

На правах рукописи

БЕХТИН Юрий Станиславович

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ
ВЕЙВЛЕТ-КОДИРОВАНИЯ
ЗАШУМЛЁННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
В РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Специальность 05.12.04 – «Радиотехника,
в том числе системы и устройства телевидения»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Рязань – 2009

Работа выполнена на кафедре автоматики и информационных технологий в управлении Рязанского государственного радиотехнического университета

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Алпатов Борис Алексеевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Брюханов Юрий Александрович

доктор технических наук, профессор
Титов Виталий Семёнович

доктор технических наук, доцент
Клочко Владимир Константинович

Ведущая организация: ФГУП ЦНИИ «Комета», г.Москва

Защита диссертации состоится « 20 » марта 2009 г.

в 12 час.00 мин. на заседании диссертационного совета Д212.211.04

Рязанского государственного радиотехнического университета

по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Рязанского государственного радиотехнического университета.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2009 г.

Учёный секретарь диссертационного совета

Борисов А.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные радиотехнические системы отличаются многообразием первичных датчиков получения информации. Применение некоторых из них обуславливает наличие искажений и шумов в изображениях, передаваемых по каналам связи и представляемых в телевизионном стандарте. Например, для радиосистем с радарами прямого и бокового обзоров (радаров с синтезированной апертурой), видеодатчиков на лазерах характерна проблема спекл-шума (*speckle*). При использовании многорядных и матричных фотоприемников флуктуации коэффициентов передачи фотодатчиков относительно условной единицы с течением времени являются причиной возникновения геометрического шума чувствительности. Для таких изображений вводится в рассмотрение мультипликативная модель шума с единичным средним, распределение которого в общем случае не является гауссовским. При этом мультипликативный шум считается доминирующим над аддитивными шумами.

В случае архивирования зашумленных изображений при фиксированном объеме памяти, когда нет временных ограничений, сжатие изображений (с потерями) может увеличить остаточный шум после предварительной фильтрации. В случае передачи зашумленных изображений по каналам связи высокого качества, но с ограниченной пропускной способностью, предварительная фильтрация увеличивает временные и аппаратные затраты. Таким образом, в обоих случаях для согласования фильтрации и компрессии необходимо использовать общую схему обработки изображения.

Одной из эффективных схем является вейвлет-обработка сигналов, где и фильтрация, и сжатие данных осуществляются путем порогового отсека вейвлет-коэффициентов. В диссертационной работе даются теоретическое исследование и практические решения проблемы вейвлет-кодирования зашумленных изображений при фиксированной квоте бит, причем требования к визуальному (субъективному) качеству восстановленных после компрессии изображений специально не оговариваются. Тем не менее, разработанные методы и алгоритмы обеспечивают получение восстановленных изображений относительно высокого качества по сравнению с использованием предварительной фильтрации и известных кодеков. Диссертация входит в комплекс хоздоговорных и госбюджетных научно-исследовательских работ по созданию и исследованию методов, алгоритмов и цифровых устройств обработки телевизионных, радио- и тепловизионных изображений ближнего ИК-диапазона, выполненных на кафедре автоматики и информационных технологий в управлении РГТУ за 1983-2008 гг.

Степень разработанности проблемы. Значительный вклад в теорию вейвлет-преобразования, вейвлет-фильтрации и вейвлет-кодирования внесли зарубежные ученые: С.Бюррус (*Burrus*); П.Вайдьянатан (*Vaidianathan*), М.Веттерли (*Vetterli*), И.Добеши (*Daubeshis*), Д.Донохо

(Donoho), С.Малла (Mallat), И.Мейер (Meyer), Р.Куафман (Coifman), У.Пирлман (Pearlman), Н.Саито (Saito), Дж.Шапино (Shapiro), Б.Видакович (Vidakovic) и др. Некоторыми теоретическими аспектами вейвлет-преобразования и его практическими приложениями занимались отечественные ученые: К.А.Алексеев, Б.А.Алпатов, Ю.А.Брюханов, В.В.Витязев, В.И.Воробьев, В.Г.Грибунин, Ю.В.Гуляев, В.П.Дворкович, А.В.Дворкович, Ю.К.Демьянович, Ю.Б.Зубарев, С.Н.Кириллов, В.Ф.Кравченко, Л.В.Новиков, А.П.Петухов, В.С.Титов, С.В.Умняшкин и др. Однако в их работах задачи фильтрации и кодирования сигналов и изображений решаются независимо друг от друга, причем задачи сжатия решаются, как правило, для неискаженных сигналов и изображений.

Непосредственно по проблеме известно относительно небольшое число публикаций, преимущественно в зарубежной печати. В частности, в работах С.Бюрруса, М.Веттерли, Н.Саито используется критерий Риссанена «минимума длины описания» (*minimum description length*), при котором обеспечивается минимальная длина двоичного кода при выборе базиса, числа значимых вейвлет-коэффициентов, порогов, интервалов и уровней квантования, но не гарантируется выполнение ограничений на квоту бит. В работах О.-К.Снайх (Al-Snaykh), Р.Мерсеро (Mercereau) проведено исследование вейвлет-кодексов при сжатии искаженных аддитивным гауссовским шумом изображений, введено понятие оптимальной рабочей точки (*optimal operation point*) – скорости кодирования, на которой кодек обеспечивает наилучшее шумоподавление. Работы К.Егиязаряна (Финляндия), Н.Пономаренко, В.Лукина (Украина) используют фильтрацию вейвлет-коэффициентов и различные свойства известных кодексов, анализируя кривые вида «скорость – искажения». Однако данные методы эффективны для изображений конкретных классов, выбор кодека возлагается на пользователя. При этом отсутствуют данные при сжатии кодеками изображений, искаженных мультипликативным шумом.

Таким образом, не разработаны теоретические основы вейвлет-кодирования зашумленных изображений, причем в известных работах не используется нелинейная вейвлет-аппроксимация. В связи с этим не решена задача выбора базиса вейвлет-преобразования при фиксированной квоте бит. Кроме того, распределение квоты бит и вычисление значений порогов производится независимо, что приводит к получению субоптимальных оценок.

Другой аспект проблемы, который вообще не обсуждается в известных работах, связан с включением текстурного анализа и сегментации зашумленных изображений в процесс вейвлет-кодирования. Наконец, не известны результаты практического применения (не имитационного моделирования) известных подходов в реальных радиотехнических системах и системах телевидения.

Цель и задачи работы. Целью диссертации является разработка теории и исследование созданных на ее основе методов, алгоритмов и их программных реализаций компрессии зашумленных изображений с применением вейвлет-преобразования при фиксированной квоте бит,

предназначенных для повышения эффективности передачи информации по каналам связи и ее хранения в радиотехнических системах.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи.

1. Разработка теоретических положений совмещения фильтрации и сжатия данных зашумленного изображения при его нелинейной аппроксимации с использованием пороговой обработки вейвлет-коэффициентов при фиксированной квоте бит.
2. Разработка методов сжатия зашумленного изображения на основе выбора базисов, сильнее коррелирующих с оригиналом, чем с шумом, с учетом пороговой обработки вейвлет-коэффициентов при высоких (больше 1 бит/пиксель) и низких скоростях кодирования.
3. Разработка алгоритмов субполосного вейвлет-кодирования зашумленного изображения, оптимизирующих распределение квоты бит по субполосам при разных способах пороговой обработки вейвлет-коэффициентов.
4. Разработка алгоритмов предварительной обработки изображения и вейвлет-коэффициентов перед кодированием, учитывающих текстуру изображений и распределение вейвлет-коэффициентов по субполосам.
5. Адаптация разработанных алгоритмов для практических задач, связанных с обработкой и комплексированием мультиспектральных изображений, архивацией и передачей по низкоскоростным каналам связи радио- и тепловизионных изображений, видеоданных систем охранного телевидения.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты.

1. Впервые сформулированы теоретические положения вейвлет-кодирования зашумленных изображений, которые объединяют результаты, полученные в области вейвлет-фильтрации и компрессии на основе вейвлет-преобразования.
2. Разработаны новые методы сжатия зашумленных изображений на основе выбора последовательности «лучших» базисов путем обнаружения и отделения когерентных структур при грубой, мягкой и по функции Видаковича пороговой обработки вейвлет-коэффициентов и при низких и высоких скоростях кодирования.
3. Разработаны новые алгоритмы распределения квоты бит при субполосном вейвлет-кодировании зашумленного изображения, вычисляющие оптимальные величины порогов, интервалов и уровней квантования в рамках одного общего критерия при разных видах пороговой обработки вейвлет-коэффициентов.
4. Предложены оригинальные методики расчета аппроксимаций кривых спада сортированных вейвлет-коэффициентов по субполосам и квантователей на их основе при субполосном вейвлет-кодировании зашумленных изображений.
5. Разработаны и исследованы алгоритмы текстурно-зависимой предварительной обработки зашумленного изображения на основе

локальных коэффициентов вариаций при использовании стандартных вейвлет-кодеков EZW, SPIHT, JPEG2000.

6. Разработаны и исследованы алгоритмы предварительной текстурно-зависимой обработки вейвлет-коэффициентов с использованием локальных коэффициентов вариации и оценок по максимуму апостериорной плотности вероятности на основе IV типа распределения Пирсона и обобщенного распределения Гаусса.
7. Получены текстурно-зависимые алгоритмы сжатия изображений, искаженных спекл-шумом, на основе их статистических моделей.
8. Получены алгоритмы сжатия ИК-изображений с одновременной компенсацией дрейфа коэффициентов передачи фотоэлементов фотоэлектронных модулей, функционирующие в реальном масштабе времени, для разработанного аппаратно-программного комплекса с использованием специализированных плат ввода-вывода.

Практическая ценность. Теоретически доказана возможность осуществления на практике одновременно эффективного сжатия и шумоподавления искаженных сигналов и изображений различных классов с помощью вейвлет-преобразования.

Полученные методы, алгоритмы вейвлет-обработки зашумленных изображений позволяют при кодировании на заданной скорости осуществлять эффективное сглаживание помех в смысле минимизации среднеквадратического отклонения (СКО) и максимизации пикового отношения сигнал-шум (ПОСШ).

Разработанные алгоритмы допускают относительно легкую модификацию и могут широко использоваться в практических приложениях как для задач архивации, так и задач передачи данных по каналам связи с учетом специфики формирования сигналов и помех.

