.5 – Масштабирующие и вейвлет-функции для CDF9/7

а) $\varphi(x)$, б) $\psi(x)$, в) $\varphi^*(x)$, г) $\psi^*(x)$

Соответствующие высокочастотные и низкочастотные фильтры разложения и восстановления изображены на рисунке 2.6.

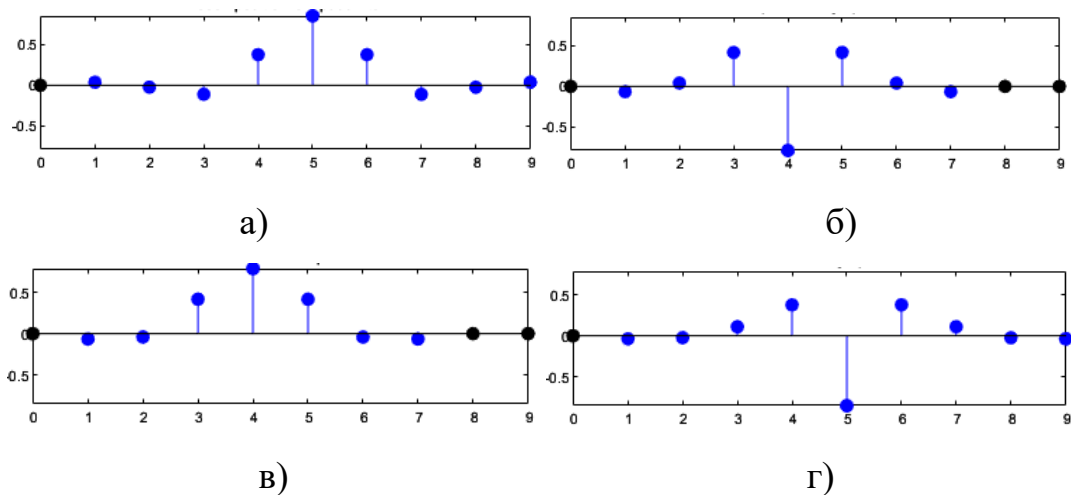


Рисунок 2.6 – Низкочастотные и высокочастотные фильтры для CDF9/7

а) h , б) g , в) h^* , г) g^*

В алгоритмах SPIHT, EZW, JPEG 2000 вейвлет CDF9/7 используется для сжатия с потерями[18,101].

2.4.4 Преобразование Уолша

Преобразование Уолша можно представить в следующем виде (2.33):

$$w(u) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) (-1)^{\langle x, u \rangle}, \quad (2.33)$$

где $\langle x, u \rangle = \sum_{s=0}^{n-1} x_s u_s$; $n = \log_2 N$, x_s и u_s - коэффициенты двоичного представления чисел x и u .

Первые 8 базисных функций системы Уолша показаны на рисунке 2.7.

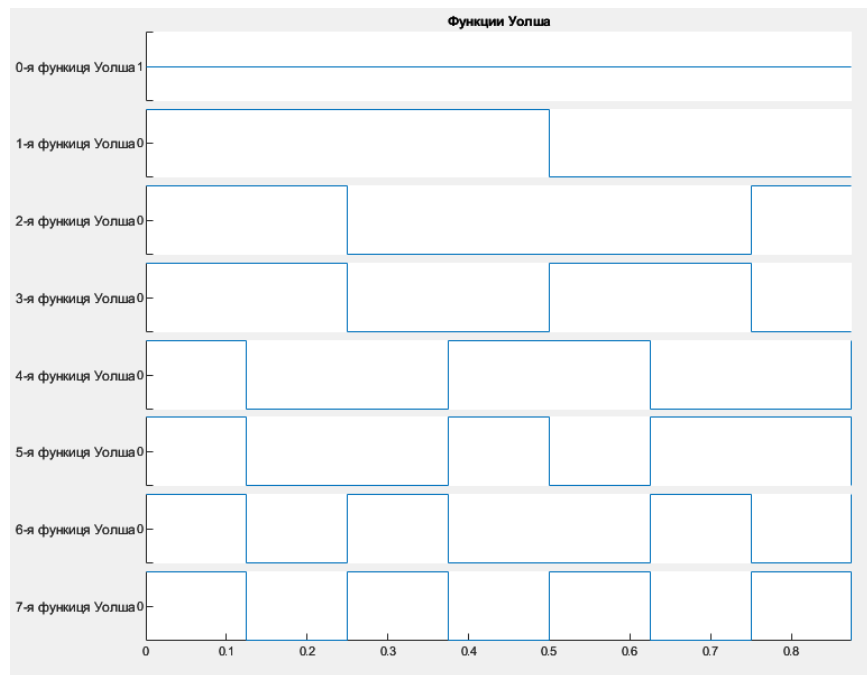


Рисунок 2.7 – Базисные функции Уолша

Преобразование Уолша имеет также быстрый алгоритм, реализация которого схожа с реализацией быстрого преобразования Фурье методом Кули-Тьюки[36]. Также если производить преобразование Уолша только по строкам, можно получить квазидвумерный спектр изображения[5].

2.4.5 Деление изображений на блоки

Деление изображений на блоки является неотъемлемой частью многих алгоритмов сжатия изображений, использующих переход к спектральным пространствам, таких, как JPEG, WebP.

Преимущества данной операции состоит в том, что алгоритм становится более универсальным, то есть подходит для большого числа форматов изображений. Также существенным преимуществом является то, что деление на блоки даёт гораздо меньшие спектральные коэффициенты, чем преобразование всего изображения.

Среди недостатков данной операции можно отметить существенное увеличение времени перехода к спектральному представлению.

Размер блока изображения напрямую определяет размерность базиса ортогональных функций, по которому будет происходить разложение сигнала

и переход к спектрам. Широкое распространение в блочных алгоритмах обработки изображений получили размеры блока 8x8, 4x4, однако такая размерность является оптимальной не во всех случаях.

2.4.6 Результаты сравнения

Для исследования влияния размера блока на время получения спектрального представления перечисленных выше преобразований были выполнены следующие действия:

- Сгенерировано 500 матриц размером 512x512, заполненных значениями от 0 до 255 с равномерным распределением (пример подобной матрицы изображён на рисунке 2.8);
- Каждая матрица разбивалась на блоки размерами от 2x2 до 256x256;
- Над каждым блоком выполнялось исследуемое преобразование;
- Производился замер среднего времени перехода от изображения к спектрам в блоках в зависимости от размера блока;
- Производился замер используемой памяти при переходе от изображения к его спектральному представлению в зависимости от размера блока.

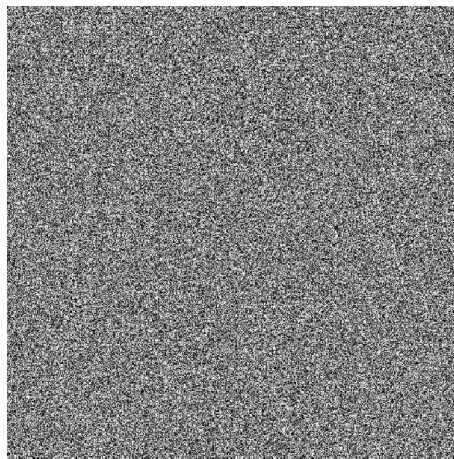


Рисунок 2.8 – Случайная матрица размером 512x512, заполненных значениями от 0 до 255 с равномерным распределением

Данный эксперимент позволит выявить зависимость времени преобразования и используемой памяти от его вида и от размера блока.

Эксперимент 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 2.9.

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

Сокращение размерности базиса (уменьшение размера блока) может приводить к существенному увеличению времени перехода к спектральному пространству[6]. Соответственно, для сокращения времени перехода целесообразно выбирать наибольший возможный размер блока.

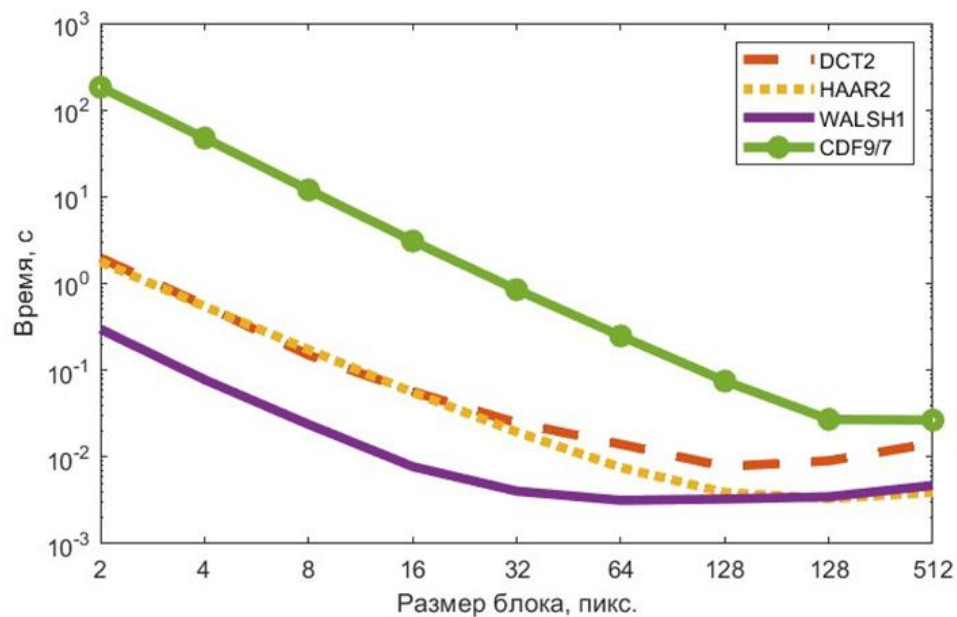


Рисунок 2.9 – Зависимость времени преобразования от размера блока

Так как преобразование происходит независимо над каждым блоком изображения, можно предположить, что к существенному улучшению результатов может привести распараллеливание данных операций[90]. На рисунке 2.10 приведен график зависимости времени преобразования от размера блока при стандартном распараллеливании, реализованном в системе Matlab.

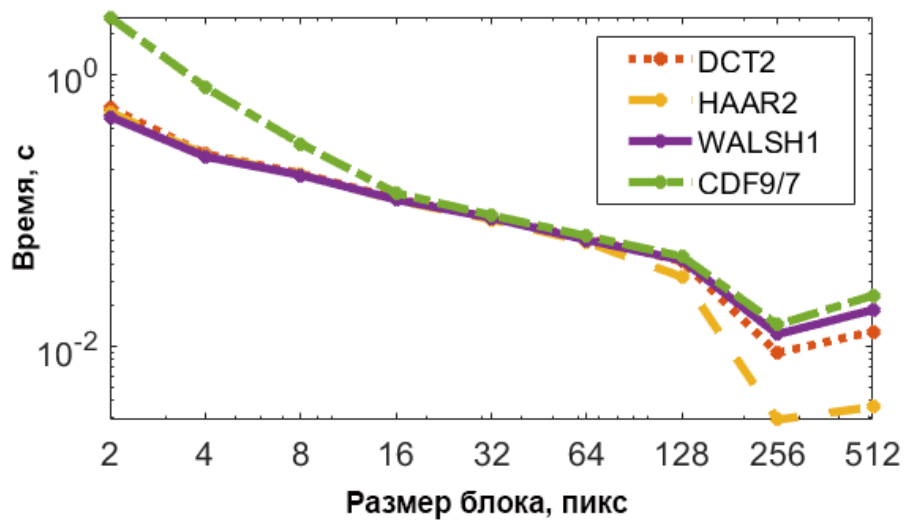


Рисунок 2.10 – Зависимость времени параллельного преобразования от размера блока

Также представляют интерес затраты памяти для различных преобразований в зависимости от размера блока. Данные о затратах памяти для исследуемых преобразований представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 Затраты памяти преобразований при различных размерах блока

Размер блока (пиксели)	Затраченная память (Кб)			
	<i>DCT</i>	<i>Haar</i>	<i>CDF9/7</i>	<i>Walsh</i>
2	74192	128032	150008	37456
4	79320	162104	153960	128488
8	124440	132404	205892	101008
16	125548	156468	119544	120484
32	46200	153596	149708	47096
64	11856	107560	63504	13352
128	240	30768	16984	1652
256	8234800	620	448	44
512	12323080	1030040	10797832	10271376

Таким образом, для разработки алгоритмов сжатия двумерных сигналов, ориентированных на существенное упрощение и сокращение времени работы целесообразно использовать квазидвумерное представление сигналов[33].

2.5 Свойства квазидвумерного спектрального представления, позволяющие осуществлять устранение избыточности данных

Удобство реализации преобразования Уолша в цифровых вычислительных устройствах обусловлено необходимостью выполнения только операций сложения и вычитания, в то время как преобразование Фурье требует выполнения множества операций умножения [36,47,60]. Для вычисления двумерного быстрого преобразования Уолша (БПУ) нужно затратить всего лишь $2N^2 \log_2 N$ операций сложения и вычитания [36].

Еще больший выигрыш в сокращении трудоемкости реализации преобразования Уолша можно получить при использовании квазидвумерного представления спектра изображений в соответствии с применением одномерного ядра преобразования, что в наибольшей степени соответствует логике передачи изображения через канал связи «пиксель за пикселем – строка за строкой».

Для такого представления справедливы две наиболее важные для реализации поставленной задачи теоремы [10,32,39]:

1. Теорема о постоянной составляющей спектра

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

$$F_0 = - \sum_{u=1}^{N-1} \mathbf{F}(u-1, j) (-1)^{\sum_{g=1}^n \langle (u-1)_g j_g \rangle}, \quad (2.34)$$

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

Передаваемый спектр в этом случае не имеет постоянной составляющей [64].

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:

$$\frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(i, j)^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{u=0}^{N-1} \mathbf{F}(u, j)^2 \quad (2.35)$$

Выражение (2.35) является равенством Парсеваля для квазидвумерного представления двумерных сигналов. Его доказательство не требует особого пояснения, так как оно вытекает из известных свойств спектрального анализа. Использование данной теоремы позволяет в два раза сократить вычислительные затраты и получить некоторые другие преимущества при преобразовании изображений.

Так как при передаче квазидвумерного спектра основные энергетические затраты приходятся на передачу столбца постоянных составляющих, то для повышения производительности передачи целесообразно передавать спектр в квазидвумерном представлении без постоянных составляющих. Для этого в передаваемую матрицу изображения $[f(i, j)]$ размером $N \times N$, необходимо ввести столбец элементов соответствующих уровню «черного» (или «белого», или любого другого уровня), который на приемной стороне можно будет использовать для восстановления постоянной составляющей всего изображения в соответствии с теоремой о постоянной составляющей спектра [68].

2.6 Разработка алгоритма сжатия изображений с исключением высокочастотной составляющей

При переходе к квазидвумерному спектральному представлению сигнала в нем могут быть выявлены составляющие, не вносящие существенного вклада в изобразительные свойства изображения [10]. Их можно исключить, выполнив операцию прореживания спектра (2.36), подготовив, таким образом, возможность для сжатия изображений:

$$\mathbf{F}(u, j) = 0, \quad (2.36)$$

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

При исключении определенного количества элементов сигнала происходит нарушение равенства Парсеваля между сигналом 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 [70-72]:

$$\mathbf{F}_k(u, 0) = \sum_{u,j} \mathbf{F}(u, j)_{\leq \bar{F}(u,j)}. \quad (2.37)$$

В процессе осуществления передачи формируется вектор кадра

$$\mathbf{I}_k = \{f_{11}, f_{12}, \dots, f_{1N}; f_{21}, f_{22}, \dots, f_{2N}; \dots; f_{N1}, f_{N2}, \dots, f_{NN}\}, \quad (2.38)$$

где f_{11} и f_{NN} - значения яркостей первого и последнего пикселей передаваемого кадра.

Для реализации метода передачи без постоянной составляющей первая строка исходного изображения исключаются, то есть заменяется нулевыми элементами. Вектор кадра принимает в этом случае следующий вид:

$$\mathbf{I}_k = \{0, 0, \dots, 0; f_{21}, f_{22}, \dots, f_{2N}; \dots; f_{N1}, f_{N2}, \dots, f_{NN}\}. \quad (2.39)$$

Значения утраченной постоянной составляющей вычисляются в соответствии с теоремой (2.34).

Восстановление изображения осуществляется с помощью применения обратного преобразования Уолша(2.23).

Нормировка при восстановлении необходима для перехода в пространство изображения. Однако осуществлять её в полной мере на передающей стороне оказывается нецелесообразным из-за больших ошибок, возникающих в процессе округления результатов вычислений. Эта ошибка существенным образом сказывается на точности восстановления постоянной составляющей. Её можно существенно уменьшить, накапливая остатки

округления в корректирующей строке, передаваемой вместо первой "нулевой" строки. Тогда значения постоянных составляющих в столбцах передаваемого сигнала будут вычисляться следующим образом:

$$\begin{aligned} F_{11} &= F_{r1} - (F_{21} + F_{31} + \dots + F_{N1}) \\ F_{12} &= F_{r2} - (F_{22} + F_{32} + \dots + F_{N2}) \\ &\dots\dots \\ F_{1N} &= F_{rN} - (F_{2N} + F_{3N} + \dots + F_{NN}), \end{aligned} \quad (2.40)$$

где $F_{r1}, F_{r2}, \dots, F_{rN}$ - суммы остатков округления в соответствующих столбцах.

В связи с вышеизложенным предлагается следующий протокол передачи сформированного сигнала. Протокол описывает форматы 9-битных данных для передачи кадра изображений размером 512x512 пикселей[70].

Корректирующий формат, изображённый на рисунке 2.11, используется для передачи корректирующей строки $F(0, u)$, $u = \overline{0, N-1}$. Все поля используются как единое число для передачи нормированной корректирующей строки, все элементы которой поделены на 256.