Методы и достоверность исследования. Для решения поставленных задач в работе использовались элементы теории вейвлет-преобразования, теории вероятностей и математической статистики, теории оптимального оценивания и фильтрации, численные методы вычислений. Для практической проверки правильности теоретических выводов диссертации применялось статистическое моделирование на ЭВМ в среде Matlab (вместе с разработанными программами на языке C++) на тестовых и реальных телевизионных, радио- и тепловизионных изображениях, а также проводились экспериментальные исследования на разработанном аппаратно-программном комплексе, состоящем из измерительного стенда, персонального компьютера и болометра. Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением с известными методами и алгоритмами, данными протоколов приемосдаточных испытаний образца аппаратно-программного комплекса обработки сигналов фотоэлектронных модулей (ФЭМ).

Личный вклад автора. Все основные результаты диссертации получены автором лично и опубликованы в большинстве работ без соавторов [3, 5, 6, 8, 10, 12, 19-22, 24, 25, 36-41, 43] и в соавторстве с аспирантами и студентами [4, 11, 26, 27, 30-33, 35]. В ранних работах [1, 2, 13-18] рассмотрены алгоритмы сокращения избыточности при

подавлении геометрического шума ФЭМ. Вопросы алгоритмического обеспечения АПК обработки сигналов ФЭМ изложены в работах [7, 9, 28, 29, 34, 42].

Реализация и внедрение. Диссертационная работа включает в себя исследования, выполненные в Рязанском государственном радиотехническом университете в рамках госбюджетных и хоздоговорных НИР № 31-85, № 10-87, № 30-03, № 7-05, № 5-06, № 7-06, № 7-06Г, № 2-07, № 5-07, № 9-08Г, в которых автор являлся исполнителем, ответственным исполнителем и научным руководителем.

Ряд теоретических положений вейвлет-кодирования зашумленных изображений отражены в курсах лекций по дисциплинам «Обработка изображений в системах управления», «Информационные сети и телекоммуникации», «Цифровая обработка и анализ изображений», читаемых в Рязанском государственном радиотехническом университете и Курском государственном техническом университете. Для лабораторного практикума применяется разработанный автором учебный программный комплекс «IMPROC», версия 1.0, содержащий, в том числе, полученные в диссертации алгоритмы обработки зашумленных изображений на основе метода SPIHT.

Разработанные алгоритмы предварительной калибровки, сжатия данных от ФЭМ при одновременной компенсации дрейфа коэффициентов передачи фотоэлементов внедрены в ФГУП НПО «Орион» (г.Москва). Алгоритмы комплексирования и сжатия мультиспектральных изображений на основе вейвлет-обработки внедрены в ФГУП Рязанский государственный приборостроительный завод. Алгоритмы архивирования данных видеонаблюдений для охранных телевизионных систем внедрены в научно-производственной коммерческой фирме «Комплектстройсервис» (г.Рязань).

Апробация работы. Материалы работы докладывались и обсуждались на Всесоюзных научно-технических конференциях (ВНТК) «Перспективные методы планирования и анализа экспериментов при исследовании случайных полей и процессов» (г.Гродно, 1988 г.), ВНТК «Теория кодирования и передачи информации» (г.Одесса, 1988 г.), ВНТК «Оптико-электронные измерительные устройства и системы» (г.Томск, 1989 г.), международных научно-технических конференциях (МНТК) Symposium on Image Analysis, SSAB'2001 (г. Норчепинг, Швеция, 2001 г.), МНТК «2nd IEEE Region 8 EURASIP Symposium on Image and Signal Processing and Analysis» (г.Пула, Хорватия, 2001 г.), МНТК «Optimization of Finite Element Approximation and Splines and Wavelets» (г.Санкт-Петербург, 2001 г.); МНТК по фотоэлектронике и приборам ночного видения (г. Москва, 2004, 2006 гг.); МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (г. Москва, 1998, 2002-2004, 2006, 2007 гг.), МНТК «Распознавание», (г. Курск, 2005, 2008 гг.), МНТК «7th International Workshop on Spectral Methods and Multirate Signal Processing» (г.Москва, 2007 г.); на научных семинарах в Норвежском Университете Науки и Технологии (г.Трондхейм) и Датском Техническом Университете (г.Копенгаген) во время научных стажировок в 1996-1997 и 2001 гг.; на 7

международных и Всероссийских научно-технических конференциях и семинарах кафедры РГРТУ (г.Рязань) и МЭИ (ТУ) (г.Москва) за 1998-2007 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 67 работ на русском и английском языках, включая 25 статей, из которых 12 статей опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, 2 статьи изданы на английском языке в «Proceedings of SPIE». Материалы диссертации вошли в 8 отчетов по НИР, прошедших Госрегистрацию. Без соавторов опубликовано 15 статей.

Структура диссертации. Диссертация общим объемом 388 с. состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 256 с. основного текста, перечень используемой научно-технической литературы из 223 наименований на 21 с., приложения на 18 с., 194 рис. и 22 табл. на 93 с.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ:

1. Теоретические положения, доказывающие возможность построения процедур вейвлет-кодирования зашумленных изображений при фиксированных квотах бит и разных способах пороговой обработки вейвлет-коэффициентов, минимизирующих среднеквадратическую ошибку восстановления оригинала.
2. Методы и алгоритмы компрессии зашумленных изображений на основе выбора базиса путем отделения когерентных структур, учитывающие ошибки нелинейной аппроксимации и ошибки квантования при низких и высоких скоростях кодирования и при грубой, мягкой и по функции Видаковича пороговой обработке вейвлет-коэффициентов.
3. Алгоритмы распределения квоты бит при субполосном вейвлет-кодировании зашумленного изображения, определяющие величину порога и интервал квантования для каждой субполосы вейвлет-декомпозиции при грубой, мягкой и по функции Видаковича пороговой обработке вейвлет-коэффициентов.
4. Методики расчета аппроксимаций кривых спада сортированных вейвлет-коэффициентов в пределах субполосы и квантователей на их основе.
5. Методы и алгоритмы текстурно-зависимой вейвлет-обработки зашумленного изображения, использующие стандартные кодеки на основе алгоритмов EZW, SPIHT, JPEG2000.
6. Методы и алгоритмы оценивания вейвлет-коэффициентов, учитывающие текстуру изображения и использующие локальные коэффициенты вариации и IV тип распределения Пирсона и обобщенное распределение Гаусса.
7. Алгоритмы обработки и сжатия телевизионных, радио- и инфракрасных изображений, учитывающие специфику формирования искажений и позволяющие построенным на их основе кодекам и цифровым устройствам функционировать в реальном масштабе времени.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследований, формулируются цель и задачи работы, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приводится структура диссертации и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дается сравнительный обзор методов, алгоритмов и устройств цифровой обработки изображений, в том числе предназначенных для совместного шумоподавления и компрессии, а также проводятся исследования по оценке эффективности известных методов и алгоритмов фильтрации и сжатия изображений, искаженных мультипликативным шумом.

Отмечается, что среди относительно большого числа известных методов и алгоритмов в области фильтрации зашумленных изображений перспективным для подавления мультипликативного шума является применение локальной адаптивной обработки, построенной на фильтрах Ли, Куана, Винера и др. Данные фильтры используют локальные коэффициенты вариации, вычисляемые в пределах малых окон. Показано, что на основе коэффициентов вариации возможно сегментировать изображение на участки с однородной и неоднородной текстурами, а также выделить точечные объекты. Для предварительной обработки предлагается использовать комбинированную фильтрацию, заключающуюся в сегментации изображения и оценивании параметров определяемого по критерию χ^2 закона распределения шума в сегментах. По найденным параметрам из таблиц, составленных на основе статистического моделирования, выбирается соответствующий метод обработки, в том числе и вейвлет-преобразование с грубой или мягкой пороговой обработкой вейвлет-коэффициентов (*thresholding*). Показано, что в ряде случаев (при сильном размытии контуров объектов, контрастировании и т.п.) последующее сжатие приводит к дополнительным искажениям. В экспериментах применялись экспоненциальное, нормальное, лог-нормальное и гамма-распределения мультипликативного шума с единичным средним.

При рассмотрении методов сжатия с потерями показано, что частичное подавление мультипликативного шума в изображениях происходит в кодеках, построенных на известных процедурах вейвлет-кодирования EZW, JPEG2000, SPIHT, которые основаны на приравливании незначущих коэффициентов (т.е. оказавшихся ниже некоторого порога) к нулю. Приводятся результаты статистического моделирования на ряде тестовых изображений, по которым делается вывод о наличии, как и в случае аддитивного шума, некоторой «оптимальной рабочей точки». Отмечается одинаковое поведение кодеков при сжатии изображений, как с мультипликативным, так и с аддитивным шумом, причем вид закона распределения шума практически не влияет на пиковое отношение сигнал-шум (ПОСШ).

Приводится укрупненная классификация известных методов и алгоритмов совместного сжатия и фильтрации зашумленных изображений. По результатам проведенного обзора ставится задача

разработки теории, методов, алгоритмов адаптивной фильтрации при вейвлет-кодировании зашумленного изображения при условии жесткого ограничения на квоту бит. Обоснована эффективность алгоритмов сжатия зашумленного изображения, если они учитывают все параметры кодека и изображения в рамках единого критерия или подхода. Приводится перечень применяемых в работе объективных (СКО, ПОСШ, нормализованная кросс-корреляция и др.) и субъективных (блочность, размытие и др.) критериев для оценки эффективности разработанных и известных методов и алгоритмов.

Во второй главе формулируются теоретические основы вейвлет-кодирования зашумленных изображений, а также приводятся методы и алгоритмы, основанные на выборе базиса по когерентным структурам, учитывающие различные виды пороговой обработки вейвлет-коэффициентов и скорость кодирования.

Вейвлет-декомпозиция зашумленного изображения $Y = X \cdot Z$, где Y – наблюдаемое изображение, X – неизвестный оригинал, Z – мультипликативный шум с единичным средним (в общем случае не гауссовский), представляется в виде аддитивной модели:

$$W_Y = \mathbf{W}Y = \mathbf{W}(XZ) = \mathbf{W}X + \mathbf{W}X(Z - 1) = W_X + W_\xi, \quad (1)$$

где $\mathbf{W}$ – символ прямого вейвлет-преобразования. Из (1) следует, что требуется закодировать вейвлет-коэффициенты W_Y таким образом,

чтобы среднеквадратическая ошибка восстановления была минимальной в смысле среднего квадрата евклидовой нормы $E\{ \|X - \hat{X}\|^2 \} = E\{ \|W_X - W_{\hat{X}}\|^2 \} \rightarrow \min$, где $W_{\hat{X}}$ – вейвлет-коэффициенты

восстановленного после компрессии изображения $\hat{X}$. Показано, что оценки вейвлет-коэффициентов $W_{\hat{X}}$ для сепарабельных вейвлет-

базисов могут быть найдены с помощью нелинейной аппроксимации, которая строится по M первым (значимым) вейвлет-коэффициентам наибольшей амплитуды. Для осуществления нелинейной аппроксимации производится сортировка всех I вейвлет-коэффициентов по амплитуде

$|w_{Y_k}| \geq |w_{Y_{k+1}}|, \forall k \in [1, \dots, I]$. Сортированные вейвлет-коэффициенты имеют

быстрый спад, причем, как показали проведенные исследования, у изображений одного класса поведение кривых спада практически одинаково при их декомпозиции с одним и тем же базисом. Для подбора значения M в работе используется аппроксимация кривой спада вида

$|w_{Y_k}| \sim Ck^{-\gamma}$ (Ф.Фальзон, С.Малла), где $C > 0$ и $\gamma > 1/2$ – некоторые

константы при условии, что существуют две другие константы $A > 0, B > 0$, не зависящие от C, γ и I , такие что $ACK^{-\gamma} \leq |w_{Y_k}| \leq BCK^{-\gamma}, \forall k \in [1, \dots, I]$.

При действии шума, как показали проведенные эксперименты, еще удается подобрать показатель степени γ , при котором ошибка аппроксимации кривой спада всех вейвлет-коэффициентов относительно невелика.

Показано, что СКО при сжатии зашумленного изображения определяется суммой четырех слагаемых:

$$E\{\|W_X - W_{\hat{X}}\|^2\} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (w_{X_i} - w_{\hat{X}_i})^2 = \sigma^2 - \varepsilon \tilde{\sigma}^2 + \sigma_{W_{\xi}}^2 + \varepsilon \sigma_{\kappa\sigma}^2, \quad (2)$$

где $\sigma^2 = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I w_{Y_i}^2$ - средняя сумма квадратов всех вейвлет-коэффициентов

зашумленного изображения; $\tilde{\sigma}^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M w_{Y_i}^2$ - средняя сумма квадратов

значимых вейвлет-коэффициентов; $\sigma_{W_{\xi}}^2 = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I w_{\xi_i}^2$ - дисперсия вейвлет-

коэффициентов шума с нулевым средним; $\sigma_{\kappa\sigma}^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sigma_{\kappa\sigma i}^2$ - выборочная

дисперсия ошибки квантования значимых вейвлет-коэффициентов; $M = \varepsilon I$. Соотношение (2) показывает, что для качественного шумоподавления при сжатии (кодировании) зашумленного изображения желательно иметь как можно большую среднюю сумму квадратов значимых вейвлет-коэффициентов $\tilde{\sigma}^2$ и как можно меньшую дисперсию ошибки квантования $\sigma_{\kappa\sigma}^2$. Данные требования являются противоречивыми, поскольку с увеличением числа M значимых вейвлет-коэффициентов одновременно увеличивается дисперсия ошибки квантования.

Получена зависимость, которая связывает увеличение величины $\tilde{\sigma}^2$ при возрастании M с убыванием $|w_{Y_k}|$ при возрастании k .

Теорема 1. Если существуют $C > 0$ и $\gamma > \frac{1}{2}$ такие, что $|w_{Y_k}| \leq Ck^{-\gamma}$, то

$$\tilde{\sigma}^2 \leq \frac{C^2 M^{-1}}{2\gamma - 1} (1 - M^{1-2\gamma}). \text{ Обратно, } |w_{Y_k}| \leq \left(1 - \frac{1}{2\gamma}\right)^{-\gamma} Ck^{-\gamma}, \forall k \in [1, \dots, I].$$

По верхней границе, определенной в теореме 1, находятся те составляющие изображения, которые наилучшим образом коррелируют с ортонормированным базисом, выбранным для сжатия.

Для анализа дисперсии ошибки квантования рассмотрены два варианта расходования квоты бит R_C : при высоких $R_C > I$ (более 1 бит/пиксель) и низких $R_C \leq I$ скоростях кодирования.

При кодировании зашумленного изображения на высоких скоростях выдвигается гипотеза о равномерном квантовании значимых вейвлет-коэффициентов с высоким разрешением.

Теорема 2. Если M квантованных значимых вейвлет-коэффициентов зашумленного изображения кодируются с помощью двоичных слов постоянной длины, то дисперсия ошибки квантования при заданной квоте бит R_C есть

$$\sigma_{\kappa\bar{\epsilon}}^2 = \frac{C^2}{3} (1 - M^{-\gamma})^2 2^{-2\bar{R}_C}, \text{ где } \bar{R}_C = R_C / M. \quad (3)$$

При кодировании на низких скоростях из бюджета бит выделяется R_0 бит, необходимых для кодирования двоичной карты существенности, показывающей координаты значимых вейвлет-коэффициентов. Чтобы код для карты существенности не забрал весь бюджет бит, для расчета величины R_0 вводится ограничение вида $R_0 \leq M \left(\log_2 \frac{1}{\epsilon} + 1 \right)$. Поскольку на

кодирование значимых вейвлет-коэффициентов остается $R_1 = R_C - R_0$ бит, то с ростом M величина R_1 уменьшается быстрее и возрастает ошибка квантования по сравнению с кодированием на высоких скоростях.

Теорема 3. Если M квантованных значимых вейвлет-коэффициентов зашумленного изображения кодируются с помощью двоичных слов переменной длины, то дисперсия ошибки квантования при заданной квоте бит R_C есть

$$\sigma_{\kappa\bar{\epsilon}}^2 = C^2 (1 - M^{-\gamma})^2 2^{-2\bar{R}_1}, \text{ где } \bar{R}_1 = \bar{R}_C - \log_2 \frac{1}{\epsilon} - 1. \quad (4)$$

Теорема 3 также показывает возможность формирования кода переменной длины, поскольку по аппроксимации кривой спада сортированных вейвлет-коэффициентов можно вычислить количества попаданий коэффициентов в интервалы квантования.

Полученные результаты теорем 1-3 дают возможность оценить верхнюю границу СКО по соотношению (2) при фиксированном числе M значимых вейвлет-коэффициентов. Показано, что при любом базисе можно добиться минимума СКО при заданной скорости кодирования путем выбора числа M .

Подтверждено проведенными исследованиями на ряде зашумленных тестовых изображений, что выбор базиса при вейвлет-декомпозиции влияет на характер кривой спада сортированных вейвлет-коэффициентов. Также выявлено, что соотношения между кривыми спада, полученными при разных базисах, остаются без изменений после их нормировки.

Определение. Базис β^{α} лучше, чем базис β^{ω} при кодировании зашумленных изображений, если при всех $\epsilon \in [I^{-1}, 1]$

$$\epsilon^{(\alpha)} \left(\tilde{\sigma}_{\alpha}^2 - \sigma_{\alpha\kappa\bar{\epsilon}}^2 \right) \geq \epsilon^{(\omega)} \left(\tilde{\sigma}_{\omega}^2 - \sigma_{\omega\kappa\bar{\epsilon}}^2 \right). \quad (5)$$

Поскольку аппроксимация кривой спада сортированных вейвлет-коэффициентов определяется показателем степени γ , то с учетом результатов теорем 1-3 получена и проанализирована зависимость максимума величины $\epsilon \left(\tilde{\sigma}^2 - \sigma_{\kappa\bar{\epsilon}}^2 \right)$ от изменения показателя степени γ при низких и высоких скоростях кодирования. Выявлено, что при

фиксированном M при любой скорости кодирования выигрывает тот базис, чья кривая спада сортированных вейвлет-коэффициентов находится выше, то есть при меньшем значении γ .

Чтобы избавиться от неопределенности при сравнении базисов по парам, в работе вводится в рассмотрение критерий, построенный на вогнутых функциях стоимости Шура и однозначно показывающий преимущество одного базиса перед другим.

Теорема 4. Базис β^a лучше, чем базис β^b при кодировании зашумленных изображений тогда и только тогда, когда при всех вогнутых функциях $\Phi(u)$ справедливо неравенство

$$\sum_{i=1}^I \Phi \left(\frac{1}{\sigma^2 I} \left(|w_{Y_i}^{(a)}|^2 - \sigma_{\kappa \beta i}^{(a)2} \right) \right) \leq \sum_{i=1}^I \Phi \left(\frac{1}{\sigma^2 I} \left(|w_{Y_i}^{(b)}|^2 - \sigma_{\kappa \beta i}^{(b)2} \right) \right). \quad (6)$$

Величина $u = \frac{\varepsilon}{\sigma^2} (\tilde{\sigma}^2 - \sigma_{\kappa \beta}^2)$ показывает долю средней суммы

квадратов значимых вейвлет-коэффициентов за вычетом дисперсии ошибки квантования в средней сумме квадратов всех вейвлет-коэффициентов σ^2 , которая не зависит от выбора базиса и является постоянной величиной для конкретного изображения. На основании теоремы 4 в рассмотрение вводится функция стоимости:

$$C(\beta^l) = \sum_{i=1}^I \Phi \left(\frac{1}{\sigma^2 I} \left(|w_{Y_i}^{(l)}|^2 - \sigma_{\kappa \beta i}^{(l)2} \right) \right), \quad (7)$$

где $l = 1, \dots, L$, L – число базисов в библиотеке $\Lambda = \{\beta^1, \beta^2, \dots, \beta^L\}$. Тогда наилучший базис β^a минимизирует стоимость аппроксимации:

$$C(\beta^a) = \min_l C(\beta^l). \quad (8)$$

В качестве функции стоимости в работе используется энтропия вида $\Phi(u) = -u \ln u$, $u \geq 0$. Для каждого базиса условие $u \geq 0$ ограничивает верхний предел суммы в (7) до $I=M$, при котором $\tilde{\sigma}^2 = \sigma_{\kappa \beta}^2$.