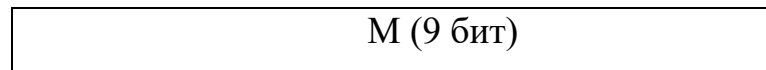


Рисунок 2.11 – Формат данных корректирующей строки

Формат передачи данных, показанный на рисунке 2.12, 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 $P = 1$ [71].

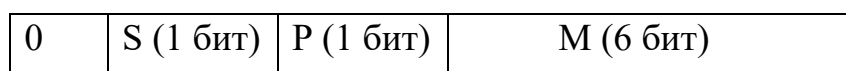


Рисунок 2.12 – Формат передачи кодов спектральных составляющих

Формат сжатия нулевых последовательностей представлен на рисунке 2.13. Бит Z хранит значение 1, в то время как остальные 8 бит (поле M на рисунке 2.13) – число нулевых элементов, следующих за текущим в строке.

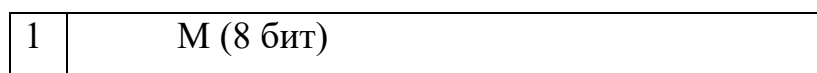


Рисунок 2.13– Формат сжатия нулевых последовательностей

Ниже будут рассмотрены схемы алгоритмов сжатия изображения в строку, состоящую из 9-бтиных элементов.

Общая схема алгоритма сжатия представлена на рисунке 2.14. На данной схеме процедуры прореживания и упаковки квазидвумерного спектра в 8-ми и 9-битные форматы представлены подпрограммами, схемы алгоритмов которых будут подробно рассмотрены ниже. Также предполагается, что процедура быстрого преобразования Уолша уже реализована в системе и является стандартной. Исключение постоянной составляющей реализуется как присваивания нулевого значения первой строке квазидвумерного спектра[70,71].

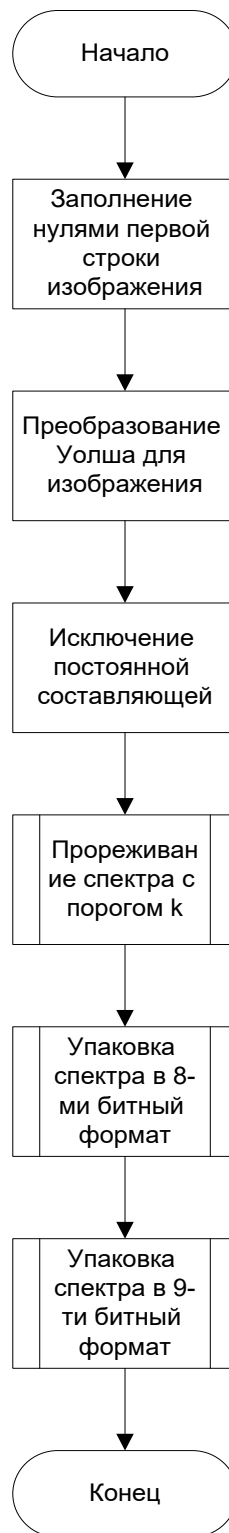


Рисунок 2.14 – Общая схема алгоритма сжатия изображения

Однако при подходе, описанном на рисунке 2.14, в процессе упаковки спектра может накапливаться ошибка (то есть при восстановлении постоянной составляющей не будут учитываться остатки от деления). А при недостаточно

точном восстановлении постоянной составляющей на изображении могут появляться характерные полосы. Чтобы устранить данный недостаток и учитывать особенности восстановления постоянной составляющей, предлагается алгоритм сжатия, изображённый на рисунке 2.15.



Рисунок 2.15 – Общая схема алгоритма сжатия изображения с учётом потерь при упаковке

Данный алгоритм позволяет учесть потери при упаковке за счёт вычисления разницы между исходным и распакованным спектром и прибавления этой разницы к корректирующей строке. Результаты использования алгоритма представлены на рисунке 2.16. На этом рисунке изображены увеличенные фрагменты исходного изображения.

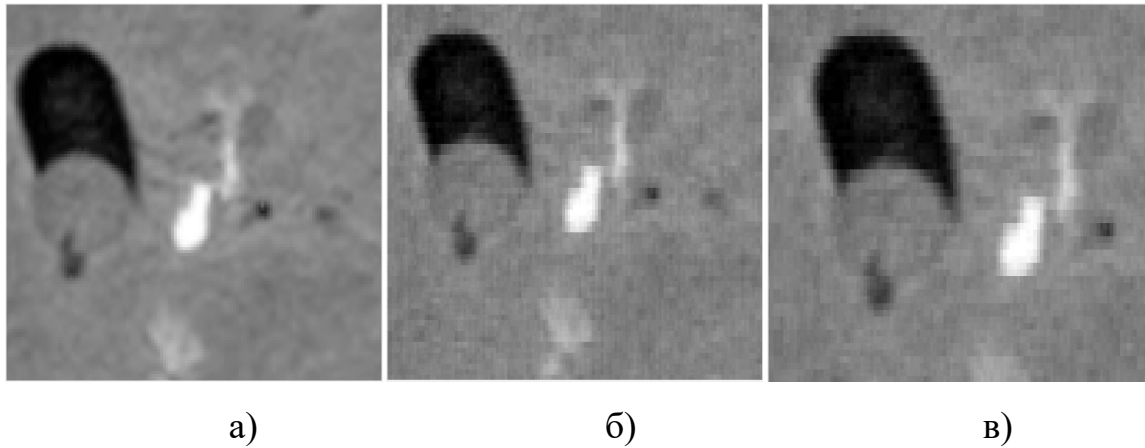


Рисунок 2.16 – Результат применения алгоритма, учитывающего потери постоянной составляющей:

- а) Исходное изображение;
- б) Восстановленное изображение, СКО = 7,11;
- в) Восстановленное с учётом потерь изображение, СКО = 6,92;

Общая схема алгоритма восстановления изображения приведена на рисунке 2.17. На данной схеме процедуры распаковки квазидвумерного спектра из 8-ми и 9-битных форматов представлены подпрограммами, схемы алгоритмов которых будут подробно рассмотрены ниже. Аналогично схеме сжатия, предполагается, что процедура быстрого обратного преобразования Уолша уже реализована в системе и является стандартной.

Восстановление постоянной составляющей осуществляется по формуле (2.40): суммируются все элементы в столбце, начиная со второго, затем данная сумма прибавляется к элементу корректирующей строки (первому в столбце) с обратным знаком.

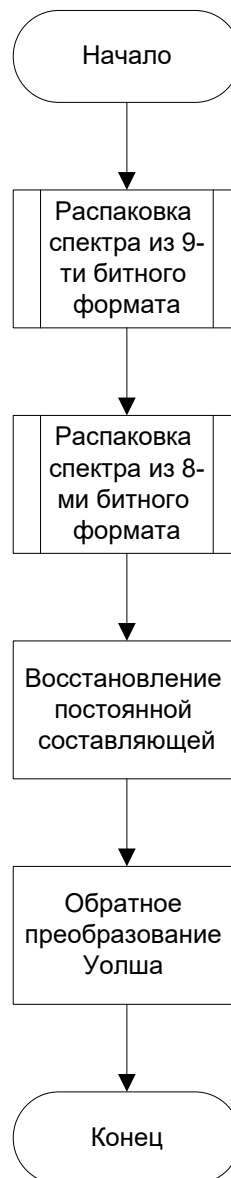


Рисунок 2.17 – Общая схема алгоритма восстановления изображения

На рисунке 2.18 изображена схема алгоритма прореживания квазидвумерного спектра с добавлением суммы прореженных значений в корректирующую (первую) строку, на месте которой была постоянная составляющая.

Далее будут представлены схемы алгоритмов подпрограмм, используемых в общих алгоритмах.

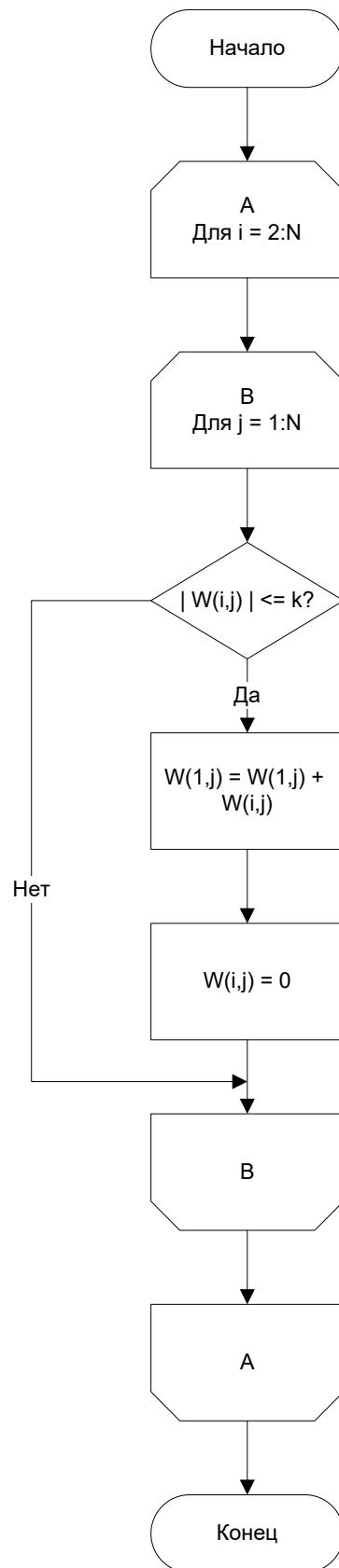


Рисунок 2.18 – Схема алгоритма прореживания квазидвумерного спектра

Условные обозначения, применяемые в данной схеме:

- i – счётчик строк;
- j – счётчик столбцов;
- N – размер матрицы спектра
- k – входной параметр, обозначающий порог прореживания;
- W – матрица казидвумерного спектра.

В алгоритме осуществляется проверка всех значений матрицы, кроме первой строки. Если текущее значение по модулю меньше порогового, то оно заносится в корректирующую строку, а затем исключается из спектра (ему присваивается 0) (2.36). Реализация алгоритма прореживания без занесения значений в корректирующую строку аналогична, однако результат, то есть восстановленное изображение, будет иметь характерные полосы (рисунок 2.19).



а)

б)

в)

Рисунок 2.19 – Результат восстановления изображения:

- а) Исходное изображение;
- б) Восстановленное изображение, без корректировки постоянной составляющей, СКО = 73,7;
- в) Восстановленное изображение, с корректировкой постоянной составляющей, СКО = 7,11;

Данный эффект связан с нарушением равенства Парсеваля для квазидвумерного спектра (2.35), однако использование формулы (2.40) позволяет сохранить постоянную составляющую более точно, за счёт чего удаётся скомпенсировать нарушение качества восстановленного изображения.

Перед упаковкой матрицы в 9-битный формат происходит упаковка в 8-битный формат, описанный в [72]. Этот формат представляет собой структуру, аналогичную той, которая изображена на рисунке 2.12. Однако в 8-битном формате отсутствует бит Z , поэтому все числа будут представлять собой значащие элементы, последовательностей нулей не будет.

Схема алгоритма упаковки матрицы квазидвумерного спектра в 8-битный формат приведена на рисунке 2.20.

Используемые в схеме обозначения:

- i – счётчик строк;
- j – счётчик столбцов;
- N – размер матрицы спектра;
- W – матрица квазидвумерного спектра.

Входными данными для работы алгоритма являются матрица спектра W и размер изображения N . На выходе будет получена матрица 8-мибитных элементов. Деление первой строки на 256 обусловлено тем, что в исходном виде элементы корректирующей строки не будут уместиться по разрядности в предложенный формат, однако после частичной нормировки их представление в упакованном виде возможно. Отсутствие упаковки в общий для остальных элементов формат обусловлено важностью постоянной составляющей для восстановления изображения. Поэтому корректирующая строка упаковывается так, чтобы получить минимальные нарушения постоянной составляющей при восстановлении.

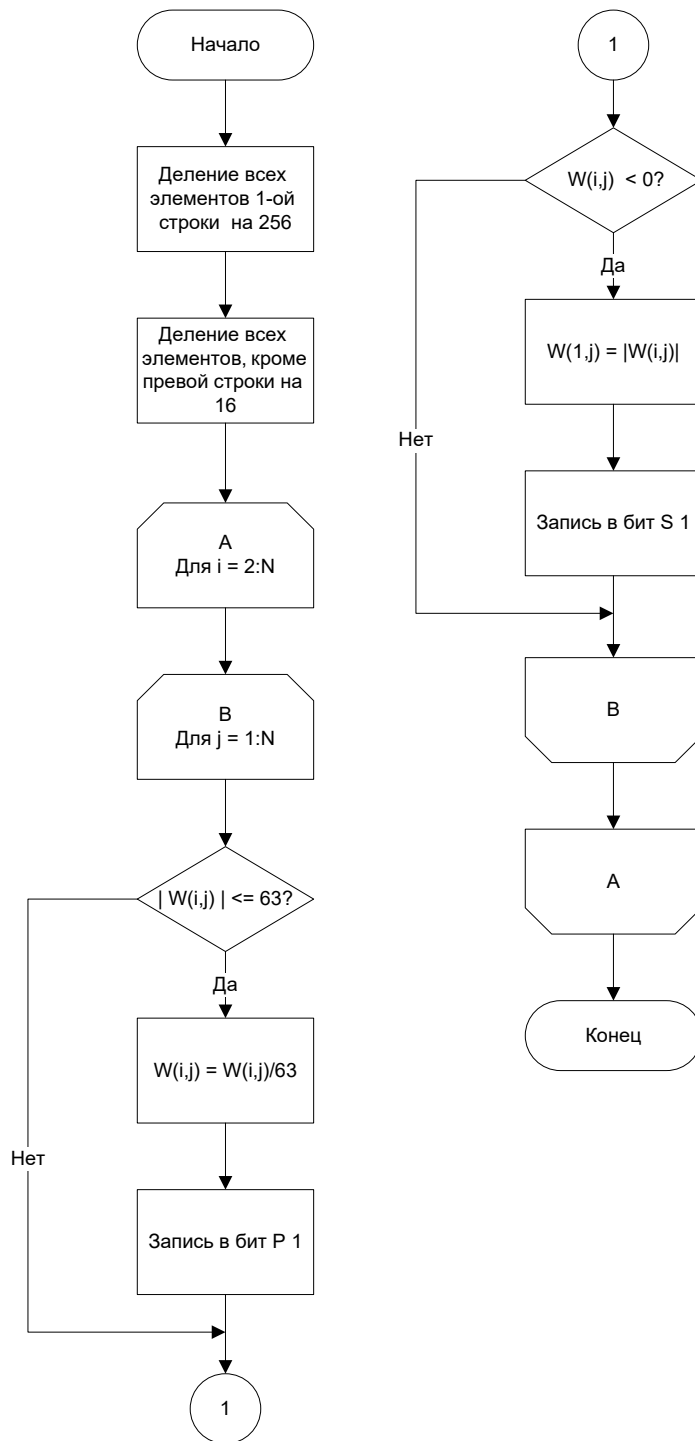


Рисунок 2.20 – Схема алгоритма упаковки спектра в 8-битный формат

Алгоритм сжатия матрицы 8-битных элементов в строку 9-битных элементов представлен на рисунке 2.21.

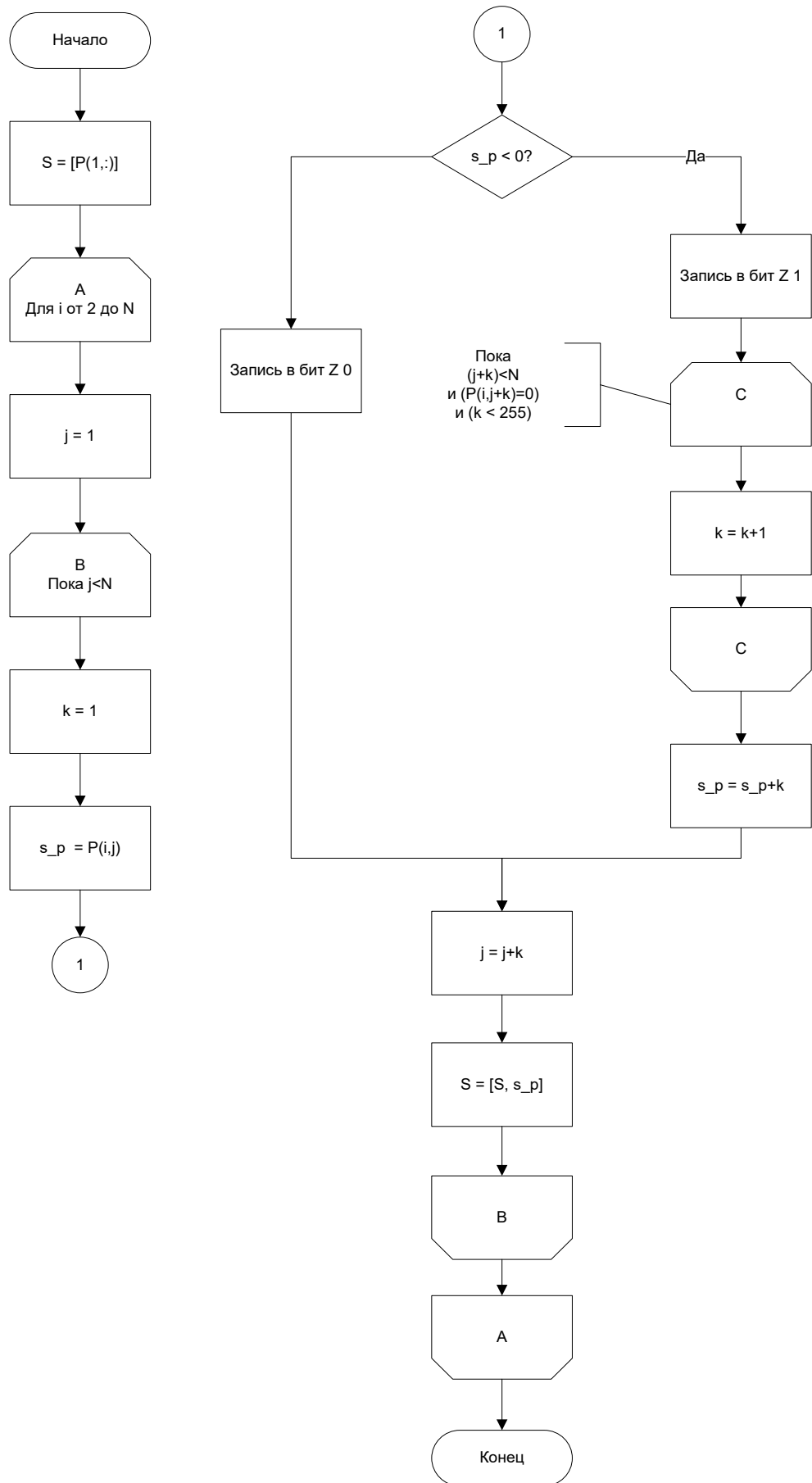


Рисунок 2.21 – Схема алгоритма сжатия матрицы в девятибитный формат

На входе подпрограммы должна быть матрица спектра, упакованная в 8-битный формат. При выходе из подпрограммы будет сформирована строка 9-битных элементов.