Отмечается, что используемый метод нелинейной аппроксимации внешне совпадает с операцией грубой пороговой обработки вейвлет-коэффициентов (*hard thresholding*), применяемой для шумоподавления или в кодере с регулируемой нулевой зоной:

$$w_{\hat{X}_k} = \begin{cases} \langle w_{Y_k} \rangle, & \text{если } |w_{Y_k}| \geq \tau, \\ 0, & \text{если } |w_{Y_k}| < \tau, \end{cases} \quad (9)$$

где величина порога $\tau = |w_{Y_M}|$, скобки $\langle \cdot \rangle$ обозначают операцию

квантования. В работе исследован вариант выбора базиса при мягкой пороговой обработке (*soft thresholding*):

$$w_{\hat{X}_k} = \begin{cases} \text{sign}(w_{Y_k}) (|w_{Y_k}| - |w_{Y_M}|), & \text{если } |w_{Y_k}| \geq |w_{Y_M}|, \\ 0, & \text{если } |w_{Y_k}| < |w_{Y_M}|, \end{cases} \quad (10)$$

Показано, что в уравнение (2) добавляется слагаемое $(\varepsilon - \theta) |w_{Y_M}|^2$, где θ – доля вейвлет-коэффициентов НЧ субполосы, которые обычно не обрабатываются. Результаты теорем 1-3 были уточнены с учетом изменения динамического диапазона обработанных вейвлет-коэффициентов по (10). Аналогично исследован вариант обработки вейвлет-коэффициентов по функции Видаковича (*Vidakovic*)

$$w_{\hat{X}_k} = \begin{cases} \text{sign}(w_{Y_k}) \left(\sqrt{|w_{Y_k}|^2 - |w_{Y_M}|^2} \right), & \text{если } |w_{Y_k}| \geq |w_{Y_M}|, \\ 0, & \text{если } |w_{Y_k}| < |w_{Y_M}|, \end{cases} \quad (11)$$

для которого показано, что в уравнение (2) добавляется величина

$$\frac{1}{I} \sum_{k=l+1}^M \left(|w_{Y_k}| - \sqrt{|w_{Y_k}|^2 - |w_{Y_M}|^2} \right)^2.$$

Для фильтрации в работе предлагается выделять когерентные структуры, то есть сильно коррелированные с базисом компоненты двумерного сигнала. При любом M определяется остаток Y_M , вычисляемый как разность между исходным зашумленным изображением и изображением, полученным после обратного вейвлет-преобразования (восстановления) над всеми когерентными структурами:

$$Y_M = Y - \sum_{k=1}^M \mathbf{W}^{-1} \{w_{Y_k}\} = \sum_{k=M+1}^I \mathbf{W}^{-1} \{w_{Y_k}\}, \quad (12)$$

где символом $\mathbf{W}^{-1}$ обозначена операция вычисления обратного вейвлет-преобразования. Остаток Y_M будет считаться шумом, если коэффициент нормированной корреляции этого остатка в базисе β^l , $l=1, \dots, L$, будет больше коэффициента нормированной корреляции шума ρ_{I-M} . Оценка оригинального сигнала является суммой M когерентных структур $\hat{X} = \sum_{k=1}^M \mathbf{W}^{-1} \{w_{Y_k}\}$. Отмечается, что удаление

когерентных структур внешне похоже на грубую пороговую обработку вейвлет-коэффициентов (9) с величиной порога $\tau = \rho_{I-M} \sqrt{\sum_{k=M+1}^I |w_{Y_k}|^2}$. С

учетом квантования получен алгоритм оценки числа значимых вейвлет-коэффициентов M по когерентным структурам:

$$f(M) = \varepsilon(\tilde{\sigma}^2 - \sigma_{\kappa\theta}^2) \rightarrow \max_M, \quad (13)$$

$$\forall |w_{Y_i}|^2 \geq \rho_{I-M}^2 \sum_{i=M+1}^I |w_{Y_i}|^2 = \rho_{I-M}^2 I(\sigma^2 - \varepsilon \tilde{\sigma}^2). \quad (14)$$

Алгоритм имеет итерационный характер, поскольку текущие оценки M уточняются по (14) при достижении максимума целевой функции (13).

Путем статистического моделирования выявлено, что величина коэффициента нормированной корреляции белого гауссовского шума $\rho_I = \sqrt{2 \ln I} / \sqrt{I}$ может служить верхней оценкой для коэффициента нормированной корреляции шума с равномерным, экспоненциальным, логнормальным, гамма- распределениями, а также их комбинаций.

Алгоритм (13), (14) уточняется для случая мягкой пороговой обработки и обработки по функции Видаковича вейвлет-коэффициентов, а также приводятся соотношения для расчета оценок.

Отмечается, что для одного базиса B^α из библиотеки базисов Λ остаток Y_M вида (12) может содержать когерентную структуру для другого базиса B^ω , $\alpha, \omega \in [1, \dots, L]$. В результате был синтезирован алгоритм сжатия зашумленного изображения на основе выбора базиса по когерентным структурам. Особенностью алгоритма является поиск наилучшего базиса B^α по минимуму функции стоимости Шура $C(B^\alpha)$, сформированной по (8). Отделение когерентных структур производится алгоритмами по поиску оценки M числа значимых вейвлет-коэффициентов с учетом выбранного способа пороговой обработки и квантования. Вычисленные оценки значимых вейвлет-коэффициентов сохраняются в буферной памяти. Если $M=0$, то алгоритм останавливается. В противном случае выполняется обратное вейвлет-преобразование над отброшенными (незначимыми) вейвлет-коэффициентами, формируется остаток Y_M , корректируется квота бит и начинается следующая итерация по поиску нового базиса и оценки числа M в этом базисе. Таким образом, в результате работы алгоритма в буферной памяти остаются несколько множеств квантованных оценок вейвлет-коэффициентов, соответствующих набору «лучших» базисов из библиотеки Λ . Эти коэффициенты кодируются либо кодом постоянной, либо переменной длины в зависимости от величины R_C .

Для восстановления изображения необходимо найти сумму изображений, полученных после обратного вейвлет-преобразования с соответствующими базисами над множествами квантованных оценок вейвлет-коэффициентов после декодирования. Для кодирования названий базисов перед стартом алгоритма квота бит R_C уменьшается на величину R_B , вычисляемую по разработанной методике. Доля величины R_B в заданной квоте бит R_C не превышает 0,5 %.

Показано, что состав библиотеки ортонормированных базисов Λ может изменяться в зависимости от класса кодируемого зашумленного изображения. В библиотеку могут входить: базис евклидова пространства $\mathbf{R}^I$, базисы Хаара-Уолша, вейвлет-базисы семейства Добеши (*Daubechis*), биортогональные вейвлет-базисы (семейство *bior*), базисы, эффективные для сжатия, CDF 9.7, LeGall 5.3 и т.п. На их основе строятся соответствующие вейвлет-пакетные базисы и их менее

асимметричные версии – куафлеты (*coiflet*). Состав библиотеки может быть расширен локальными тригонометрическими базисами. Отмечается, что такая коллекция базисов является достаточно адаптируемой для эффективного представления сигналов любой размерности, в том числе 2D сигналов (изображений). Рассчитана вычислительная сложность применения базисов из библиотеки, которая определяется размером изображения I и типом вейвлет-декомпозиции (быстрое вейвлет-преобразование (БВП) или пакетное).

Эффективность разработанного метода и алгоритмов проверяется статистическим моделированием на ряде тестовых изображений. Выявлена относительно быстрая сходимость метода (10-15 итераций). Показано на ряде тестовых изображений, что даже при относительно небольшой и «примитивной» библиотеке базисов, состоящей только из типовых вейвлет-функций, достигаются лучшие значения объективных и субъективных критериев по сравнению с известными кодерами типа SPIHT, особенно на низких скоростях кодирования и при сильных шумах ($\sigma_{ш} > 20$). ПОСШ повышается до 30-32,5 дБ, в то время как SPIHT на оптимальной скорости кодирования достигает 24-26 дБ. Оценки нормированной кросс-корреляции с оригиналом находятся в малой окрестности (менее 10^{-3}) относительно единицы. Повышение резкости заметно на PCA-изображениях при минимуме артефактов по сравнению с фильтром Винера, «классической» пороговой вейвлет-обработкой (*VisuShrink*). Для ИК-изображений наблюдается относительно небольшое размытие контуров объектов, но при этом полностью удаляются, например, полосы, характерные для многорядных ФЭМ при геометрическом шуме чувствительности. Наилучшие результаты получены при использовании вейвлет-пакетных и локально-косинусных словарей с применением пороговой обработки вейвлет-коэффициентов по функции Видаковича.

В третьей главе рассматриваются вопросы, связанные с распределением заданной квоты бит при субполосном вейвлет-кодировании зашумленного изображения по одному базису и построении квантователей.

Показано, что задачу распределения квоты бит по субполосам можно привести к терминам теории «скорость-искажение». На основании (1) вейвлет-коэффициенты j -го поддиапазона (субполосы) $j = 1, \dots, J$, представляются в виде:

$$w_{X_i}^{[j]} = w_{X_i}^{[j]} + w_{\xi_i}^{[j]} = w_{X_i}^{[j]} + \sigma_{w_{\xi}}^{[j]} \cdot e_i, \quad (15)$$

где $|e_i| \leq 1, \forall i \in I^{(j)}$; здесь условно предполагается, что e_i - аддитивный гауссовский шум с нулевым средним и дисперсией $\sigma_{w_{\xi}}^{[j]2}$, $i = 1, \dots, I^{(j)}$, $j = 1, \dots, J$, то есть на уровне вейвлет-преобразования мультипликативный шум трансформируется в аддитивный со свойствами, близкими к гауссовскому шуму.

Оценка вейвлет-коэффициента представлена через линейную регрессионную модель с учетом квантования по уровню (после восстановления) в виде:

$$\hat{w}_{X_i}^{[j]} = w_{Y_i}^{[j]} + \varphi(w_{Y_i}^{[j]}, \tau^{[j]}) + \sigma_{\kappa \theta_i}^{[j]}, \quad \forall i \in I^{(j)}, \quad j = 1, \dots, J, \quad (16)$$

где $\varphi(w_{Y_i}^{[j]}, \tau^{[j]})$ - остаточная функция порогового отсека вейвлет-коэффициентов с некоторым порогом $\tau^{[j]}$, $\sigma_{\kappa \theta_i}^{[j]}$ - ошибка квантования i -го коэффициента в j -й субполосе, зависящая от интервала квантования $\Delta^{[j]}$, $j = 1, \dots, J$.

Для получения оптимальной оценки вейвлет-коэффициента составлен показатель качества, который внешне совпадает с критерием Штайна несмещенной оценки риска SURE (*Stein's unbiased risk estimation*):

$$\begin{aligned} Q_j(\tau^{[j]}, \Delta^{[j]}) &= \frac{1}{I^{(j)}} \sum_{i=1}^{I^{(j)}} (\hat{w}_{X_i}^{[j]} - w_{X_i}^{[j]})^2 = \\ &= \sigma_{w_{\xi}}^{[j]2} + \frac{1}{I^{(j)}} \left\| \varphi(w_{Y_i}^{[j]}, \tau^{[j]}) \right\|^2 + \frac{2\sigma_{w_{\xi}}^{[j]}}{I^{(j)}} \sum_{i=1}^{I^{(j)}} \frac{\partial}{\partial \tau^{[j]}} \varphi(w_{Y_i}^{[j]}, \tau^{[j]}) + \sigma_{\kappa \theta}^{[j]2} \rightarrow \min_{\tau^{[j]}, \Delta^{[j]}} \end{aligned} \quad (17)$$

где, в отличие от критерия для SURE, два неизвестных параметра $\tau^{[j]}$ и $\Delta^{[j]}$ определяют качество восстановления после сжатия зашумленного изображения. Пусть N - число бит входного зашумленного изображения (обычно 8 бит/пиксель); N_j - число бит, приходящихся на j -ю субполосу; $\alpha_j = N_j / N$ - относительный размер субполосы; $B = (b_1, \dots, b_J)$ - вектор, показывающий распределение квоты бит по субполосам. Тогда при найденной оценке дисперсии шума в вейвлет-коэффициентах $\hat{\sigma}_{w_{\xi}}^2$ и заданной квоте бит $R(B) = R_c$, задача распределения квоты бит с учетом одновременного шумоподавления в вейвлет-коэффициентах принимает вид:

$$Q(B) = \sum_{j=1}^J Q_j(b_j) \rightarrow \min_B \quad (18)$$

при ограничении

$$R(B) = \sum_{j=1}^J \alpha_j b_j.$$

Задача условной оптимизации (18) приводится к задаче на безусловный экстремум через функцию Лагранжа:

$$L(B) = [Q(B) + \lambda R(B)] \rightarrow \min_B, \quad (19)$$

где λ - неопределенный множитель Лагранжа. В отличие от обычного кодирования решение задачи минимизации функционала (19) зависит от вида остаточной функции пороговой обработки $\varphi(w_{Y_i}^{[j]}, \tau^{[j]})$.

В работе получены решения задачи (19) при грубой, мягкой и по функции Видаковича пороговой обработке вейвлет-коэффициентов. Вводятся следующие обозначения: σ_j^2 - выборочная дисперсия вейвлет-коэффициентов j -й субполосы перед пороговой обработкой, вычисляемая по $I^{(j)}$ коэффициентам; $\tilde{\sigma}_j^2$ - выборочная дисперсия вейвлет-коэффициентов j -й субполосы после проведения пороговой обработки, вычисляемая по $M^{(j)}$ значимым и модифицированным коэффициентам.

Для мягкой пороговой обработки вейвлет-коэффициентов с остаточной пороговой функцией вида:

$$\varphi(w_{Y_i}^{[j]}, \tau^{[j]}) = -\text{sign}(w_{Y_i}^{[j]}) \tau^{[j]} \text{Thr}(|w_{Y_i}^{[j]}| \geq \tau^{[j]}) - w_{Y_i}^{[j]} \text{Thr}(|w_{Y_i}^{[j]}| < \tau^{[j]}),$$

где $\text{Thr}(\dots)$ - условное обозначение операции сравнения вейвлет-коэффициентов с величиной порога $\tau^{[j]}$, $j=1, \dots, J$, получено выражение для ошибки вида (18):

$$Q_j(b_j) = (\sigma_j^2 - \varepsilon \tilde{\sigma}_j^2) + \hat{\sigma}_{W_\varepsilon}^{[j]2} (2\varepsilon - 1) + \varepsilon (\tau^{[j]2} + \sigma_{\kappa\varepsilon}^{[j]2}), \quad (20)$$

где $\varepsilon = M^{(j)} / I^{(j)}$ - доля числа значимых вейвлет-коэффициентов j -й субполосы. При составлении функции Лагранжа (19) выдвигается предположение, что ошибка квантования пропорциональна дисперсии $\tilde{\sigma}_j^2$ модифицированных значимых вейвлет-коэффициентов $\sigma_{\kappa\varepsilon}^{[j]2} = \alpha_j \eta_j 2^{-2b_j} \tilde{\sigma}_j^2$, где η_j - коэффициент пропорциональности:

$$L(B) = Q(B) + \lambda R(B) = \sum_{j=1}^J (\sigma_j^2 - \varepsilon \tilde{\sigma}_j^2 + (2\varepsilon - 1) \hat{\sigma}_{W_\varepsilon}^{[j]2} + \varepsilon \tau^{[j]2}) + \quad (21)$$

$$+ \varepsilon \sum_{j=1}^J \alpha_j \eta_j 2^{-2b_j} \tilde{\sigma}_j^2 + \lambda \sum_{j=1}^J \alpha_j b_j \rightarrow \min_{b_j}$$

Условно полагая, что $\eta_j = \eta$, $\forall j$, $j=1, \dots, J$, через дифференцирование двух последних слагаемых в (21), получено распределение квоты бит вида:

$$b_j = \frac{1}{2} \left[\log_2(2 \ln 2 \varepsilon \tilde{\sigma}_j^2) - \sum_{j=1}^J \alpha_j \log_2(2 \ln 2 \varepsilon \tilde{\sigma}_j^2) + 2R_C \right]. \quad (22)$$

После подстановки (22) в (21) получается, что суммарная величина искажений $Q(B) = \sum_{j=1}^J Q_j(b_j)$ определяется только через выборочные

дисперсии $\tilde{\sigma}_j^2$, $j=1, \dots, J$, поскольку квадрат величины порога $\tau^{[j]2}$ является последним элементом кумулятивной суммы квадратов значимых вейвлет-коэффициентов.

Аналогичным образом в работе находятся оптимальные распределения квоты бит при использовании функции Видаковича и грубой пороговой обработки вейвлет-коэффициентов. Отмечается, что решение задачи вида (19) при грубой пороговой обработке подходит для ряда стандартных программных реализаций кодеков, где существует возможность регулирования нулевой зоны.

В работе синтезирован алгоритм функционирования кодера при субполосном кодировании зашумленного изображения на основе функции Лагранжа вида (19). Поскольку величины $\tilde{\sigma}_j^2$ независимы, то

минимум функции Лагранжа вычисляется путем подбора величин $\tilde{\sigma}_j^2$ любым численным методом, ориентированным на поиск глобального минимума. В ряде случаев у функции Лагранжа не будет глобального минимума, что соответствует отрицательному значению b_j по (22),

следовательно, данная субполоса исключается из рассмотрения. После приравнивания нулю всех b_j с отрицательными значениями,

соответственно уменьшается число субполос, корректируется квота бит и выполняется следующая итерация. Как и при поиске оптимальной величины порога для оценки SURE анализ кумулятивной суммы квадратов вейвлет-коэффициентов начинается с наибольшего ранга:

$M^{(j)} = \varepsilon L^{(j)}$, затем $M^{(j)} = M^{(j)} - \delta$, где δ – величина шага, и т.д. При этом пересчитывается константа ε для каждого частотного поддиапазона при расчете общей ошибки по функции Лагранжа. После нахождения оптимальных величин $\tilde{\sigma}_j^2$ определяются интервал квантования $\Delta^{[j]}$ и

величина порога $\tau^{[j]}$ через последний компонент кумулятивной суммы квадратов вейвлет-коэффициентов. В результате составляется новая функция пороговой обработки вейвлет-коэффициентов, внешний вид которой показан на рис.1. Оценки вейвлет-коэффициентов $\hat{w}_{X_i}^{[j]}$,

вычисленные с использованием полученной функции пороговой обработки, кодируются и передаются в линию связи или помещаются на хранение.

Для восстановления «очищенного» от шума изображения предлагается выполнить обратное вейвлет-преобразование над декодированными оценками $\hat{w}_{X_i}^{[j]}$, $i = 1, \dots, I^{(j)}$, $j = 1, \dots, J$.

Эффективность предложенного метода подтверждается результатами статистического моделирования (рис.2 и рис.3). Для сравнения применялись процедура SPIHT-кодирования и «идеальный кодек», для которого величина порога для каждой субполосы рассчитывалась на основе принципа «оракула» (то есть при известных неискаженных вейвлет-коэффициентах):

$$\tau_{Oracle}^{[j]} = \underset{\tau}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^{I^{(j)}} \left(w_{Y_i}^{[j]} + \varphi(w_{Y_i}^{[j]}, \tau^{[j]}) - w_{X_i}^{[j]} \right)^2, \quad j = 1, \dots, J.$$

Отмечается, что предложенный алгоритм имеет заметное преимущество перед SPIHT (на 5-7 ДБ по ПОСШ), поскольку эффективное шумоподавление обеспечивается в первую очередь оптимальным выбором порога, причем ошибки квантования значимых коэффициентов вносят незначительный вклад в суммарную ошибку обработки. Недостатком разработанного метода является длительный поиск (фактически, полный перебор) оптимальных значений порогов и распределения квоты бит из-за многоэкстремального характера целевой функции. Данное обстоятельство ограничивает его применение в системах реального времени.

В работе рассматриваются квантователи, учитывающие распределение вейвлет-коэффициентов в пределах субполос. Отмечается, что многоуровневый квантователь Ллойда-Макса требует знания о плотности вероятности $P_{\hat{w}_Y}(\hat{w}_Y)$ оценок вейвлет-коэффициентов без учета квантования по уровню $\hat{w}_{Y_i}^{[j]} = w_{Y_i}^{[j]} + \varphi(w_{Y_i}^{[j]}, \tau^{[j]})$, $j = 1, \dots, J$. Для вычисления $P_{\hat{w}_Y}(\hat{w}_Y)$ в работе применяется аппроксимация гистограмм вейвлет-коэффициентов ВЧ субполос через обобщенное распределение Гаусса.

Для сокращения вычислительных затрат предлагается использовать квантователи с равными интервалами квантования (рис.1). Поскольку интервал квантования $\Delta^{[j]}$, $j = 1, \dots, J$, известен через решение (22), то вычисление уровней квантования квантователя Ллойда-Макса упрощается. Отмечается, что вейвлет-коэффициенты НЧ субполосы (аппроксимации) квантуются с использованием другого закона распределения, поскольку гистограмма вейвлет-коэффициентов аппроксимации не является симметричной и центрированной около нуля. Данное обстоятельство увеличивает вычислительные и временные затраты.