Условные обозначения, применяемые на рисунке 2.21:

- S – строка 9-битных элементов;
- P – матрица спектра в 8-мибитном формате, $P(1,:)$ – первая строка запакованного спектра;
- i – счётчик строк;
- j – счётчик столбцов;
- N – размер матрицы;
- k – счётчик перехода, если есть последовательность нулей, то они подсчитываются этим счётчиком, записываются в элемент с битом $Z = 1$, а затем пропускаются;
- s_p – текущий элемент упакованной матрицы, который переформировывается в текущий элемент строки;
- $S = [S, s_p]$ – операция добавления к конечной строке ещё одного 9-битного элемента.

Алгоритм восстановления изображения из 9-тибитного формата изображён на рисунке 2.22.

На вход подпрограммы, реализующей этот алгоритм должны поступить строка 9-битных элементов и размер изображения. На выходе должна быть матрица 8-битных элементов.

Условные обозначения, применяемые на рисунке 2.22:

- S – строка 9-битных элементов;
- U – матрица нулей размером $N \times N$, в неё будут распаковываться элементы;
- i – счётчик строк;
- j – счётчик столбцов;
- c – счётчик элементов 9-тибитной строки;
- N – размер матрицы;

– k – счётчик перехода к следующему элементу в строке матрицы;

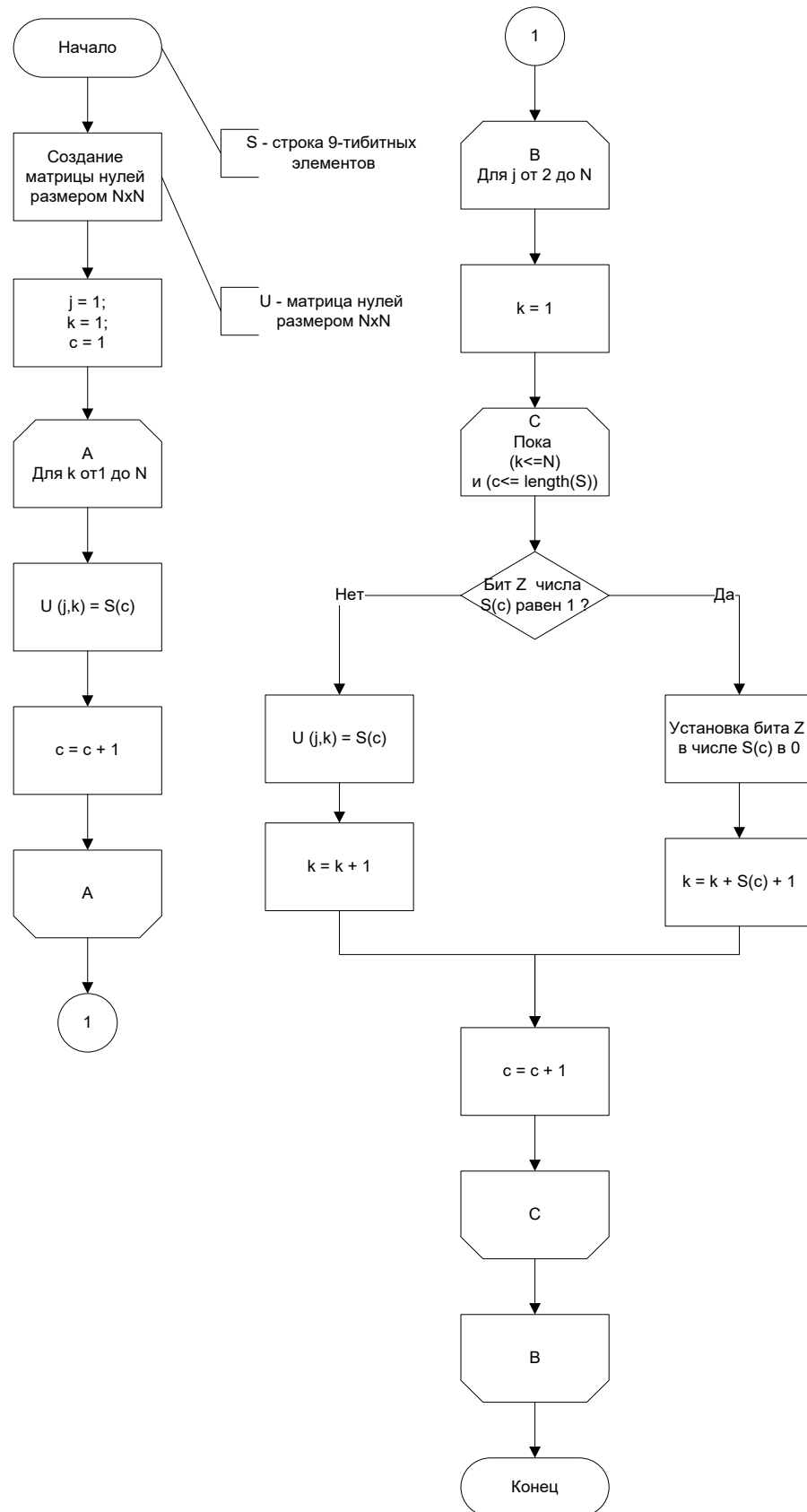


Рисунок 2.22 – Схема алгоритма восстановления матрицы из девятибитного формата

Суть алгоритма, изображённого на рисунке 2.22, заключается в следующем: поэлементно просматривается строка 9-битных элементов, затем созданная матрица нулей размером $N \times N$ заполняется элементами строки в зависимости от бита Z : либо числовыми значениями ($Z=0$), либо последовательностями нулей ($Z=1$).

На рисунке 2.23 приведена схема алгоритма распаковки матрицы спектра Уолша из 8-битного формата.

Входными данными для данного алгоритма является матрица, запакованная в 8-битный формат. На выходе будет получена распакованная матрица квазидвумерного спектра.

Условные обозначения, применяемые на рисунке 2.23:

- U – матрица размером $N \times N$, состоящая из 8-битных элементов;
- i – счётчик строк;
- j – счётчик столбцов;
- N – размер матрицы;

Алгоритм, изображённый на рисунке 2.23, можно описать словесно: первая строка матрицы умножается на 256 (таким образом восстанавливается корректирующая строка), затем просматриваются все элементы и в зависимости от битов S и P каждого элемента, они могут менять знак или умножаться на 63. Затем все элементы, кроме первой строки домножаются на 16.

Алгоритм сжатия с исключением высокочастотных составляющих имеет ряд особенностей, позволяющих добиться повышения производительности передачи изображений.

Все шаги алгоритма реализуемы в пространстве операций целочисленной арифметики. Получение квазидвумерного спектра реализуемо операциями сложения и вычитания, частичные нормировки в силу особенностей множителей могут быть реализованы как двоичные сдвиги.

Таким образом, к аппаратным архитектурам, реализующим данный алгоритм предъявляются минимальные требования.

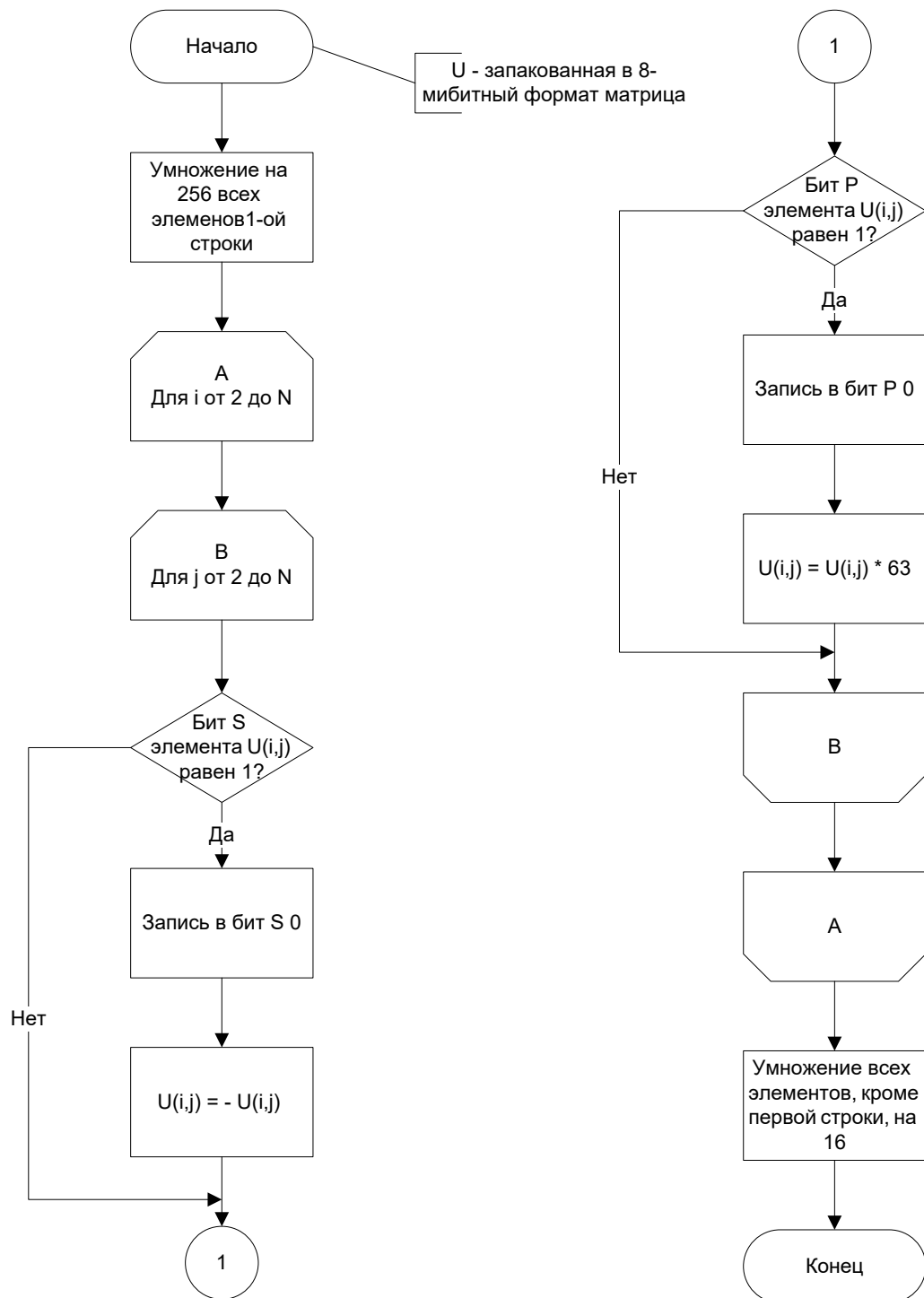


Рисунок 2.23 – Схема алгоритма распаковки спектра из восьмибитного формата

Также следует отметить, что использование квазидвумерного спектра позволяет сократить время сжатия минимум в 2 раза на этапе преобразования по сравнению с известными методами.

2.7 Выводы по главе

В главе приведены основные сведения об ортогональных преобразованиях, показана возможность применения ортогональных преобразований к двумерным дискретным сигналам, в частности, к изображениям, выделены свойства некоторых преобразований, такие как разделимость, симметричность.

Рассмотрены обобщённые функции Виленкина-Крестенсона, представлены наиболее распространённые на практике случаи, такие как дискретные экспоненциальные функции и функции Уолша.

Функции Уолша относятся к системам с несинусоидальными базисными функциями, определёнными на конечных интервалах; свойства данных функций позволяют получить ряд преимуществ при работе с цифровыми дискретными сигналами. Показаны варианты построения систем базисных функций Уолша, приведены различные варианты упорядочения.

Благодаря свойствам разделимости и симметричности существует возможность получения квазидвумерных спектральных представлений, что на практике позволяет уменьшить время получения спектров сигналов.

Приведён сравнительный анализ распространённых на практике ортогональных систем функций, показано преимущество квазидвумерного представления, основанного на функциях Уолша в задачах, ориентированных на упрощение архитектуры систем и сокращение времени обработки сигнала, при сравнительно равных, а иногда и меньших затратах памяти.

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.

Для систем Уолша справедливы теоремы о восстановлении постоянной составляющей, и об энергетической полноте спектра, которые применимы для разработки методов сжатия изображений.

На основе данных, сведений и результатов исследований, представленных в главе, предложен алгоритм сжатия изображения в квазидвумерном спектре с восстановлением постоянной составляющей и устранением высокочастотных составляющих.

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА И АЛГОРИТМОВ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В БАЗИСЕ ФУНКЦИЙ С ДВОИЧНОЙ АРИФМЕТИКОЙ, ОСНОВАННЫХ НА КВАНТОВАНИИ КВАЗИДВУМЕРНОГО СПЕКТРА

3.1 Влияние применения методов устранения информационной избыточности в спектре на качество восстановления изображений

В задачах сжатия особый интерес представляют распространённые методы устранения избыточных или малозначимых элементов для приемлемого воспроизведения сигналов данных.

Для исследования были выбраны следующие операции над спектром[1,7,70]:

— Пороговое исключение составляющих спектра.

При обработке квазидвумерного спектра в нем могут быть выявлены составляющие, не вносящие существенного вклада в изобразительные свойства изображения. Их можно отбросить (выполнить операцию прореживания), таким образом создав условия для сжатия изображений (3.1).

$$\mathbf{F}_\Pi(u, j) = \begin{cases} 0, & \text{если } \mathbf{F}(u, j) < \bar{F}(u, j), \\ \mathbf{F}(u, j), & \text{если } \mathbf{F}(u, j) \geq \bar{F}(u, j). \end{cases} \quad (3.1)$$

где $\bar{F}(u, j)$ - пороговое значение, выбираемое исходя из необходимого качества передачи изображений.

Пример спектра после порогового исключения составляющих изображён на рисунке 3.1.

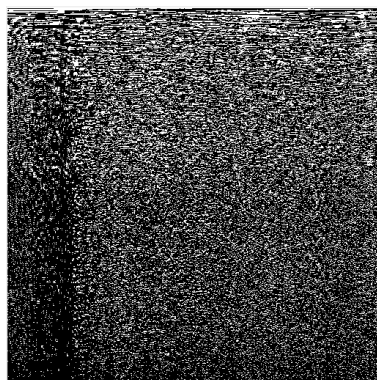


Рисунок 3.1 – Квазидвумерный спектр после порогового исключения (50% составляющих)

— Пространственное исключение составляющих спектра.

Пространственное исключение составляющих спектра заключается в обнулении некоторого количества строк целиком. Количество строк задаёт долю исключённых составляющих[70,71].

Пространственное исключение составляющих спектра описывается выражением (3.2):

$$F_{\text{пр}}(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{если } i > m, \\ F(i, j), & \text{если } i \leq m. \end{cases} \quad (3.2)$$

В формуле (3.2) m обозначает номер строки, начиная с которой все составляющие спектра будут исключены.

На рисунке 3.2 изображён квазидвумерный спектр после пространственного исключения.

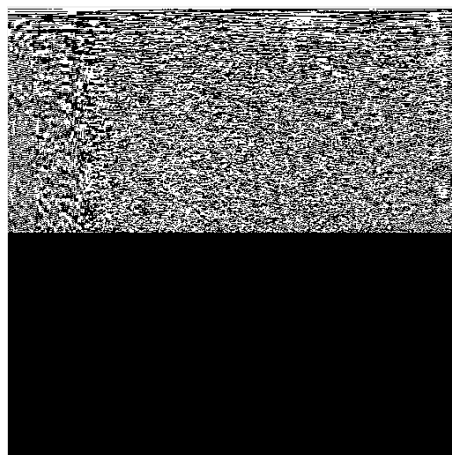


Рисунок 3.2 – Квазидвумерный спектр после пространственного исключения (50% составляющих)

— Квантование составляющих спектра.

Квантование составляющих заключается в разделении входного диапазона значений квазидвумерного спектра на ограниченное число значений или уровней. Элементы квазидвумерного спектра заменяются номерами ближайших уровней, что существенно сужает диапазон передаваемых значений. При восстановлении спектра его составляющие будут представлены значениями из ограниченного набора.

Пусть требуется сформировать вектор, разделяющий значения на C уровней (3.3). Тогда вектор значений уровней L (3.4) будет получен следующим образом (3.5):

$$D = \left\lfloor \frac{\max(|F|)}{C} \right\rfloor, \quad (3.3)$$

$$L(0) = 0, \quad (3.4)$$

$$L(i) = L(i - 1) + D, i = \overline{1, C - 1}, \quad (3.5)$$

где D – шаг, расстояние от одного значения до другого, i – номер уровня, $L(i)$ – значение i -ого уровня. Функция $\lfloor \cdot \rfloor$ возвращает наибольшее целое число, меньшее или равное аргументу данной функции.