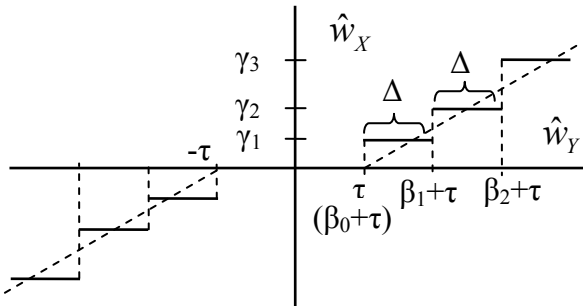


Рис.1. Квантователь с равномерными интервалами квантования.



Рис.2. Зашумленное изображение
Lena; экспоненциальный шум,
 $\sigma_{ш} = 25$, 8 бит/пиксель.



Рис.3. Обработанное
изображение Lena;
0,2 бит/пиксель.

Чтобы избежать вычисления плотности вероятности $P_{\hat{w}_Y}(\hat{w}_Y)$ значимых вейвлет-коэффициентов, предлагается методика, использующая свойства сортированных по амплитуде вейвлет-коэффициентов. Показано, что для зашумленного изображения невозможно подобрать аппроксимации вида $Ck^{-\gamma}$ для реальных кривых спада вейвлет-коэффициентов по субполосам. В рассмотрение вводится аппроксимация вида $Ck^{-\gamma(k)}$, на основе которой получено:

$$\left| w_{Y_k}^{[j]} \right| / \max \left\{ \left| w_{Y_k}^{[j]} \right| \right\} = \left(\frac{k}{I^{(j)}} \right)^{\frac{\log_2 \left(\left| w_{Y_k}^{[j]} \right| / \max \left\{ \left| w_{Y_k}^{[j]} \right\} \right\}}{\log_2 (k / I^{(j)})}}. \quad (23)$$

Проанализировано поведение числителя показателя степени $\log_2 \left| w_{Y_k}^{[j]} \right| / \max \left\{ \left| w_{Y_k}^{[j]} \right\} \right\}$ в (23). Выявлено, что логарифмическая кривая плавно изменяется, без резких спадов и скачков. Это позволяет аппроксимировать ее полиномом третьей степени с относительно малой ошибкой:

$$\log_2 \left(\left| w_{Y_k}^{[j]} \right| / \max \left\{ \left| w_{Y_k}^{[j]} \right\} \right\} \right) = a_3^{(j)} i^3 + a_2^{(j)} i^2 + a_1^{(j)} i + a_0^{(j)} = a^{(j)}(i). \quad (24)$$

Коэффициенты аппроксимирующего полинома a_3 , a_2 , a_1 , a_0 находятся численным методом. Показано, что данный способ обеспечивает относительно хорошую аппроксимацию спада сортированных вейвлет-коэффициентов, которая представляется в следующем виде (индекс j для обозначения субполосы опущен):

$$A(i) = \max \left\{ \left| w_{Y_i} \right| \right\} i^{r(i)}, \quad (25)$$

где $r(i) = a(i) / \log_2 i$. На основе (25) строится методика расчета уровней квантования, которая иллюстрируется рис.4. Интервалы равномерного квантования, которые откладываются, начиная с

порогового уровня $\tau^{[j]}$, $j=1,\dots,J$, определяют на кривой точки, соответствующие фиксированным номерам упорядоченных вейвлет-коэффициентов t_l , $l=0,1,\dots,L/2$, причем $t_0 = M^{(j)}$, $j=1,\dots,J$, а $t_{L/2} = 1$. Значения номеров t_l , $l=0,1,\dots,L/2$, позволяют рассчитать количества вейвлет-коэффициентов $K_l = t_l - t_{l-1}$, попавших в соответствующие интервалы квантования. Задача выбора уровней квантования сводится к подбору таких значений γ_l , $l=0,1,\dots,L$, которые минимизируют средний квадрат отклонений значимых вейвлет-коэффициентов по всей их совокупности, что дает:

$$\gamma_l = \frac{1}{K_l} \sum_{i=t_{l-1}}^{t_l} A(i). \quad (26)$$

Отмечается, что расчет уровней квантования по (26) остается таким же и для вейвлет-коэффициентов НЧ субполосы (аппроксимации), при этом $t_0 = I^{(j)}$.

Результаты моделирования показывают, что квантователь, рассчитанный по предложенной методике, выигрывает у равномерного квантователя и относительно немного уступает квантователю Ллойда-Макса по критерию минимума СКО.

Отмечается, что особенностью предложенного субполосного кодирования является расчет кодов по числу $M^{(j)}$ значимых вейвлет-коэффициентов. Для кодирования числа уровней L_j предлагаются два варианта. При первом варианте известно максимальное количество уровней. Второй вариант использует рекурсивную схему Риссанена, если максимальное количество уровней неизвестно. Для кодирования величины интервала квантования из практических соображений вводится некоторое ограничение на разрядность представления значения интервала квантования.

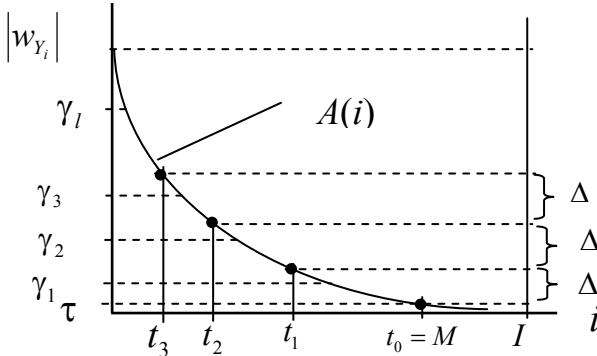


Рис.4. Аппроксимация сортированных вейвлет-коэффициентов и размещение интервалов и уровней квантования

Четвертая глава посвящена разработке и исследованию алгоритмов предварительной текстурно-зависимой обработки до и на уровне вейвлет-преобразования зашумленных изображений при их кодировании.

Для улучшения изображения $Y = X \cdot Z$ перед его компрессией предлагается проводить текстурную сегментацию на основе коэффициентов вариации $C_Y = \sigma_Y / \mu_Y$, $C_X = \sigma_X / \mu_X$, $C_Z = \sigma_Z / \mu_Z$, вычисляемых через оценки математических ожиданий $\mu_{(\dots)}$ и дисперсий

$\sigma_{(\dots)}^2$ в пределах заданных окон. Окно для оценки коэффициента вариации C_Z имеет меньший размер по сравнению с окном для оценки коэффициента вариации C_Y . Сравнение оценок коэффициентов вариации $\hat{C}_Y$ и $\hat{C}_Z$ позволяет различать три ситуации и проводить обработку по следующему принципу:

$$\hat{x} = \begin{cases} f(y), & \text{если } \hat{C}_Z < \hat{C}_Y < C_{\max} (C_X \approx C_Y), \\ y, & \text{если } \hat{C}_Y \geq C_{\max} (C_X > 0), \\ \mu_Y = \bar{y}, & \text{если } \hat{C}_Y \leq \hat{C}_Z (C_X = 0), \end{cases} \quad (27)$$

где $C_{\max} = \max\{\hat{C}_Z\}$. Если $\hat{C}_Y \geq C_{\max}$, то наблюдается точечный объект или перепады яркостей при переходе окном границ объекта; наблюдаемое значение сигнала сохраняется без изменений. В случае $\hat{C}_Y \leq \hat{C}_Z$ наблюдается однородная текстура, и усредняющий фильтр восстанавливает оригинал. Ситуация $\hat{C}_Z < \hat{C}_Y < C_{\max}$ является неопределенной с точки зрения проверки на однородность текстуры, тогда для получения оценки оригинала применяется алгоритм вейвлет-фильтрации $f(y)$. Особенностью предлагаемого метода классификации точек изображения является итерационный характер поиска точек для однородных текстур. Чтобы уменьшить число ошибок классификации, предлагается на каждой последующей итерации увеличить окно для расчета коэффициентов вариации для сигнала, а окно для расчета коэффициента вариации для шума оставить без изменения. Результаты моделирования выявили быструю сходимость метода (2-3 итерации). После усреднения точки из множества точек с однородной текстурой считаются условно-неискаженными. Таким образом, из трех множеств точек формируются два множества точек: расширенное множество условно-неискаженных данных A_S и множество зашумленных данных A_N . при этом $A = A_S \cup A_N$, где A – множество всех точек изображения.

Алгоритм сегментации используется в разработанных алгоритмах функционирования кодеков реального времени, основанных на кодах EZW, JPEG2000, SPIHT и обеспечивающих подавление шума в неоднородных сегментах при низких скоростях кодирования. **Алгоритм I**

формирует расширенный поток данных, направляемый к кодеру SPIHT, поскольку вычисляет матрицу (карту), состоящую из нулей и единиц и показывающую расположение (координаты) условно-неискаженных точек на модифицированном изображении. Подавление шума в точках из неоднородных областей происходит в декодере путем мягкой пороговой обработки вейвлет-коэффициентов, ускоряя тем самым процесс передачи. **Алгоритм II** позволяет применять стандартные кодеки без модификации, поскольку использует глобальную пороговую обработку вейвлет-коэффициентов без формирования вспомогательных потоков данных. На каждой k -й итерации вычисляются оценки дисперсий ошибки для условно-неискаженных данных $\sigma_S^{2(k)}$ и зашумленных данных $\sigma_N^{2(k)}$, затем выполняется мягкая пороговая обработка вейвлет-коэффициентов с порогом $t^{(k)} = \sigma_N^{(k)} \sqrt{\log(A_N)}$. Изменением порога минимизируется полная ошибка $\sigma_\Sigma^{2(k)} = (A_S \sigma_S^{2(k)} + A_N \sigma_N^{2(k)})/A$ после обратного БВП по значимым вейвлет-коэффициентам. Основная идея **Алгоритма III** заключается в том, чтобы в пределах каждого частотного поддиапазона найти величину оптимального порога путем минимизации оценки суммарной СКО, которая удерживает баланс между взвешенной СКО оценки условно-неискаженных данных и СКО оценки зашумленных данных после пороговой обработки. С помощью обратного вейвлет-преобразования восстанавливается псевдоизображение (остаток), которое соответствует данному частотному поддиапазону. При этом вейвлет-коэффициенты, соответствующие другим субполосам, в обратном преобразовании не используются. Процедура подбора порога в пределах субполосы аналогична **Алгоритму II**. Результаты статистического моделирования показали, что наименьшие значения СКО получаются с помощью **Алгоритма III**. Однако из-за большого числа итераций при субполосной обработке он проигрывает по быстродействию **Алгоритму I** и **Алгоритму II**. Все алгоритмы обеспечивают выигрыш как по ПОСШ (на 3-5 дБ), так и по ряду других объективных и субъективных критериев перед SPIHT при быстром (БВП) и пакетном вейвлет-преобразовании.