Матрица $\mathbf{F}$ подвергается квантованию, которое заключается в формировании матрицы уровней $\mathbf{F}_q$ (3.6).

$$\mathbf{F}_q = \frac{\mathbf{F}}{D}. \quad (3.6)$$

После этого преобразования значения матрицы заменяются на значения уровней, которые занимают $\lceil \log_2 C \rceil$ бит.

В данном исследовании в квантовании не участвовали значения постоянных составляющих, они были сохранены в исходном виде в силу того, что значения постоянных составляющих сильно отличаются по модулю от остальных значений спектра и будут влиять на результат квантования, особенно при малом числе уровней, а также строка постоянных составляющих имеет другую структуру (отсутствуют знакоперемены). Обработка значений постоянных составляющих при квантовании может быть реализована другими специальными методами (например, отдельное квантование строки постоянных составляющих или дельта-кодирование).

Пример спектра, восстановленного после квантования изображён на рисунке 3.3.

В ходе исследования был произведён выбор параметров обработки спектров.

Для квантования на код уровня целесообразно выбрать целое число бит на код уровня: 5 бит, 4 бита, 3 бита, 2 бита. При одном бите на код уровня изображение теряет структуру.

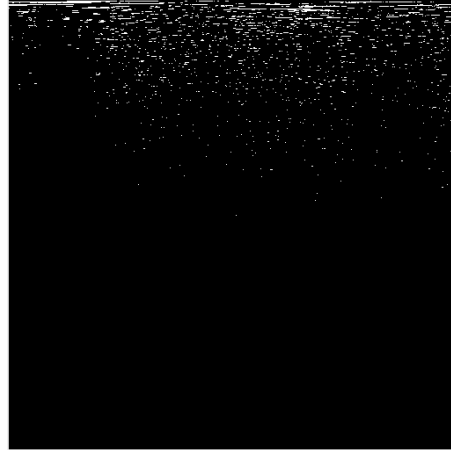


Рисунок 3.3 – Квазидвумерный спектр после квантования значений (4 бита на уровень, 16 значений)

Выбор процента нулевых значений для исключения по порогу и пространственного исключения был основан на визуальной оценке изображений, при этом учитывались такие факторы как: прослеживаемость изменений (то есть разница между 50% и 60% исключённых составляющих будет малозаметна наблюдателю), сопоставимость с результатами, полученными для квантования, где порог жестко задан целым количеством бит на уровень. Таким образом, долями исключённых составляющих были выбраны 50%, 90%, 95%, 98% спектра.

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[42,45,55]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} (\hat{I}(i,j) - I(i,j))^2}, \quad (3.7)$$

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

Считается, что изображения с СКО ниже 8 обеспечивают приемлемое качество изображения, однако немаловажным фактором будет являться и оценка изображений наблюдателем.

Далее будет приведена демонстрация визуальных эффектов, связанных с применением перечисленных операций.

На рисунке 3.4 показано исходное изображение, выбранное для демонстрации влияния методов устранения избыточности данных.



Рисунок 3.4 – Исходное изображение

Изображение представляет собой аэрокосмический снимок ландшафта с застройкой и частью водоёма. Застройка содержит множество мелких деталей, то есть при исследовании методов устранения информационной избыточности можно визуально отследить степень их сохранения. Часть водоёма представляет собой область с малым количеством изменений яркости, в этой части изображения можно визуально оценить влияние методов на появление помех, ложных контуров и иных искажений.

На рисунке 3.5 представлены эффекты применения операции порогового исключения составляющих спектра.

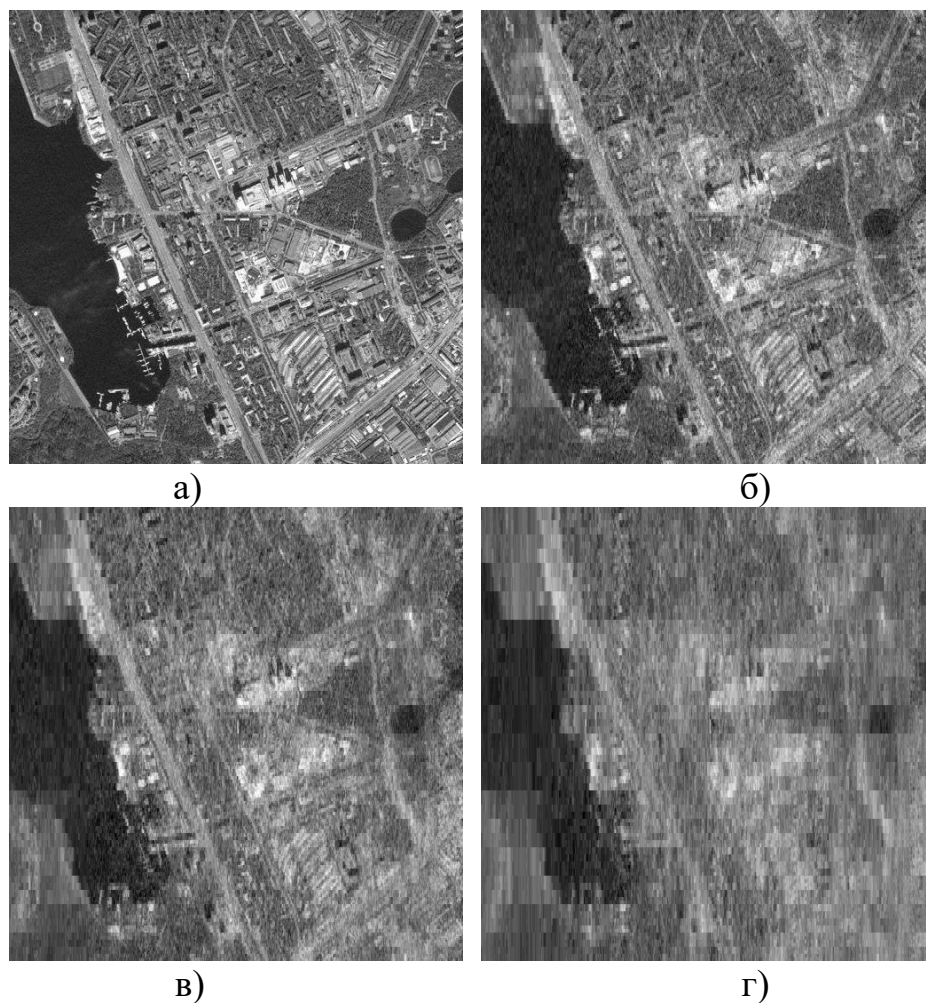
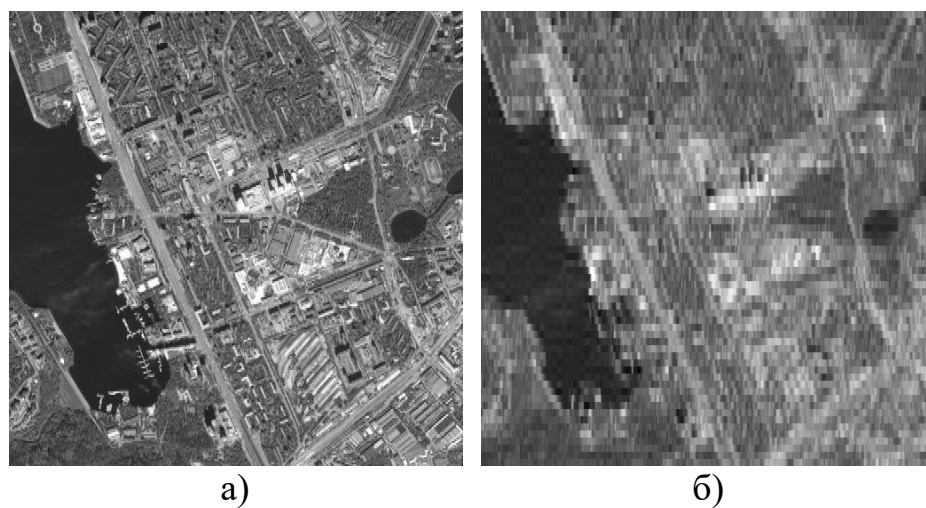
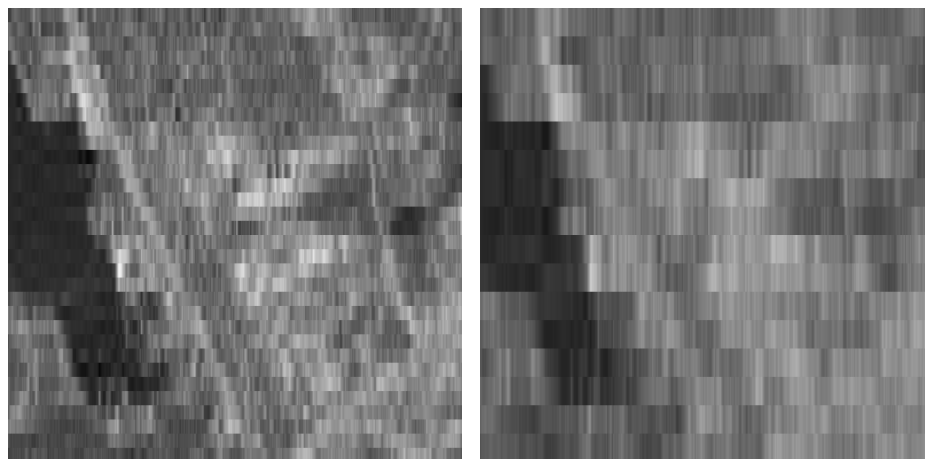


Рисунок 3.5 – Влияние на изображение операции порогового исключения составляющих квазидвумерного спектра

а) Исходное изображение; б) 50%, СКО = 7,35; в) 90%, СКО = 24,17; г) 95%, СКО = 28,9; д) 98%, СКО = 34,1

На рисунке 3.6 представлены эффекты применения операции пространственного исключения составляющих спектра.





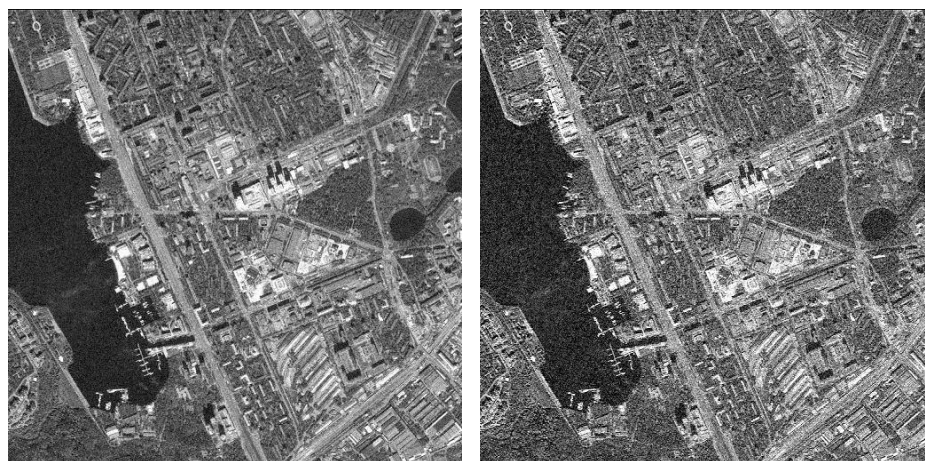
в)

г)

Рисунок 3.6 – Влияние на изображение операции пространственного исключения составляющих квазидвумерного спектра

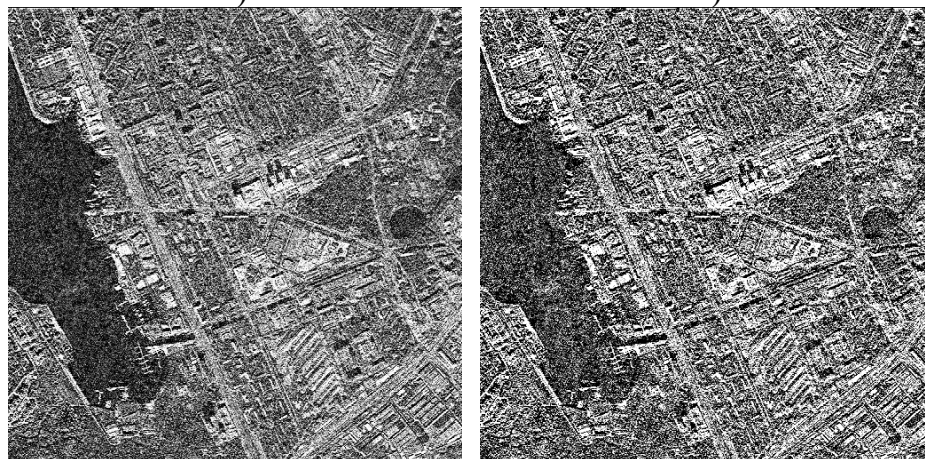
а) 50%, СКО = 14,8; б) 90%, СКО = 29,9; в) 95%, СКО = 33,67; г) 98%, СКО = 37,5

На рисунке 3.7 изображены эффекты, которые возникают после квантования составляющих квазидвумерного спектра.



а)

б)



в)

г)

Рисунок 3.7 – Влияние на изображение операции квантования составляющих квазидвумерного спектра

а) 5 бит, СКО = 14,5; б) 4 бита, СКО = 31,3; в) 3 бита, СКО = 59,2; г) 2 бита, СКО = 84,7

В таблице 3.1 представлены обобщённые данные по СКО для различных методов.

Однако также следует отметить визуальный эффект артефактов применения операций: пороговое исключение составляющих спектра разделяет изображение на прямоугольные области с потерей мелких деталей. Пространственное исключение составляющих спектра разделяет изображение на более крупные прямоугольные области. Квантование поднимает изображение по яркости и зашумляет его, однако, несмотря на высокое по сравнению с остальными методами СКО, детали изображения остаются различимы, в отличие от двух предыдущих методов.

Таблица 3.1 Среднеквадратическое отклонение восстановленных после обработки изображений

Степень сжатия/ Тип операции	50% 5 бит	90% 4 бит	95% 3 бит	98% 2 бит
Пороговое	7,35	24,17	28,9	34,1
Пространственное	14,8	29,9	33,67	37,5
Квантование	14,5	31,3	59,2	84,7

Таким образом, особый интерес в задачах устранения информационной избыточности, помимо методов порогового исключения составляющих спектра, представляют методы квантования.

3.2 Алгоритм сжатия с квантованием высокочастотной составляющей

Предложенный в главе 2 алгоритм сжатия с исключением высокочастотной составляющей можно описать схемой, изображённой на рисунке 3.8.



Рисунок 3.8 – Схематическое изображение алгоритма сжатия с исключением высокочастотных составляющих

Исходное изображение I размером $N \times N$ подвергается преобразованию Уолша. В квазидвумерном спектре W , полученном в процессе преобразования, исключаются (приравниваются к нулю) высокочастотные значения (меньшие по абсолютному значению порога k). Исключенные элементы суммируются в первой, корректирующей, строке для точного восстановления постоянной составляющей спектра. В итоге остаётся матрица низкочастотных элементов спектра W_L , которая упаковывается в специальный вектор W_{L_packed} . Данный вектор содержит девятибитные элементы, которые имеют различные форматы.

Новый алгоритм предполагает не полное исключение высокочастотных составляющих, а хранение их в компактном виде. Схематическое изображение последовательности операций алгоритма изображено на рисунке 3.9.

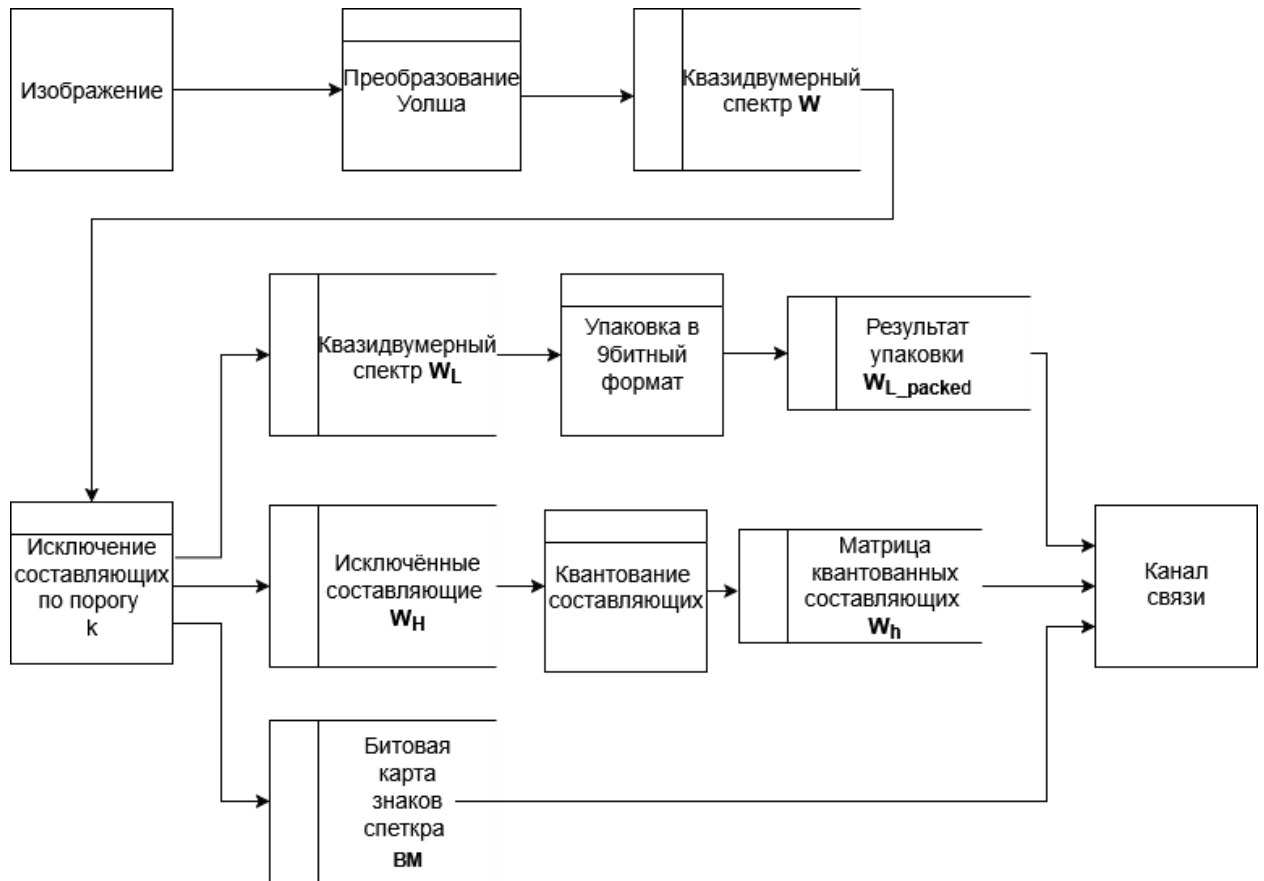


Рисунок 3.9 – Схематическое изображение алгоритма сжатия с квантованием высокочастотных составляющих

Для сокращения энергетических затрат при передаче в квазидвумерном спектре происходит исключение постоянной составляющей [10,72]. На приёмной стороне её возможно восстановить по формуле (2.34).

Далее матрица спектра разделяется на две матрицы в зависимости от порога. Матрица $\mathbf{W}_L$ является матрицей элементов, больших порогового (3.8); значения ниже порога формируют матрицу $\mathbf{W}_H$ (3.9).

$$\mathbf{W}_L(u, j) = 0, \mathbf{W}(u, j) \leq k, \quad (3.8)$$

$$\mathbf{W}_H(u, j) = 0, \mathbf{W}(u, j) > k, \quad (3.9)$$

где k – пороговое значение, которое устанавливается исходя из необходимого качества передачи изображений.

Далее из данных порога и количества уровней формируется вектор, предназначенный для хранения значений уровней, на которые будут заменены элементы спектра[1]. Индекс значения – номер уровня. Пусть требуется

сформировать вектор, разделяющий порог на C уровней, (3.10). Тогда вектор значений уровней L , (3.11) будет получен следующим образом (3.12):

$$D = \left\lfloor \frac{k}{C} \right\rfloor, \quad (3.10)$$

$$L(0) = 0, \quad (3.11)$$

$$L(i) = L(i - 1) + D, i = \overline{1, C - 1}, \quad (3.12)$$

где D – шаг, расстояние от одного значения до другого, i – номер уровня, $L(i)$ – значение i -ого уровня. Функция $\lfloor \cdot \rfloor$ возвращает наибольшее целое число, меньшее или равное аргументу данной функции.

Матрица $\mathbf{W}_H$ изменяется в процессе квантования, которое проходит в несколько этапов.

Для начала элементы матрицы заменяются на ближайшие к ним элементы вектора значений уровней, причём разница между элементом матрицы и значением уровня накапливается в первой (корректирующей) строке матрицы $\mathbf{W}_L$ с целью максимально точного восстановления постоянной составляющей квазидвумерного спектра[67].

После замены значений уровнями формируется битовая карта $\mathbf{BM}(i, j)$ знаков спектра (3.13).

$$\mathbf{BM}(i, j) = \begin{cases} 0, & W(i, j) \geq 0, \\ 1, & W(i, j) < 0. \end{cases} \quad (3.13)$$

Битовая карта — это матрица бит, которая создаётся объединением двух массивов: карты знаков матрицы $\mathbf{W}_H$ и карты знаков матрицы $\mathbf{W}_L$. Карта знаков формируется именно на этом этапе, а не ранее, потому что для точного воспроизведения постоянной составляющей необходим знак разницы элемента $\mathbf{W}_H$ и ближайшего уровня.

Далее матрица $\mathbf{W}_H$ заменяется на матрицу уровней $\mathbf{W}_h$ (3.14).

$$\mathbf{W}_h = \left\lfloor \frac{\mathbf{W}_H(i, j)}{D} \right\rfloor. \quad (3.14)$$

После этого преобразования элементы матрицы заменяются на значения уровней, которые занимают $\lceil \log_2 t \rceil$ бит, где t – количество уровней.

Матрица $\mathbf{W}_L$ упаковывается в формат, аналогичный ранее предложенному, однако вместо 9 бит новый формат занимает 8 бит (рисунок 3.10).

Z (1 бит)	P (1 бит)	M (6 бит)
-----------	-----------	-----------

Рисунок 3.10 – Восьмибитный формат передачи низкочастотной составляющей спектра

Бит S будет отсутствовать, так как знаки в данном формате хранятся отдельно.

Таким образом, по каналу связи будут передаваться размер изображения N , пороговое значение k , количество уровней C , упакованный вектор $\mathbf{W}_{L_packed}$, матрица уровней $\mathbf{W}_h$ и битовая карта знаков спектра $\mathbf{BM}(i, j)$.

Далее представлены результаты применения данного алгоритма в сравнении с алгоритмом, предложенным в главе 2.

При малых степенях сжатия (до 3 бит/пиксель) алгоритм с квантованием демонстрирует лучшее качество при равных степенях сжатия (рисунок 3.11 и рисунок 3.12).

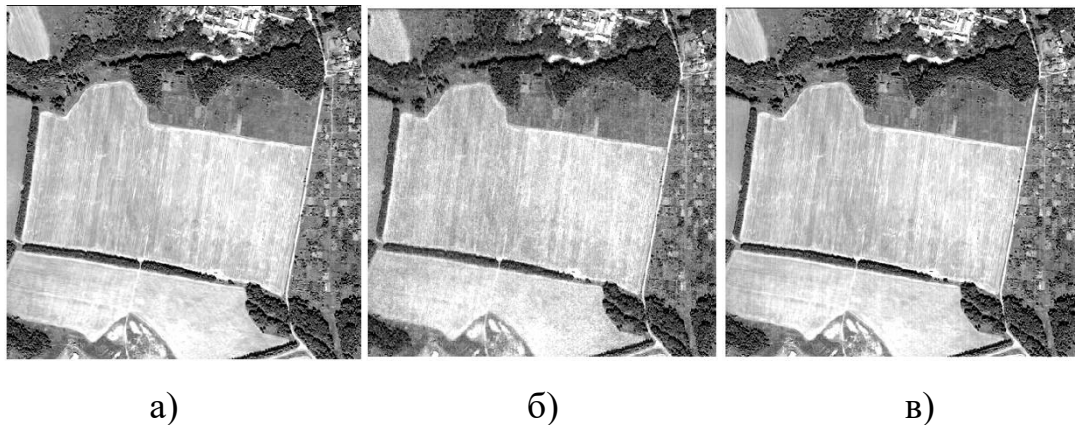
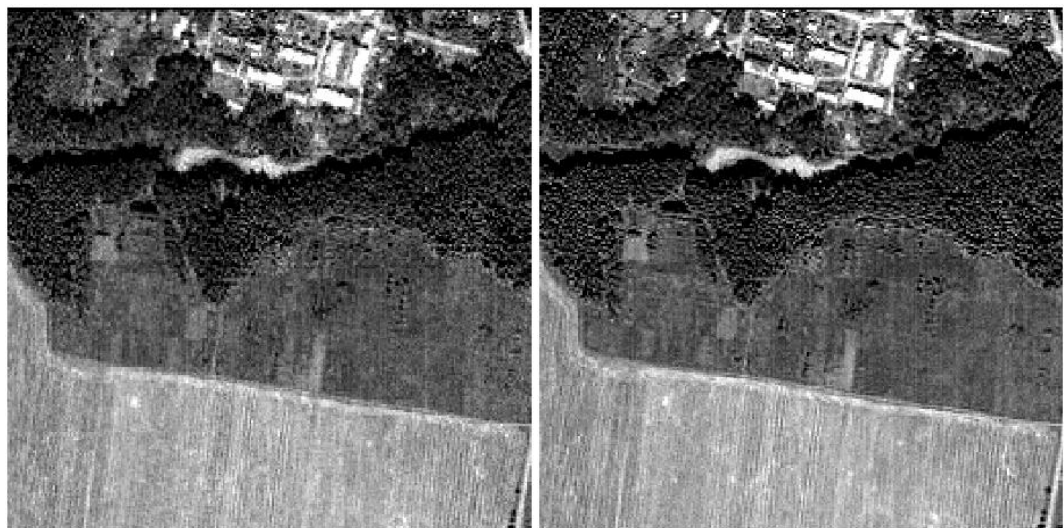


Рисунок 3.11 – Сравнение работы алгоритмов

а) Исходное изображение; б) Изображение, сжатое алгоритмом с исключением $\text{SCO} = 4.27$; 3,95 бит/пиксель; в) Изображение, сжатое алгоритмом с квантованием на 16 уровней, $\text{SCO} = 1.92$; 5.77 бит/пиксель

На рисунке 3.12 изображены фрагменты изображения, сжатые примерно до 3.3 бит/пиксель. На правом фрагменте, сжатом по алгоритму с квантованием более отчётливо видны мелкие детали.

Однако относительно высоких показателей сжатия можно добиться только при квантовании матрицы высокочастотных элементов на 2 уровня. Таким образом, предел сжатия данного метода – около 2 бит/пиксель (битовая карта – 1 бит, матрица уровней – 1 бит, упакованная матрица – переменного размера). СКО восстановленного изображения при высоких степенях сжатия становится хуже, чем у разработанного ранее метода. Это связано с тем, что высокий значение порога делится на малое количество уровней, из-за чего становится ощутимым снижение качества.



а)

б)

Рисунок 3.12 – Сравнение фрагментов изображения

а) Изображение, сжатое методом с исключением, СКО = 7,45; 3.44 бит/пиксель; б) Изображение, сжатое методом с квантованием на 2 уровня, СКО = 4.15; 3.33 бит/пиксель

В то же время предложенный алгоритм сжатия с исключением высокочастотной составляющей способен сжимать изображения до 1

бит/пиксель и более (но в этом случае сильно снижается качество восстановленного изображения по сравнению с исходным).

Далее следует рассмотреть альтернативный подход при сравнении данных алгоритмов. Если раньше измерялось качество восстановления в зависимости от степени сжатия, то теперь будет оцениваться качество восстановленных изображений при фиксированном пороге и различном числе уровней квантования.

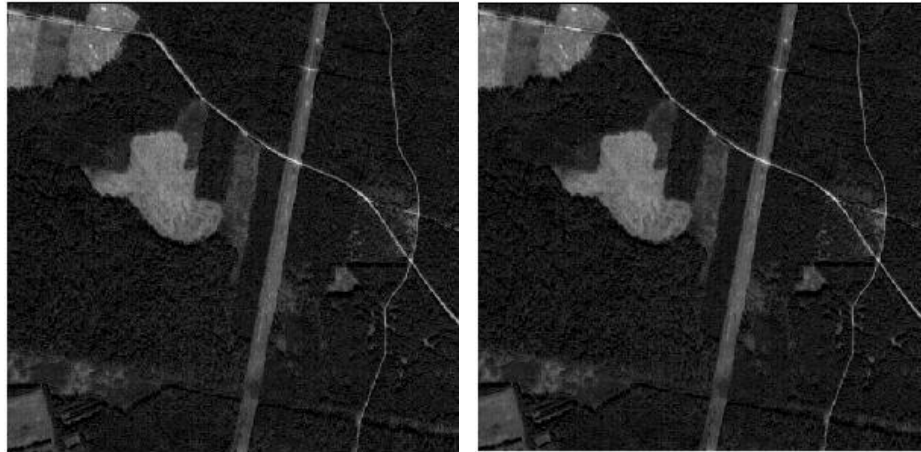
Рисунок 3.13а демонстрирует изображение, сжатое алгоритмом с прореживанием с высоким порогом исключения. Степень сжатия высока, однако мелкие детали изображения из-за явного проявления артефактов сжатия становятся малоразличимы.

Рисунки 3.13б-3.13г показывают улучшение качества изображения, сжатого с квантованием. Оптимальным в данном случае можно считать квантование на 4 уровня, так как 2 уровня не обеспечивают достаточного качества ($СКО = 7,46$), а 8 уровней предполагают низкую степень сжатия (для того, чтобы сжать изображение сильнее при 8 уровнях квантования, необходим более высокий порог).



а)

б)



в)

г)

Рисунок 3.13 – Сравнение алгоритмов сжатия при фиксированном пороге, равном 700 (исключено/проквантовано 94,1% спектра)

- а) Исключение составляющих, СКО = 9,78; 0,69 бит/пиксель;
- б) Квантование на 2 уровня, СКО = 7,46; 2,61 бит/пиксель;
- в) Квантование на 4 уровня, СКО = 3,29; 3,61 бит/пиксель;
- г) Квантование на 8 уровней, СКО = 2; 4,61 бит/пиксель

Таким образом, можно сделать вывод о том, что предложенный алгоритм имеет преимущества, так как он не исключает полностью высокочастотные составляющие спектра (как было предложено раньше), а сохраняет их приближенные значения. Такой подход позволяет улучшить качество восстановленного изображения. Однако степень сжатия данного алгоритма невысока и ограничена битовой карой и уровнями квантования.

Подобного ограничения можно избежать, разработав метод сжатия, основанный на квантовании всех значений спектра, кроме, возможно, постоянных составляющих.

3.3 Метод сжатия изображений в базисе функций с двоичной арифметикой, основанный на квазидвумерном спектральном представлении изображения. Алгоритмы сжатия изображения в квазидвумерном спектральном пространстве с равномерным и оптимальным квантованием составляющих

3.3.1 Оптимальное квантование

Для устранения информационной избыточности исходного сигнала к его квазидвумерному представлению применяются методы квантования[7].

В данной работе рассматривается применение равномерного и неравномерного квантования.

Равномерное квантование делит входной диапазон на равные уровни, то есть на равные поддиапазоны, и заменяет значения сигнала на ближайшие значения границ поддиапазонов.

Далее будет рассмотрено неравномерное квантование.

Пусть x - значение сигнала, а x_q - значение квантованного сигнала. Тогда $\varepsilon = x - x_q$ - ошибка квантования. То есть оптимальным будет квантователь, минимизирующий среднеквадратическую ошибку (3.15).

$$E(\varepsilon^2) = E\left((x - x_q)^2\right) = \min_{L_i, D_i}, \quad (3.15)$$

где L_i - значения порогов, D_i - значения расстояний между уровнями.

Квантователь, минимизирующий среднеквадратическую ошибку, известен как квантователь Ллойда-Макса[17,50,52]. Сравнение результатов равномерного и неравномерного квантования изображено на рисунке 3.14 .

Чтобы найти оптимальные значения уровней квантования, необходимо заранее знать функцию плотности вероятности появления значений сигнала.

Для большого числа уровней (от 64 и выше) и сигналов, являющихся квазидвумерными спектрами изображений, расчёт значений занимает достаточно много времени.

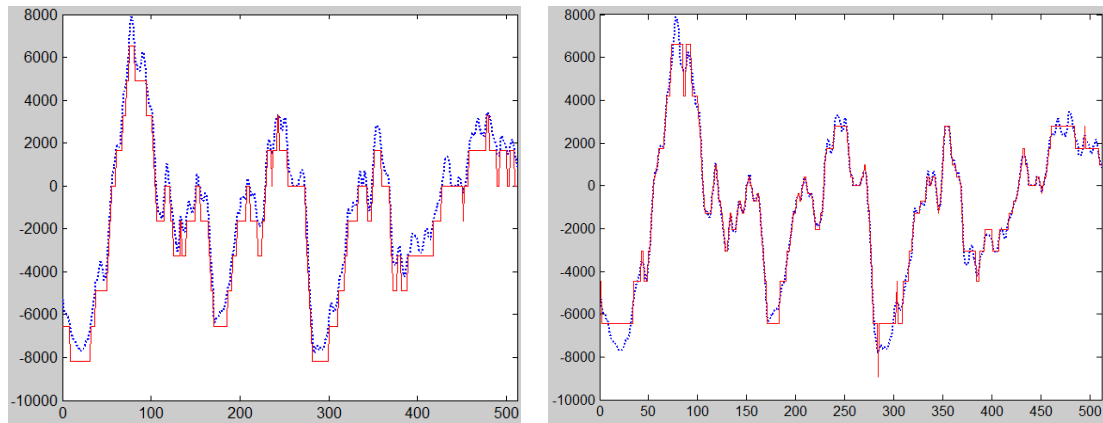


Рисунок 3.14 – Сравнение равномерного и неравномерного квантования

Этого недостатка можно избежать, приняв за оптимальные параметры значения, полученные для типовых представителей исследуемых сигналов[11].

3.3.2 Описание метода сжатия. Разработка алгоритмов сжатия

На основе теоретических сведений, изложенных выше, предлагается метод сжатия изображений. Данный 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 3.15.



Рисунок 3.15 – 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 3.15 для пошаговой реализации алгоритмов.

1. Исходное изображение преобразуется в квазидвумерный спектр ().
2. В полученном спектре выделяется первая строка (строка постоянных составляющих) 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 (). 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.

Схемы предложенных алгоритмов представлены на рисунке 3.16.



Рисунок 3.16 – Схемы алгоритмов сжатия изображений в квазидвумерном спектральном пространстве с равномерным и оптимальным квантованием составляющих

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).

3.4 Выводы по главе

В главе рассмотрены особенности применения функций Уолша к цифровым изображениям. Рассмотрены способы устранения избыточности, такие как пространственное, пороговое исключение высокочастотных составляющих, а также квантование значений. Показано, что применение квантования позволяет сохранять мелкие детали изображения.