Данные алгоритмы предусматривают две стадии процесса обработки. В связи с этим в работе предлагается перенести текстурный анализ точек изображения непосредственно на стадию вейвлет-преобразования. Показано, что на уровне вейвлет-преобразования коэффициент вариации для оригинала имеет вид:

$$C_X^2 = \frac{C_{W_Y}^2 - C_{W_Z}^2}{K_2^{[j]}(1 + C_Z^2)}, \quad (28)$$

где $K_n^{[j]} = \sum_k \sum_l (\tilde{H}_k \tilde{G}_l)^n$, $\tilde{H}_k = h_k^j$, $\tilde{G}_l = g_l^{[j-1]} h_l^{j-1}$, здесь h_k^j , $g_l^{[j]}$ - весовые

функции банка фильтров (базиса), k и l определяют окрестность вокруг наблюдаемого пикселя, причем $C_{W_Y} = \sigma_{W_Y} / \mu_Y$ и $C_{W_Z} = \sqrt{K_2^{[j]}} C_Z$, j -

текущий уровень быстрого вейвлет-преобразования. Аналогично (27), определены три возможные ситуации при сравнении оценок коэффициентов вариации вейвлет-коэффициентов:

- 1) если $\hat{C}_{W_Z} < \hat{C}_{W_Y} < C_{W_{\max}}$, то $\hat{w}_Y = f(w_Y)$, $C_{W_{\max}} = \max\{\hat{C}_{W_Z}\}$;
- 2) если $\hat{C}_{W_Y} > C_{W_{\max}}$, то $\hat{w}_X = w_Y$; 3) если $\hat{C}_{W_Y} \leq \hat{C}_{W_Z}$, то $\hat{w}_X = 0$.

Восстановленное изображение $\hat{X}$ получается в результате обратного вейвлет-преобразования над квантованными коэффициентами $\hat{w}_X$.

Для получения оценок вейвлет-коэффициентов, соответствующих неоднородной текстуре, предлагается два подхода. Первый подход использует гистограммную пороговую обработку вейвлет-коэффициентов, где значение порога вычисляется через оценку дисперсии шума в этих коэффициентах. Второй подход вычисляет оценки вейвлет-коэффициентов по максимуму апостериорной плотности вероятности. Показано, что для одних классов изображений, в частности, РСА-изображений, унимодальные гистограммы вейвлет-коэффициентов в ВЧ субполосах первых уровней декомпозиции являются сильно асимметричными, а для других классов изображений асимметричностью можно пренебречь. Для случая асимметричного распределения вейвлет-коэффициентов предлагается использовать систему функций плотности вероятностей Пирсона. Путем статистического моделирования выявлено, что значения дискриминанта и критерия Пирсона соответствуют IV типу распределения Пирсона. Показано, что оценка вейвлет-коэффициента является численным решением уравнения третьей степени $c_3 \hat{w}_X^3 + c_2 \hat{w}_X^2 + c_1 \hat{w}_X + c_0 = 0$, где коэффициенты c_0, c_1, c_2, c_3 находятся через локальные выборочные центральные моменты.

Для случая симметричного распределения вейвлет-коэффициентов в работе предлагается использовать обобщенное распределение Гаусса $f_X(x) = B(\beta, \sigma) \exp\left\{-\left(G(\beta, \sigma)|x|\right)^\beta\right\}$, $-\infty < x < +\infty$, $\beta > 0$, где B, G – параметры, определяемые через дисперсию σ^2 и коэффициент эксцесса β . Оценка $\hat{w}_X$ находится через численное решение уравнения $\beta \Xi G \Xi |w_Y - w_X|^{\beta \Xi - 1} + \beta_X G_X |w_X|^{\beta_X - 1} = 0$, где коэффициент β вычисляется через численное решение уравнения:

$$\frac{\mu_{2,W}}{\sqrt{\mu_{4,W}}} = \frac{\Gamma(3/\beta)}{\sqrt{\Gamma(1/\beta)\Gamma(5/\beta)}}.$$

Отмечается, что выборочные моменты для вейвлет-коэффициентов могут быть вычислены через выборочные моменты исходного изображения, поскольку между семиинвариантами существует связь через весовые функции банка фильтров $\kappa_{n,W_X} = K_n^{[j]} \kappa_{n,X}$.

Особенностью разработанного кодера является адаптивное распределение квоты бит по субполосам на основе анализа в сегментах межуровневых связей типа «родитель – потомки» между оценками вейвлет-коэффициентов. Результаты статистического моделирования по тестовым изображениям подтверждают эффективность предварительной текстурной обработки на уровне вейвлет-преобразования в смысле минимума СКО и максимума ПОСШ, а также по субъективным критериям.

Пятая глава посвящена практической реализации полученных методов и алгоритмов при сжатии телевизионных, радио- и инфракрасных изображений.

Для радиолокационных изображений, искаженных спекл-шумом, на основе их статистических моделей (гамма-распределения) была модифицирована методика текстурного анализа из гл.4 на уровне вейвлет-преобразования. Получены выражения для первых четырех центральных моментов вейвлет-коэффициентов, которые зависят от μ_x и $K_n^{[1]}$. Оценки вейвлет-коэффициентов в участках с неоднородной текстурой вычисляются с использованием IV типа распределения Пирсона. Исходное и обработанное PCA-изображения показаны на рис.5 и 6 соответственно. Аналогичные результаты получены для изображений от РЛС прямого обзора.

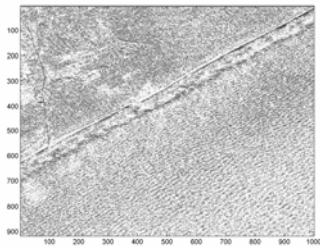


Рис.5. Оригинальное PCA-изображение со спекл-шумом, 8 бит/пиксель

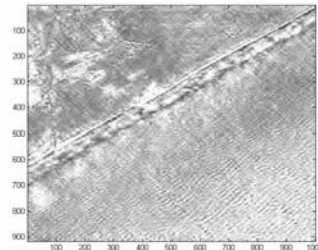


Рис.6. Обработанное PCA-изображение, вейвлет CDF 9.7, три уровня БВП, 0,2 бит/пиксель

Отмечается, что **для инфракрасных изображений**, формируемых на выходе фотоэлектронных модулей (ФЭМ) отечественного производства, характерны две проблемы: большой объем данных и искажения из-за дрейфа коэффициентов передачи фотоэлементов матриц или многорядных ФЭМ (до 30-50 % за 20-30 мин для неохлаждаемых КРТ-приемников). Получены оригинальные алгоритмы калибровки по оптическому сигналу и двухточечной коррекции (по «низкой» и «высокой» температурам) с погрешностью не более 4 %. Для рабочего режима (после калибровки) разработан алгоритм покадрового (размером от 240×320 до 600×800) вейвлет-сжатия сигналов ФЭМ для их передачи в реальном времени по низкоскоростным каналам связи (до 3-5 Мбит/сек). Предлагаемый алгоритм, основанный на SPIHT, учитывает

результаты калибровки и рассматривает дрейф чувствительности элементов КРТ-матриц или линеек ФЭМ как мультипликативный шум. Особенностью алгоритма является нормализация вейвлет-коэффициентов пространственно-ориентированных деревьев (ПОД), что приводит к устранению сигнальной зависимости в случайном процессе $W_{\xi}(1)$. В результате оценка дисперсии разброса вейвлет-коэффициентов в ПОД вычисляется независимо от уровня и субполосы вейвлет-декомпозиции изображения. По оценке дисперсии рассчитывается нулевая зона кодера.

Особенностью другого алгоритма вейвлет-компрессии является текстурная обработка ИК-изображений, для чего используется обобщенное распределение Гаусса для вычисления первых четырех центральных моментов вейвлет-коэффициентов (гл.4). Показано путем статистической обработки данных производственных испытаний, что исходный разброс коэффициентов передачи годных фотоэлементов имеет гауссовское распределение ($\beta=2$), которое после калибровки близко к распределению Лапласа ($\beta=1$).

Приводятся два варианта технической реализации разработанных алгоритмов: на основе микросхем средней и большой интеграции (рис.7) и в аппаратно-программном комплексе (АПК), подключаемому к измерительному стенду и состоящему из болометра, блока электронной обработки, платы аналого-цифрового ввода АМВРС1, ПК класса IBM PC (не менее 2,6 ГГц) с разработанным оригинальным программным обеспечением (рис.8).



Рис.7. Фотоприемник с платами предварительной цифровой обработки

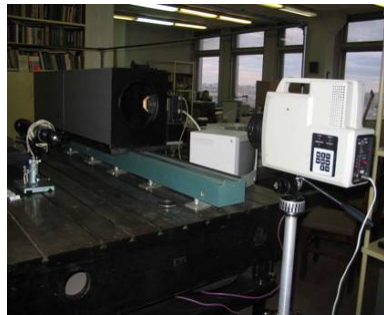


Рис.8. Болометр АПК на стенде измерения параметров

Проведенные на ФГУП НПО «Орион» (г. Москва) испытания АПК показали, что интервал между калибровками ФЭМ увеличивается с 20-30 мин до 2-3 часов при скорости кодирования до 0,2 бит/пиксель. Рис.9 и рис.10 иллюстрируют типичные изменения СКО и ПОСШ по кадрам (в сжатом временном масштабе), формируемым на выходе АПК без обработки, со сжатием по алгоритму SPIHT и обработкой предложенным алгоритмом на базе SPIHT.