Предложен алгоритм сжатия с квантованием высокочастотных составляющих, позволяющий сжать изображение до 4 раз и обладающий лучшим качеством восстановления по сравнению с алгоритмом с исключением высокочастотных составляющих.

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, разработаны алгоритмы, его реализующие.

Предложен алгоритм сжатия изображений в квазидвумерном спектральном пространстве с равномерным квантованием составляющих.

Предложен алгоритм сжатия изображений в квазидвумерном спектральном пространстве с оптимальным квантованием составляющих, обеспечивающий лучшее качество и детализацию по сравнению с равномерным квантованием.

4 РЕАЛИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМЫХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ

4.1 Разработка программных стендов для исследования алгоритмов с квантованием и исключением высокочастотных составляющих

Для реализации предлагаемых алгоритмов необходимо выбрать систему программирования, которая будет являться наиболее подходящей.

Система должна обладать следующими возможностями:

- удобство программирования;
- быстрота матричных операций;
- множество уже реализованных задач (например, быстрое преобразование Уолша) [46,76];
- развитая система справочной литературы, множество дополнительных источников для получения информации о системе и её возможностях;

Далее будет рассмотрена система программирования MATLAB (рисунок 4.1), её достоинства и недостатки[51].

Появление системы MATLAB относится к концу 70-х годов, когда первая версия этой системы была использована в Университете Нью Мехико и Стенфордском университете для преподавания курсов теории матриц, линейной алгебры и численного анализа. В это время активно разрабатывались пакеты прикладных программ по линейной алгебре LINPACK и EISPACK на языке FORTRAN, и авторы системы MATLAB искали способы использовать эти пакеты, не программируя на языке FORTRAN [46].

Сейчас возможности системы значительно превосходят возможности первоначальной версии матричной лаборатории Matrix Laboratory. Современный MATLAB — это высокоэффективный язык инженерных и научных вычислений. Он поддерживает математические вычисления, визуализацию научной графики и программирование с использованием легко

осваиваемого операционного окружения, когда задачи и их решения могут быть представлены в нотации, близкой к математической.

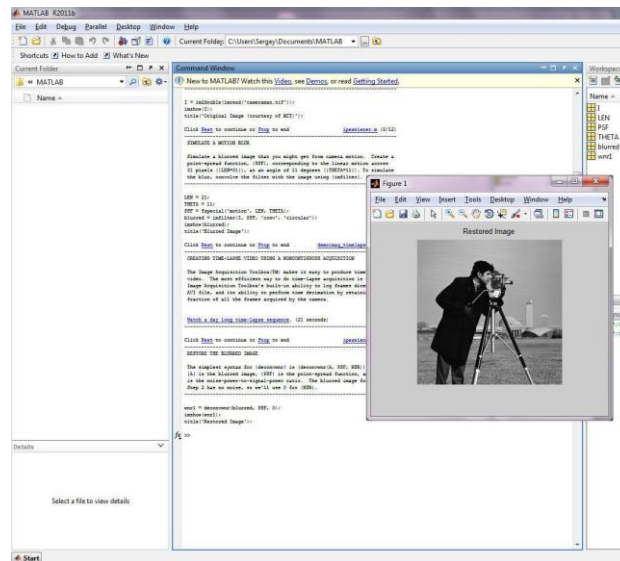


Рисунок 4.1 – Отображение главного окна и изображения в системе MATLAB

Основное достоинство данной системы — высокая скорость и доступность операций с матрицами (выделение строк и столбцов, изменение размера, логическая индексация и так далее)[76].

К достоинствам этой системы также можно отнести то, что MATLAB по сравнению с традиционными языками программирования (C/C++, Java, Pascal) позволяет на порядок сократить время решения типовых задач и значительно упрощает разработку новых алгоритмов [8,41].

Также стоит отметить, что MATLAB предоставляет удобные средства для разработки алгоритмов, включая высокоуровневые с использованием концепций объектно-ориентированного программирования. В нём имеются все необходимые средства интегрированной среды разработки, включая отладчик и профайлер. Функции для работы с целыми типами данных облегчают создание алгоритмов для микроконтроллеров и других приложений, где это необходимо. Так как разработанные алгоритмы работают с целыми числами, то данная особенность системы также является актуальной и полезной в решении поставленной задачи.

Минусом данной системы является её стоимость, однако компания MathWorks предлагает специальные условия лицензирования для использования ПО MATLAB и Simulink для обучения студентов.

В сравнении с бесплатными аналогами, а это, в первую очередь GNU Octave и Scilab, MATLAB отличается широкой функциональностью, удобным интерфейсом. Также, несмотря на программы перевода кода из одной системы в другую, с переносом проектов возникают дополнительные трудности.

На основании вышеизложенных фактов можно сделать вывод о том, что система MATLAB больше остальных подходит для реализации разработанных алгоритмов.

Разработанные программы «Программа сжатия изображений в квазидвумерном спектре с восстановлением постоянной составляющей и устранением высокочастотных элементов» и «Программа сжатия изображений в квазидвумерном спектре с квантованием высокочастотных элементов» предназначены для демонстрации результатов работы алгоритмов сжатия и восстановления изображения, описанных в главах 2 и 3.

Приложение разработано с помощью пакета прикладных программ MATLAB на одноимённом языке программирования.

Функциональным назначением программ является сжатие выбранного изображения по алгоритму с заданными параметрами (коэффициент прореживания, наличие корректировок), распаковка сжатого изображения, и вывод результатов на экран в виде основных параметров сжатия (СКО, ПОСШ, процента исключённых составляющих спектра и количества бит на пиксель в сжатом виде) и восстановленного изображения (то есть для сравнения на экране должны отображаться исходное и восстановленное изображение).

Диаграмма компонентов программы сжатия изображений в квазидвумерном спектре с восстановлением постоянной составляющей и устранением высокочастотных элементов представлена на рисунке 4.2.

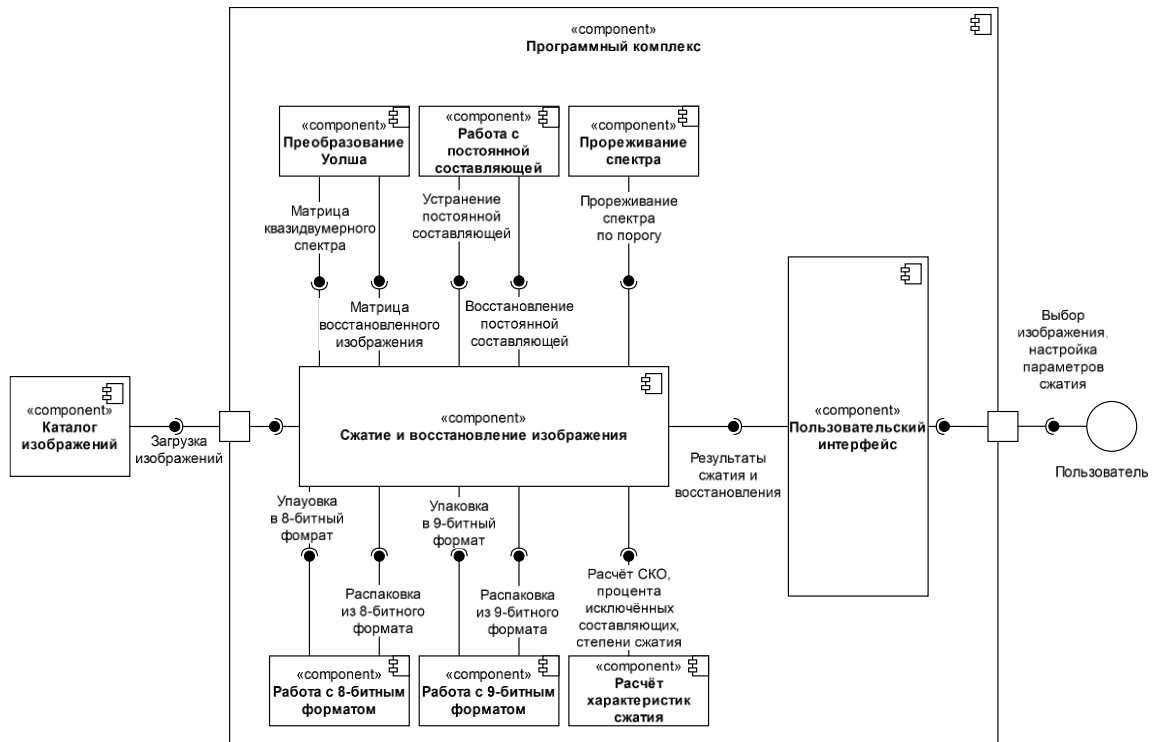


Рисунок 4.2 – Диаграмма компонентов программы, предназначенной для исследования алгоритма сжатия

Программное обеспечение разработано в системе Matlab в виде скриптов, использующих библиотеки Image Processing Toolbox, Signal Processing Toolbox.

Окно интерфейса пользователя изображено на рисунке 4.3



Рисунок 4.3 – Окно интерфейса пользователя программного обеспечения для изучения сжатия с квантованием

Разработанное программное обеспечение позволяет изучать влияние исключения и равномерного квантования высокочастотной составляющей на сжатие изображений.

4.2 Исследование алгоритмов с равномерным и оптимальным квантованием квазидвумерного спектра

Работа предложенных алгоритмов с равномерным и оптимальным квантованием квазидвумерного спектра была исследована на различных типах изображений, в частности на изображениях пересечённой и городской местности. Порог прореживания k был равен 250 в обоих случаях.

В качестве оценки параметров сжатия были выбраны СКО (RMSE, Root-mean-square error), m – число бит, которое отводится на хранение одного квантованного значения в спектре, а также число бит на один пиксель в сжатом формате. В исходном изображении на один пиксель приходится 8 бит.

Пример сжатия изображений с равномерным квантованием спектра изображён на рисунке 4.4.

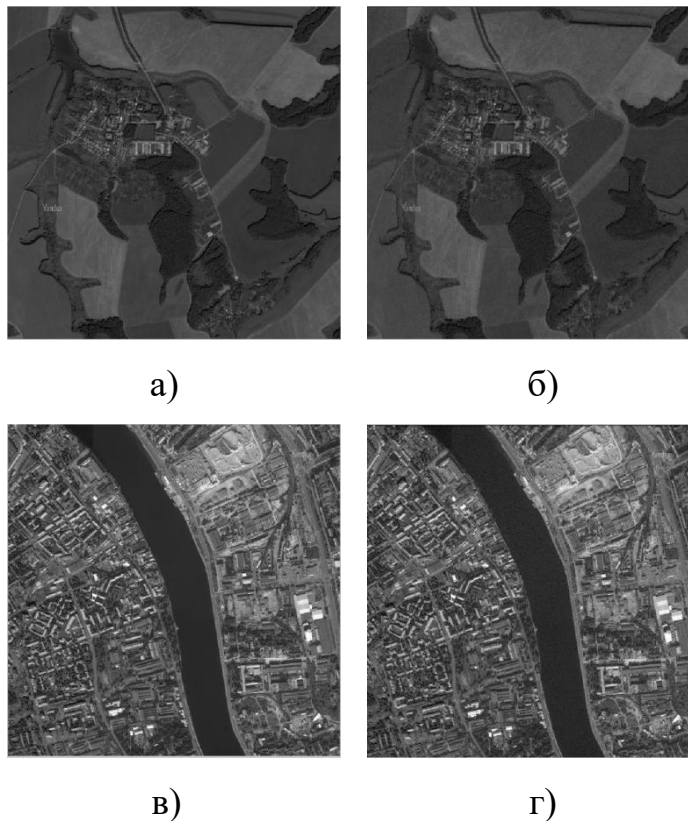


Рисунок 4.4 – Сжатие с равномерным квантованием

- а) Исходное ландшафтное изображение
- б) Сжатое изображение, СКО = 6.56, $m = 7$ бит, 1.89 бит/пиксель
- в) Исходное изображение городской местности
- г) Сжатое изображение, СКО = 7.61, $m = 7$ бит, 3.04 бит/пиксель

Результаты работы алгоритма сжатия с оптимальным квантованием изображены на рисунке 4.5.

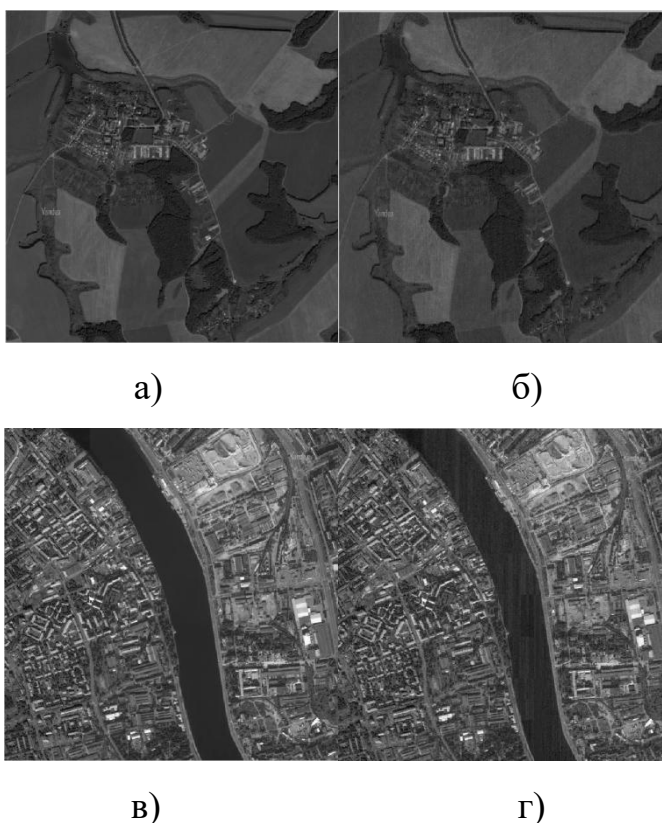


Рисунок 4.5 – Сжатие с оптимальным квантованием

- а) Исходное ландшафтное изображение
- б) Сжатое изображение, СКО = 5.06, $m = 4$ бит, 0.93 бит/пиксель
- в) Исходное изображение городской местности
- г) Сжатое изображение, СКО = 7.1, $m = 4$ бит, 1.60 бит/пиксель

Результаты, полученные для разного числа бит, в которых хранятся квантованные значения, представлены в таблице 4.1.

Таким образом, оптимальным для практического применения будет являться сжатие методом оптимального квантования спектра с использованием 4 бит на уровень квантования.

На основании приведённых результатов можно сделать выводы о том, что предложенные алгоритмы сжатия позволяют сжать изображение в 5-10 раз при приемлемом качестве изображения[11].

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. Данные методы можно применять в задачах передачи изображений по каналам связи [10,11].

Таблица 4.1 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

4.3 Сравнение разработанных алгоритмов и существующих методов сжатия по критериям качества восстановленных изображений и времени сжатия

Важными характеристиками алгоритмов сжатия являются степень сжатия, которая может быть выражена количеством бит на один пиксель в сжатом виде, а также качество восстановления изображений. В данной работе для оценки качества используется величина среднеквадратического отклонения (СКО) между исходным и восстановленным после сжатия изображениями.

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 всех 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 высокодетализированных изображений.

Результаты зависимости качества восстановленных изображений от степени сжатия для исследуемых алгоритмов представлены на рисунке 4.6.

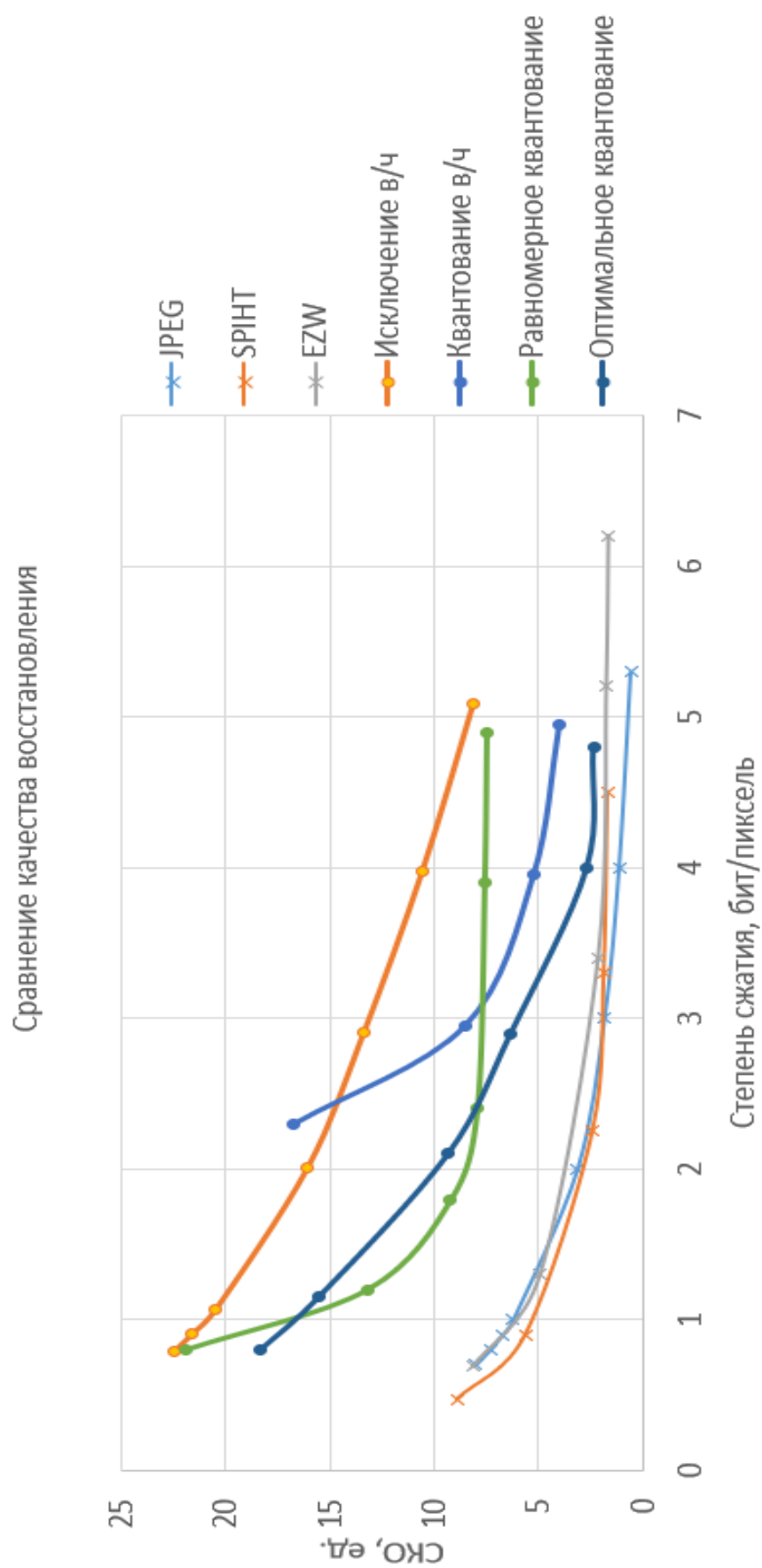


Рисунок 4.6 – Сравнение качества восстановления исследуемых алгоритмов

Результаты зависимости времени сжатия изображений от степени сжатия для исследуемых алгоритмов представлены на рисунке 4.7.

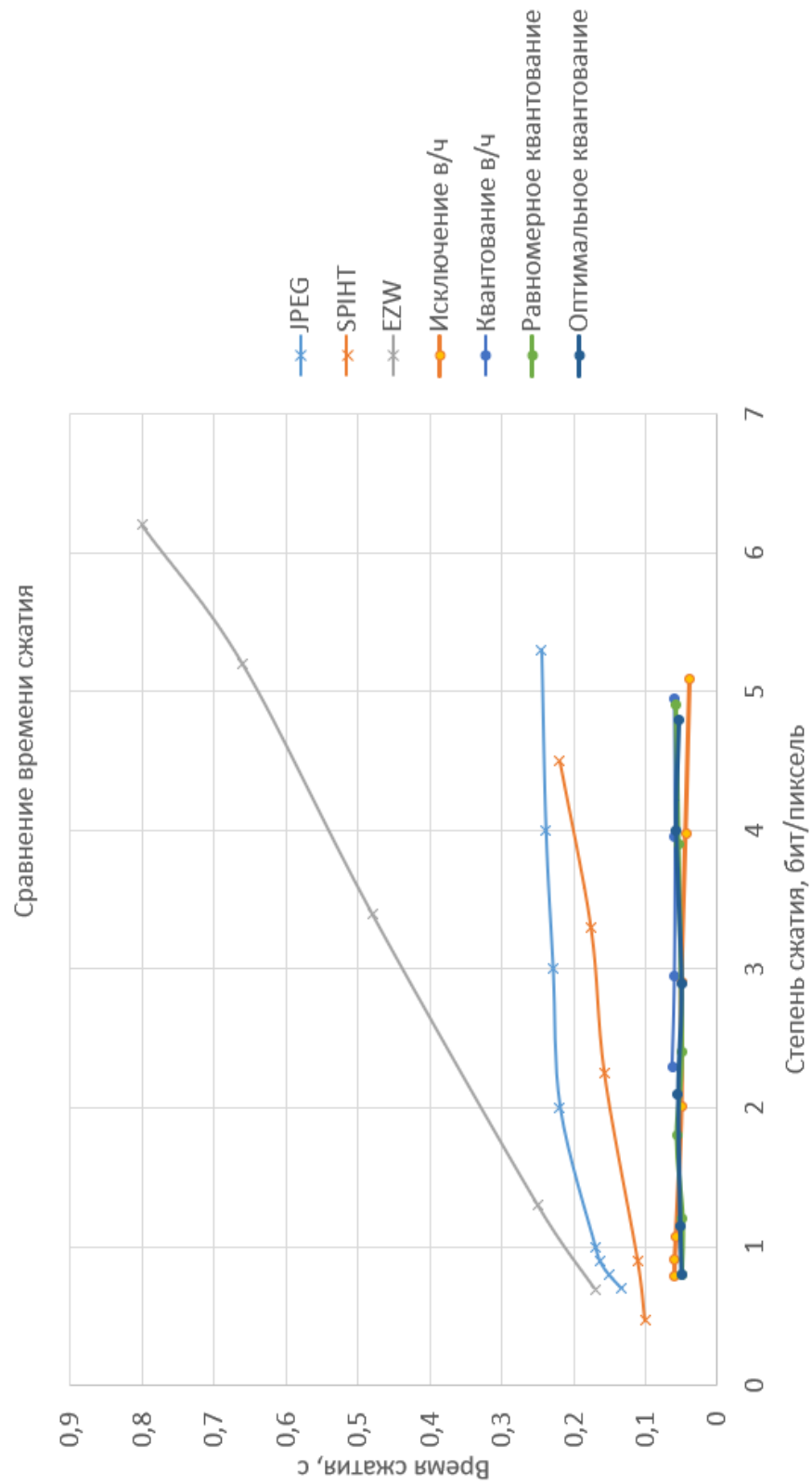


Рисунок 4.7 - Сравнение времени сжатия исследуемых алгоритмов

Графики на рисунках рисунке 4.6 и рисунке 4.7 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.

4.4 Выводы по главе

В главе приведён выбор средств реализации предложенных алгоритмов.

Представлены программы для исследования работы алгоритмов.

Получены результаты исследования алгоритмов, реализующих метод сжатия с квантованием значений квазидвумерного спектра.

Сравнение времени работы предложенных и известных алгоритмов сжатия показало, что предложенные алгоритмы способны обеспечить выигрыш во времени сжатия от 1,8 раз при фиксированной степени сжатия.

Учитывая результаты исследований, можно сделать вывод, что значительного увеличения производительность обработки изображений можно добиться применением предложенных алгоритмов в системах передачи изображений с ограничениями на мощность и вычислительные возможности каналообразующего оборудования; предложенные алгоритмы могут найти применение в задачах обработки изображений с нестрогими требованиями к степени сжатия и детализации изображений и жёсткими требованиями ко времени сжатия/распаковки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 актуальной научной 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 каналаобразующего 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;

8. Разработаны программы, включающие реализацию предложенных алгоритмов. На основе полученных в ходе работы программ данных произведено исследование разработанных алгоритмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **A. Y. Gromov D. S. Stepanov, E. P. Koroleva and A. S. Bastrychkin** 2018 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) [Конференция] // Image compression in quasi-two-dimensional spectrum with quantizing of high-frequency component. - Budva : [б.н.], 2018.
2. **Asawari Kulkarni Aparna Junnarkar** Gray-Scale Image Compression Techniques: A Review [Статья] // International Journal of Computer Applications. - 2015 г..
3. **Ascenso J., Alshina E. and Ebrahimi T.** The JPEG AI Standard: Providing Efficient Human and Machine Visual Data Consumption [Article] // IEEE MultiMedia. - 2023. - №1 : Vol. 30. - pp. 100-111.
4. **Aseel M. Mahdi Loay E.George, Faisal G. Mohammed** Lossy Compression for Raw Satellite Images Using Intra Frame and Inter Frame Coding [Статья] // International Journal of Science and Research (IJSR).
5. **Babaev S.I. Bastrychkin A., Kostrov B.V., Lukina N.V., Vyugina A.A., Koroleva E.P.** Aspects of binary images spectral analysis [Статья] // 2019 8TH MEDITERRANEAN CONFERENCE ON EMBEDDED COMPUTING, MECO 2019 - PROCEEDINGS. - Budva : [б.н.], 2019 г..
6. **Baranchikov A.I. Babaev S.I., Zverev A.E., Sumenkov N.A., Bastrychkin A.S.** The issues of orthogonal basis dimension selection in embedded image processing systems [Статья] // 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2021. - Budva : [б.н.], 2021 г..
7. **Bastrychkin A. Babaev S.I., Kostrov B.V., Grinchenko N.N.** Image compression using optimal quantization [Статья] // 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing. - Budva : [б.н.], 2020 г..
8. **Bastrychkin A.S. Borisov D.A., Khizrieva N.I., Kostrov B.A., Petrovskaya T.A., Suslina A.A.** INTERFERENCE IMMUNITY OF IMAGE TRANSMISSION CHANNEL [Статья] // 7th Mediterranean

- Conference on Embedded Computing, MECO 2018 - Including ECYPS 2018. - Budva : [б.н.], 2018 г..
9. **Bastrychkin A.S. Kostrov B.V., Grinchenko N.N., Svetlov G.V.** Calculation of image transmission partial spectrum [Статья] // 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2020. - Budva : [б.н.], 2020 г..
 10. **Boris V. Kostrov Anastasiya G. Svirina, Sergey I. Babaev, Vladimir Ruchkin, Alexander Bastrychkin,** 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing MECO - 2017 [Конференция] // Image compression and restoration in embedded computing systems. - Bar, Montenegro : [б.н.], 2017. - стр. 183-187.
 11. **Borovkov I. Silkin G., Vyugina A., Bastrychkin A.** Landscape images generation algorithm development [Статья] // 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2021.. - Budva : [б.н.], 2021 г..
 12. **D. Ahmed Shaymaa & George, Loay & Dhannoon, Ban.** The Use of Cubic Bezier Interpolation, Biorthogonal Wavelet and Quadtree Coding to Compress Color Images. [Статья] // British Journal of Applied Science & Technology.. - 2015 г..
 13. **Diego Santa-Cruz Raphaël Grosbois, Touradj Ebrahimi** JPEG 2000 performance evaluation and assessment [Статья] // Signal Processing: Image Communication. - 2002 г.. - 1 : Т. 17.
 14. **H. K. Albahadily V. Yu. Tsvetkov** Developed RLE algorithm and bitplane slicing to compress grayscale image [Статья] // Big Data and Advanced Analytics.. - 2017 г.. - Т. 3. - стр. 105-109.
 15. **Ibrahim Hassan & Majid, Mohammed & Nafea, Ali.** A Comparative Analysis between DCT and JPEG2000 Modules Algorithms. [Статья] // Texas Journal of Engineering and Technology. - 2021 г..

16. **Ji Xh & Zhang, Caiming & Wang, Jiaye & Boey, S.** Fast 2-D 8×8 discrete cosine transform algorithm for image coding [Статья] // Science in China Series F: Information Sciences. . - 2009 г..
17. **K. Kunaraj & Vaithyanathan, D. & Seshasayanan, R. & Keerthiga, J.** An Evolved Wavelet Library Based on Genetic Algorithm [Статья] // The Scientific World Journal. - 2014 г..
18. **Kostrov B.V. Babaev S.I., Bastrychkin A., Baranchikov A.I., Kolesenkov A.N.** IMAGE COMPRESSION BASED ON WALSH SPECTRA [Статья] // 13th International Conference ELEKTRO 2020, ELEKTRO 2020. - Taormina : [б.н.], 2020 г..
19. **Li Xiangjun & Zhang, Shuili & Zhao, Haibo.** A Fast Image Compression Algorithm Based on Wavelet Transform [Статья] // International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing. - 2021 г..
20. **Mansouri Anass & Ali, Ahaitouf & Abdi, F.** Fast FPGA Implementation of EBCOT block in JPEG2000 Standard [Статья] // International Journal of Computer Science Issues. - 2011 г..
21. **Michael W. Marcellin Michael J. Gormish, Ali Bilgin, Martin P. Boliek** IEEE Data Compression Conference [Конференция] // An Overview of JPEG-2000. - 2000.
22. **Mundy David B.** The study and HDL implementation of the JPEG 2000 MQ coder [Graduate Theses and Dissertations]. - Dayton : [б.н.].
23. **P. Viswanthan and Kalavathi P.** Subband Thresholding for Near-Lossless Medical Image Compression [Article] // International Journal of Computing and Digital Systems. - 2023. - №1 : Vol. 14. - pp. 63-72.
24. **Rahman M.A., Hamada M. and Shin J.** The Impact of State-of-the-Art Techniques for Lossless Still Image Compression [Article] // Electronics . - 2021. - №3 : Vol. 10.

25. **Saidani Taoufik & Zayani, Hafedh** Design of a High Speed Architecture of MQ-Coder for JPEG2000 on FPGA. [Статья] // International Journal of Advanced Computer Science and Applications.. - 2017 г..
26. **Saptariani T. & Madenda, Sarifuddin & Ernastuti, Ernastuti & Silfianti, Widya.** Accelerating compression time of the standard JPEG by employing the quantized YCbCr color space algorithm. [Статья] // International Journal of Electrical and Computer Engineering.. - 2018 г..
27. **Tinku Acharya Ping-Sing Tsai** JPEG2000 Standard for Image Compression: Concepts, Algorithms and VLSI Architectures, 304с. [Книга]. - [б.м.] : John Wiley & Sons, 2005.
28. **А. А. Прошин Е. А. Лупян, М. А. Бурцев** Особенности использования алгоритма сжатия изображений LERC для архивации данных ДЗЗ [Статья] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.. - Москва : [б.н.], 2024 г.. - 6 : Т. 21. - стр. 130-142.
29. **А. А. Умбиталиев С. В. Дворников, И. Н. Оков, А. А. Устинов** Способ сжатия графических файлов методами вейвлет-преобразований [Статья] // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения.. - 2015 г.. - №3. - стр. 100-106.
30. **А. И. Бакланов В. Д. Блинов, И. А. Горбунов [и др.]** Аппаратура высокого разрешения для перспективного космического аппарата "Ресурс-ПМ" [Статья] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). - 2016 г.. - №2 : Т. 15. - стр. 30-35.
31. **А. М. Сергеев Н. Ш. Блаунштейн** Ортогональные матрицы симметричных структур для задач цифровой обработки изображений [Статья] // Информационно-управляющие системы. - 2017 г.. - №6. - стр. 2-8.

32. **А.Г. Упакова** 6-я международная научно-техническая конференция «Космонавтика. Радиолектроника. Геоинформатика» / Рязан. гос. радиотехн. университет. [Конференция] // Построение базиса на основе систем функций, арифметически кратных двоичной системе. - Рязань : [б.н.], 2013. - стр. 271-272.
33. **А.С. Бастрычкин** Выбор размерности ортогонального базиса для передачи изображений [Статья] // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2021. Сборник трудов IV Международного научно-технического форума. - Рязань : [б.н.], 2021 г..
34. **Агиевич С. Н.** Сплайн-Виленкина-Крестенсона функции в представлении сигналов [Статья] // Научное приборостроение. - 2002 г.. - №1 : Т. 12. - с. 79-89.
35. **Асаев А.С. Костров Б.В., Муратов Е.Р.** 3-я межвузовская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые технологии в учебном процессе и производстве» [Конференция] // Сравнение трудоемкости вычислений спектров изображений Фурье и Уолша (тезисы доклада). - Рязань : МГОУ РИ, 2005. - стр. 33.
36. **Ахмед Н. Рао К.Р.** Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов. [Книга]. - М : Связь, 1980. - 248 с.
37. **Балобанов А. В., Балобанов В. Г. и Безруков В. Н.** Сжатие цифрового потока видеосигнала в телевизионном канале связи [Статья] // Инфокоммуникационные технологии. - 2013 г.. - №3 : Т. 11. - с. 60-64.
38. **Балонин Н. А. и Сергеев М. Б.** О расширении ортогонального базиса в задачах сжатия видеоизображений [Статья] // Вестник компьютерных и информационных технологий. - 2014 г.. - №2(116). - с. 11-15.
39. **Бастрычкин А.С. Костров Б.В.** 7-я международная научно-техническая конференция "К.Э.Циолковский - 160 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика" [Конференция] //

- Прореживание изображений при передаче по каналу связи. - Рязань : РГРТУ, 2017.
40. **Бастрычкин А.С. Костров Б.В., Гринченко Н.Н., Костров Б.А.** Формирование трафика в системах передачи данных [Статья] // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2022. Сборник трудов V Международного научно-технического форума. . - Рязань : [б.н.], 2022 г..
41. **Быков В. В.** Некоторые методы Матлаба для обработки и передачи изображений [Статья] // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. - 2024 г.. - №1 : Т. 14. - с. 10-18.
42. **В. В. Старовойтов Ф. В. Старовойтов** Сравнительный анализ безэталонных мер оценки качества цифровых изображений [Статья] // Системный анализ и прикладная информатика.. - 2017 г.. - №1. - стр. 24-32.
43. **В. Г. Бондур С. А. Старченков** Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений [Статья] // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка.. - 2001 г.. - №3. - стр. 118-143.
44. **В. Т. Еременко В. В. Линьков** Методика выбора метода и параметров сжатия цифровых изображений в модульных структурах сбора и обработки данных АСУП [Статья] // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.. - 2007 г.. - №4. - стр. 207-212.
45. **В.В. Старовойтов** Локальные геометрические методы цифровой обработки и анализа изображений [Книга]. - Минск : Институт технической кибернетики НАН Беларуси, 1997. - 284 с..
46. **В.Г. Потемкин** Вычисления в среде MATLAB [Книга]. - М : Диалог-МИФИ, 2004. - 720 с.

47. **А.Г. Свирина.** Визуализация алгоритма быстрого преобразования Уолша [Статья] // Вычислительные машины комплексы системы и сети. Приложение к межвуз. сб. науч. трудов «Методы и средства обработки и хранения информации». - Рязань, РГРТУ : [б.н.], 2011 г.. - стр. 15-16.
48. **Волчков В. П. и Асирян В. М.** Сжатие изображений с использованием дискретного преобразования Вейля - Гейзенберга [Статья] // Экономика. Информатика. - 2020 г.. - №2 : Т. 47. - с. 412-421.
49. **Голубов Б.И. Ефимов А.В., Скворцов В.А.** Ряды и преобразования Уолша: Теория и применения [Книга]. - М : Наука, 1987. - 344 с.
50. **Гонзалес Р. Вудс Р.** Цифровая обработка изображений [Книга]. - М : Техносфера, 2006. - 1072 с.
51. **Гонзалес Р. Вудс Р., Эддинс С.** Цифровая обработка изображений в среде MATLAB [Книга]. - М : Техносфера, 2006. - 616 с.
52. **Гусев С. И. [и др.]** Алгоритм сжатия радиоголограмм на борту космических аппаратов с РСА [Статья] // Цифровая обработка сигналов. - 2022 г.. - №1. - с. 3-7.
53. **Гусев С. И. [и др.]** Цифровая обработка данных радиолокационного зондирования Земли из космоса [Книга]. - М : Общество с ограниченной ответственностью Издательство "КУРС", 2021. - 248 с.
54. **Гусев С. И., Таганов А. И. и Колесенков А. Н.** Интеллектуальные методы и технологии передачи и обработки информации аэрокосмических систем [Статья] // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. - 2017 г.. - №60. - с. 65-74.
55. **Д. Ватолин А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкин.** Методы сжатия данных : Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео [Книга]. - Москва : ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. - 384 с.
56. **Д.Сэломон** Сжатие данных, изображений и звука [Книга]. - Москва : Техносфера, 2004. - 368 с.

57. **Дворкович В.П. Дворкович А.В.** Цифровые видеоинформационные системы (теория и практика) [Книга]. - Москва : Техносфера, 2018. - 1008 с.
58. **Дроздов С. Н. [и др.]** Стандарт JPEG2000: базовые алгоритмы, примеры реализации и перспективы применения [Книга]. - Ростов-на-Дону : Южный федеральный университет, 2014. - 256 с..
59. **Е. Г. Жилияков А. В. Коськин, И. И. Лубков, А. А. Черноморец** Субполосная аппроксимация изображений при сжатии объемов битовых представлений [Статья] // Экономика. Информатика.. - Белгород : [б.н.], 2022 г.. - 3 : Т. 49. - стр. 607-615.
60. **Злобин В.К. Еремеев В.В.** Обработка аэрокосмических изображений [Книга]. - М : ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 288 с.
61. **Злобин В.К. Костров Б.В.** Теоретические и методологические аспекты применения системы функций Виленкина — Крестенсона для обработки изображений [Статья] // Вестник Рязанского государственного радиоуниверситета. - Рязань : [б.н.], 2013 г.. - 45 : Т. 3. - стр. 12-17.
62. **Злобин В.К. Костров Б.В., Саблина В.А.** Место и роль секвентного анализа в обработке аэрокосмических изображений [Дневник] // Радиотехника. - Рязань : [б.н.], 2012 г.. - 3. - стр. 64-75.
63. **Злобин В.К. Костров Б.В., Свирина А.Г.** Спектральный анализ изображений в конечных базисах [Книга]. - М : М: КУРС:ИНФРА, 2016. - 2016 с.
64. **Квитек Е.В.** Фильтрация измерительных сигналов, представимых в базисе функций Уолша [Статья] // Вестник Оренбургского государственного университета. - Оренбург : [б.н.], 2001 г.. - 3. - стр. 80-85.
65. **Колесенков А.Н. Костров Б.В.** Метод прореживания базисных функций в корреляционно-экстремальных алгоритмах [Статья] // Вопросы радио-электроники. - Сер. ОТ : [б.н.], 2010 г.. - 1. - стр. 176-184.

66. **Костикова Е. В., Фахми Ш. С. и Хасан Я. А. А.** Адаптивное спектральное кодирование изображений в системах видеонаблюдения [Статья] // Морские интеллектуальные технологии.. - 2020 г.. - №2-1(48). - с. 142-151.
67. **Костров Б. В. Бастрычкин А. С.** Метод передачи изображений с квантованием высокочастотной составляющей [Статья] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - Тула : ТулГУ, 2018 г.. - 2. - стр. 75-82.
68. **Костров Б.В Бастрычкин А.С.** Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2017: сб. тр. между-нар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. [Конференция] // Методическая ошибка прокола передачи изображения. - Рязань : [б.н.], 2017. - Т. 3. - стр. 250-253.
69. **Костров Б.В. Бабаев С.И., Упакова А.Г.** Построение базиса в обобщенной системе ортогональных функций [Статья] // Вестник Рязанского государственного радиоуниверситета. - Рязань : [б.н.], 2014 г.. - 47 : Т. 1. - стр. 43-46.
70. **Костров Б.В. Бастрычкин А.С.** Сборник трудов «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2016, РГРТУ [Конференция] // Модификация метода передачи изображений без постоянной составляющей. - Рязань : [б.н.], 2016. - стр. 311-313.
71. **Костров Б.В. Бастрычкин А.С., Костров Б.А., Степанов Д.С.** Интеллектуальные и информационные системы: Материалы Всероссийской научно-технической конференции/ Тульский Государственный Университет. [Конференция] // Протокол передачи изображений по каналу связи.. - Тула : [б.н.], 2016. - стр. 220-225.
72. **Костров Б.В. Гринченко Н.Н., Степанов Д.С., Упакова А.Г.** Алгоритм передачи изображения с восстановлением постоянной составляющей [Статья] // Известия Тульского государственного

- университета. Технические науки. - Тула : [б.н.], 2013 г.. - 9 : Т. 1. - стр. 43-46.
- 73. Костров Б.В. Некрасова О.С., Свирина А.Г.** Метод квазивумерной фильтрации групповых помех [Статья] // Методы и средства обработки и хранения информации. Межвуз сб. науч. трудов. РГРТУ.. - Рязань : [б.н.], 2010 г.. - стр. 152-156.
- 74. Костров Б.В. Пашенцев Д.Ю., Саблина В.А.** Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Интеллектуальные и информационные системы» Интеллект – 2007 [Конференция] // К вопросу выбора способа упорядочивания функций Уолша при использовании его в целях обработки изображений. - Тула : [б.н.], 2007. - стр. 71-74.
- 75. Костров Б.В. Саблина В.А.** Исследование перспектив применения нетригонометрических ортогональных систем базисных функций в области восстановления изображений [Статья] // Информатика и прикладная математика. Межвузовский сборник научных трудов.. - Рязань : [б.н.], 2008 г.. - стр. 78-83.
- 76. Костров Б.В. Упакова А.Г., Баюков К.И.** Реализация преобразования Уолша в пакете прикладных программ Matlab. Определение наиболее эффективного алгоритма [Статья] // Информатика и прикладная математика. Межвуз сб. науч. трудов. РГУ им. С.А. Есенина. - Рязань : [б.н.], 2013 г.. - стр. 38-41.
- 77. Л.А. Залманзон** Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях [Книга]. - М : Наука, 1989. - 496 с.
- 78. Левенец А. В., Токарев Р. Е. и Чье Е. У.** Применение популярных алгоритмов компрессии изображений для сжатия измерительных данных [Статья] // Вестник Тихоокеанского государственного университета. - 2012 г.. - №4(27). - с. 125-132.

79. **М. М. Ляшева С. А. Ляшева, В. М. Трегубов, М. П. Шлеймович** Метод сжатия изображений на основе анализа весов детализирующих коэффициентов вейвлет-преобразования [Статья] // Инженерный вестник Дона. - 10. - стр. 230-238.
80. **М.В.Обидин А.П.Серебровский** Вейвлеты и адаптивный трешолдинг [Статья] // ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ. - [б.м.] : Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН , 2013 г..
81. **Миано. Д.** Форматы и алгоритмы сжатия изображений в действии [Книга]. - Москва : Триумф, 2003. - 336 с..
82. **Н. А. Балонин М. Б. Сергеев** Матрицы локального максимума детерминанта [Статья] // Информационно-управляющие системы.. - 2014 г.. - №1. - стр. 2-15.
83. **Новинский Н. Б.** Применение технологии CUDA для фрактального сжатия изображения [Статья] // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. - 2011 г.. - №4 : Т. 1. - стр. 160-163.
84. **Оппенгейм А.В. и Шафер Р.В.** Цифровая обработка сигналов [Книга]. - М : Москва : Рекламно-издательский центр "Техносфера", 2012. - 1048 с.
85. **С. В. Дворников А. А. Устинов, И. Н. Оков и др.** Способ сжатия графических файлов [Статья] // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения.. - 2017 г.. - 4. - с. 77-86..
86. **С. Н. Агиевич С. В. Дворников, А. С. Гусельников** Описание сигналов в базисах функций сплайн-Виленкина-Кристенсона [Статья] // Контроль. Диагностика. - 2009 г.. - №3. - с. 52-57.
87. **Сай С. В. и Шоберг А. Г.** Способ управления качеством передачи мелких структур изображений в стандарте JPEG2000 [Статья] // Компьютерная оптика.. - 2020 г.. - №3 : Т. 44. - с. 401-408.
88. **Сай С. В.** Сравнительный анализ четкости изображений в стандартах сжатия JPEG и JPEG 2000 [Статья] // Электронные средства и системы

- управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции.. - 2007 г.. - №1. - стр. 268-271.
89. **Сергиенко А.Б.** Цифровая обработка сигналов [Книга]. - СПб : Питер, 2002. - 608 с.
90. **Симаков А. В.** Параллельное сжатие больших изображений [Статья] // Вестник Сыктывкарского университета. Серия 1: Математика. Механика. Информатика.. - 2008 г.. - №8. - стр. 109-127.
91. **Сирота А. А. и Дрюченко М. А.** Обобщённые алгоритмы сжатия изображений на фрагментах произвольной формы и их реализация с использованием искусственных нейронных сетей [Статья] // Компьютерная оптика. - 2015 г.. - №5 : Т. 39. - с. 751-761.
92. **Скляр Б.** Цифровая связь : теоретические основы и практическое применение [Книга]. - М : Вильямс, 2007.
93. **Сюзев В.В Савельев А.Я., Гудзенко Д.Ю.** Методы представления и преобразования сигналов в базисе обобщенных функций Крестенсона [Статья] // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование». - 2012 г.. - <http://technomag.edu.ru/doc/372760.html>.
94. **Трахтман А.М. Трахтман В.А.** Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах [Книга]. - М : Сов. радио, 1975. - 208 с.
95. **Умбиталиев А. А. Цыцулин А. К., Левко Г. В. и др.** Теория и практика космического телевидения [Книга]. - СПб : НИИ телевидения, 2017. - 368 с..
96. **Умняшкин С. В. и Курина В. В.** Алгоритм сжатия изображений на основе дискретного псевдокосинусного преобразования [Статья] // Цифровая обработка сигналов. - 2009 г.. - №3. - с. 2-7.
97. **Хармут Х.** Теория секвентного анализа: основы и применения. [Книга]. - М : Мир, 1980. - 574 с.

98. **Хаханова Ирина Витальевна** Системная модель аппаратной реализации MQ-кодера [Статья] // Радиоэлектроника и информатика.. - 2007 г.. - 4.
99. **Хуанг Т.С.** Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений [Книга]. - М : Радио и связь, 1984. - 224 с.
100. **Чекина М. Д.** Реализация фрактального сжатия и декомпрессии изображений параллельно-ковейерным способом на реконфигурируемых вычислительных системах [Статья] // Известия ЮФУ. Технические науки.. - 2020 г.. - №7. - стр. 130-142.
101. **Черников А. В. и Чобану М. К.** Сжатие изображений на базе вейвлет-преобразования и иерархического алгоритма кодирования [Статья] // Цифровая обработка сигналов. - 2005 г.. - №2. - с. 40-49.

ПРИЛОЖЕНИЯ**ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Акты внедрения результатов кандидатской диссертации****kvan
tron****ООО «Квантрон Групп»**

390000, г. Рязань, ул. Каширина, д. 1Б, офис 507,
ИНН 6234189553, КПП 622901001, ОГРН 1206200003437,
Р/С 40702810502020001647, К/С 30101810200000000593,
БИК 044525593, АО «АЛЬФА-БАНК», г. Москва,
тел. +7 (4912) 722-270
info@kvantron.com
www.kvantron.com

Акт внедрения результатов кандидатской работы Бастрычкина Александра Сергеевича в производственном процессе компании ООО «Квантрон Групп»

г. Рязань, 24.03.2025

Настоящим актом удостоверяется, что результаты экспериментальных исследований, полученные Бастрычкиным А.С. в ходе работ над кандидатской диссертацией, внедрены в научно-технической деятельности предприятия ООО «Квантрон-групп».

Алгоритмы и метод сжатия нашли своё применение:

- в системе передачи изображений для обнаружения (детекции) продукции на инспекционном столе;
- в модуле хранения видеопотока кадров для расследования случаев, связанных с обнаружением остановок на линии.

Предлагаемые алгоритмы и метод сжатия позволили:

- на 60-80% сократить время обработки кадров для хранения части видеопотока кадров, на которых зафиксирована остановка на линии.
- до 8 раз сократить объём памяти, затрачиваемый на хранение видеопотока кадров для расследования случаев, связанных с обнаружением остановок на линии.

Генеральный директор

ООО «Квантрон групп»,
кандидат технических наук



М.В. Шадрин





«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. ректора РГРТУ, к.э.н., доц.

Банников С.А.

«30» 05 2025 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертации на соискание учёной степени кандидата
технических наук

БАСТРЫЧКИНА Александра Сергеевича
в учебный процесс

ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет
имени В.Ф. Уткина».

Настоящим актом удостоверяется, что результаты экспериментальных исследований и разработанное программное обеспечение для сжатия изображений в квазидвумерном спектре с восстановлением постоянной составляющей и устранением высокочастотных элементов, полученные Бастрычкиным А.С в ходе работ над кандидатской диссертацией, внедрены в учебный процесс кафедры «Электронные вычислительные машины» Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина по направлениям подготовки магистратуры 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника» и 02.04.03 «Математическое обеспечение и администрирование информационных систем» в рамках дисциплин «Теория информации и цифровая обработка сигналов», «Теория информации».

Результаты опубликованы в методических указаниях к лабораторным работам «Методы и средства дистанционного зондирования поверхностей и сред» (№ 7159); методические указания к лабораторным работам/ Рязанский государственный радиотехнический университет; сост.: Б.В. Костров, А.С. Бастрычкин. – Рязань, 2021. – 24 с.

Декан ФВТ
д.т.н., проф.

 / Д.А. Перепелкин/

И.о. зав. кафедрой ЭВМ
к.т.н., доц.

 / Н.Н. Гринченко /

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU2024686884**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):

2024686884

Дата регистрации: 13.11.2024

Номер и дата поступления заявки:

2024685969 01.11.2024

Дата публикации и номер бюллетеня:

13.11.2024 Бюл. № 11

Контактные реквизиты:

a_s_bas@mail.ru

Автор(ы):

Костров Борис Васильевич (RU),

Бастрычкин Александр Сергеевич (RU),

Бабаев Сергей Игоревич (RU)

Правообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего

образования "Рязанский государственный

радиотехнический университет имени В. Ф.

Уткина" (RU)

Название программы для ЭВМ:

«Программа сжатия изображений в квазидвумерном спектре с квантованием высокочастотных элементов»

Реферат:

Программа предназначена для демонстрации результатов реализации алгоритма сжатия изображений в квазидвумерном спектре с квантованием высокочастотных элементов.

Отличительными сторонами такого подхода является сокращение вычислительной сложности реализации предложенного алгоритма по сравнению с известными, потенциальная возможность использования упрощённых архитектур вычислительных систем для реализации предложенного алгоритма. Область применения программы: ландшафтные и аэрокосмические изображения.

Функциональным назначением программы является сжатие выбранного изображения по алгоритму с заданными параметрами (коэффициент прореживания, наличие корректировок, количество уровней квантования высокочастотных составляющих), распаковка сжатого изображения, и вывод результатов на экран в виде основных параметров сжатия (СКО, ПОСШ, процента исключённых составляющих спектра и количества бит на пиксель в сжатом виде) и восстановленного изображения. Тип ЭВМ: IBM PC - совмест. ПК; ОС: Windows XP/Vista/7/8/10/11.

Язык программирования:

MATLAB

Объем программы для ЭВМ:

33 КБ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU2024687272**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):
2024687272
Дата регистрации: 15.11.2024
Номер и дата поступления заявки:
2024685912 01.11.2024
Дата публикации и номер бюллетеня:
15.11.2024 Бюл. № 11
Контактные реквизиты:
a_s_bas@mail.ru

Автор(ы):
Костров Борис Васильевич (RU),
Бастрычкин Александр Сергеевич (RU),
Бабаев Сергей Игоревич (RU)
Правообладатель(и):
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Рязанский государственный
радиотехнический университет имени В.Ф.
Уткина" (RU)

Название программы для ЭВМ:

«Программа сжатия изображений в квазидвумерном спектре с восстановлением постоянной составляющей и устранением высокочастотных элементов»

Реферат:

Программа предназначена для сжатия изображений в квазидвумерном спектре с восстановлением постоянной составляющей и устранением высокочастотных элементов. Преимущество такого подхода заключается в сокращении вычислительной сложности реализации предложенного алгоритма по сравнению с известными. Область применения программы: ландшафтные и аэрокосмические изображения. Функциональным назначением программы является сжатие выбранного изображения по алгоритму с заданными параметрами (коэффициент прореживания, наличие корректировок), распаковка сжатого изображения и вывод результатов на экран в виде основных параметров сжатия (СКО, ПОСШ, процента исключённых составляющих спектра и количества бит на пиксель в сжатом виде) и восстановленного изображения.

Язык программирования: Matlab

Объем программы для ЭВМ: 27,6 КБ