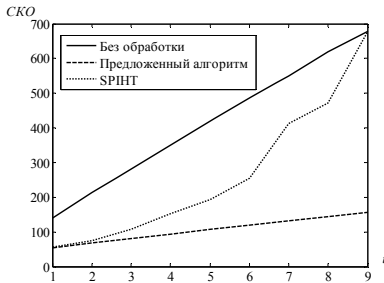


Рис.9. Изменения СКО для предложенного и SPIHT методов, вейвлет CDF 9.7; три уровня БВП, 0,2 бит/пиксель

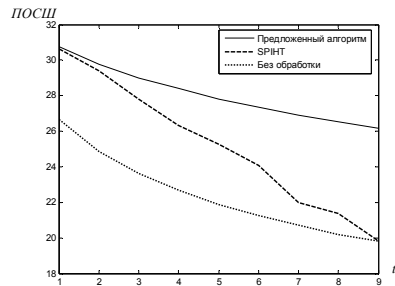


Рис.10. Изменения ПОСШ для предложенного и SPIHT методов, вейвлет CDF 9.7; три уровня БВП, 0,2 бит/пиксель

В работе приводится описание алгоритма **комплексирования мультиспектральных изображений** (видео-, радио- и ИК-диапазонов) с помощью оптимизированного алгоритма 3D-SPIHT. Главная идея, положенная в основу оптимизации 3D-SPIHT, заключается в определении значимости каждого ПОД декомпозиции вместо определения значимости каждого вейвлет-коэффициента. Предложенный «быстрый» алгоритм сжатия 3D-SPIHT обеспечивает выигрыш по времени до 72 % и по числу операций в 11 раз по сравнению с неоптимизированным 3D-SPIHT, что позволяет осуществить его техническую реализацию на цифровых процессорах обработки сигналов. Включение алгоритмов текстурно-зависимой обработки в процесс комплексирования на основе 3D-SPIHT позволило повысить точностные характеристики в существующих радиотехнических системах обработки аэрокосмических изображений, в частности, по точности геопространственной привязки - до 5 м, измерения координат объектов - до 1 пикселя, их скоростей - до 2 пикселей/кадр, размеров - до 10 %.

Для компьютерных телевизионных систем безопасности по данным гл.1 разработан алгоритм автоматического выбора «лучшего» вейвлет-кодека по заданной скорости кодирования. Реализация алгоритма в виде специализированного программного обеспечения для СУБД позволила обеспечить экономию дискового пространства сервера при записи видеоданных (до 60 %) в случае срабатывания детектора движения, повысить в них отношение сигнал-шум (на 3-5 дБ), а также сократить временные затраты (до 40 %), связанные с проведением предварительной фильтрации видеосигнала от удаленных видеокамер.

В работе также приводится описание первой версии **учебного программного комплекса** обработки изображений на основе вейвлет-преобразования IMPROC. Кроме известных методов обработки зашумленных изображений, данный комплекс содержит алгоритмы совместного сжатия и шумоподавления, изложенных в третьей и четвертой главах диссертации.

В приложениях приведены: таблицы статистических данных и расчетов, акты внедрения результатов работы, протоколы испытаний АПК обработки сигналов ФЭМ, копия лицензии от У.Пирлмана (W.Pearlman) на использование С-кодов SPIHT в учебном программном комплексе IMPROC.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации решена крупная научно-техническая проблема разработки теоретических положений, методов и алгоритмов компрессии зашумленных изображений на основе вейвлет-преобразования, имеющая важное теоретическое и прикладное значение.

1. Проведен сравнительный обзор методов, алгоритмов и устройств фильтрации и сжатия зашумленных изображений на основе вейвлет-преобразования; исследовано их поведение при мультипликативном шуме; выявлены пути для разработки теории, методов и алгоритмов вейвлет-кодирования зашумленных изображений при фиксированной квоте бит.
2. Выведены теоретические положения, доказывающие возможность построения эффективных методов, алгоритмов, кодеков для сжатия зашумленных изображений на основе нелинейной аппроксимации.
3. Разработаны методы и алгоритмы сжатия зашумленных изображений, использующие библиотеку базисов и обеспечивающие при заданной скорости кодирования относительно высокое качество восстановления оригинала по ряду объективных и субъективных критериев, в частности по ПОСШ до 30-32,5 дБ.
4. Разработаны методы и алгоритмы субполосного вейвлет-кодирования зашумленных изображений, обеспечивающие распределение квоты бит по субполосам и вычисление интервалов квантования и величин порогов в рамках единого критерия при разных видах пороговой обработки вейвлет-коэффициентов.
5. Разработаны оригинальные методики расчета аппроксимаций кривых спада сортированных вейвлет-коэффициентов в субполосах для зашумленного изображения.
6. Разработаны методики расчета уровней квантования для квантователей с равномерным квантованием, не требующих знания вида плотности вероятности значимых вейвлет-коэффициентов в пределах субполосы.
7. Разработаны алгоритмы предварительной текстурно-зависимой обработки изображения на основе коэффициентов вариации, работающие в реальном масштабе времени и обеспечивающие повышение ПОСШ на 3-5 дБ при кодировании зашумленных изображений с помощью известных кодеков EZW, JPEG2000, SPIHT.
8. Разработаны алгоритмы предварительной текстурно-зависимой субполосной обработки вейвлет-декомпозированного изображения на основе коэффициентов вариации. Алгоритмы работают в реальном масштабе времени и обеспечивают:

- обнуление вейвлет-коэффициентов ВЧ субполос, принадлежащих неоднородным текстурам, что повышает степень сжатия;
 - получение оценок вейвлет-коэффициентов, принадлежащих неоднородным текстурам, по максимуму апостериорной плотности вероятности на основе IV типа распределения Пирсона для асимметричных и обобщенного распределения Гаусса для симметричных распределений вейвлет-коэффициентов в ВЧ субполосах.
9. Разработаны алгоритмы субполосной текстурно-зависимой вейвлет-обработки изображений, полученных от РЛС прямого и бокового обзоров, на основе коэффициентов вариации, которые обеспечивают эффективное сжатие и подавление спекл-шума при анализе межуровневых связей типа «родитель – потомки».
 10. Разработаны алгоритмы кадровой SPIHT-основанной и текстурно-зависимой вейвлет-обработки тепловизионных изображений (размером от 240×320 до 600×800), которые компенсируют дрейф коэффициентов передачи фотоэлементов (до 30 %), что увеличивает интервал между калибровками ФЭМ с 20-30 мин до 2-3 часов.
 11. Разработано и внедрено специализированное аппаратное, алгоритмическое и программное обеспечение радиотехнических систем обработки аэрокосмических изображений, тепловизионных систем на базе КРТ-приемников ближнего ИК-диапазона, систем охранного телевидения, учебного программного комплекса IMPROC.
 12. Выполнено статистическое моделирование на тестовых и реальных телевизионных, радиолокационных и тепловизионных изображениях, проведены экспериментальные исследования на аппаратно-программном комплексе обработки сигналов ФЭМ, подтвердившие правильность теоретических выводов диссертации.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Бехтин, Ю.С. Оценка коэффициентов передачи фотодатчиков многоэлементных фотоприемных устройств [Текст] / Ю.М.Коршунов, Ю.А.Филатов, Ю.С.Бехтин и др. // Радиотехника, № 4, 1988. С.22-25.
2. Бехтин, Ю.С. Метод измерения координат точечных объектов по данным многоэлементного ФПУ [Текст] / Ю.С.Бехтин, Ю.А.Филатов // Автометрия. 1994. № 2. С.11-17.
3. Бехтин, Ю.С. Алгоритм вейвлет-фильтрации зашумленных изображений [Текст] // Вестник РГРТА. № 15. 2004. С.22-27.
4. Бехтин, Ю.С. Сопряжение многоэлементных фотоприемных устройств с персональным компьютером на базе аналого-цифровых модулей ввода-вывода [Текст] / Ю.С.Бехтин, А.А.Баранцев, М.В.Мызин // Известия ТРТУ (Таганрог). Тематический выпуск. 2006. № 5 (60). С.23-26.

5. Бехтин, Ю.С. Обработка зашумленных изображений на основе вейвлет-преобразований [Текст] // Вестник РГПУ. № 18. 2006. С.141-144.
6. Бехтин, Ю.С. Поиск оптимального распределения бит при сжатии данных зашумленных изображений на основе вейвлет-преобразования [Текст] // Цифровая обработка сигналов. 2007. № 1. С.17-24.
7. Бехтин, Ю.С. Аппаратно-программный комплекс цифровой обработки сигналов многорядных матричных фотоприемных устройств [Текст] / Ю.С.Бехтин, А.А.Баранцев, В.Н.Соляков и др.// Прикладная физика. 2007. № 3. С.77-82.
8. Бехтин, Ю.С. Вейвлет-кодирование зашумленных изображений преследованием базиса по когерентным структурам [Текст] // Цифровая обработка сигналов. 2007. № 3. С.2-8.
9. Бехтин, Ю.С. Алгоритмы цифровой обработки ИК-изображений без калибровки по геометрическому шуму [Текст] / Ю.С.Бехтин и др. // Прикладная физика. 2008. № 1. С.110-113.
10. Бехтин, Ю.С. Передача данных ИК-изображений фотозлектронных модулей по низкоскоростным каналам связи на основе вейвлет-преобразований [Текст] // Телекоммуникации. 2008. № 1. С.34-40.
11. Бехтин, Ю.С. Вейвлет-обработка ИК-изображений для компенсации дрейфа вольтовой чувствительности элементов фотозлектронных модулей [Текст] / Ю.С.Бехтин, Д.В.Титов // Известия вузов: Приборостроение. 2008. Т. 51. № 2. С.10-15.
12. Бехтин, Ю.С. Расчет квантователя при субполосном вейвлет-кодировании зашумленного изображения [Текст] // Телекоммуникации. 2008. № 3. С.27-33.

Статьи и материалы конференций; работы, опубл. на англ. языке:

13. Бехтин, Ю.С. Экспериментальные исследования помехоустойчивых измерителей экстремальных значений двумерного сигнала [Текст] / Ю.С.Бехтин, Н.Г.Тюремнов // Обработка и преобразование информации в задачах управления: Межвуз. сб. науч. тр. - Рязань: РРТИ. 1984.
14. Бехтин, Ю.С. Алгоритм оценки параметров импульсов в условиях помех [Текст] / Ю.М.Коршунов, Ю.А.Филатов, Ю.С.Бехтин и др. // Методы и устройства обработки информации в системах управления: Межвуз. сб. науч. тр. - Рязань: РРТИ. 1985.
15. Бехтин, Ю.С. Первичная обработка экспериментальных данных в информационных системах с многоэлементными фотоприемными устройствами [Текст] / Ю.М.Коршунов, Ю.А.Филатов, Ю.С.Бехтин // Тез. докл. III ВНТК «Перспективные методы планирования и анализа экспериментов при исследовании случайных полей и процессов». – М.: МЭИ. 1988.
16. Бехтин, Ю.С. Оценка параметров точечных источников в системах передачи информации с многоэлементным фотоприемником [Текст] / Ю.М.Коршунов, Ю.А.Филатов, Ю.С.Бехтин // Тез. докл. IX ВНТК «Теория кодирования и передачи информации». – Одесса. 1988.

17. Бехтин, Ю.С. Оценивание коэффициентов передачи фотодатчиков оптико-электронных систем [Текст] / Ю.М.Коршунов, Ю.А.Филатов, Ю.С.Бехтин // Тез. докл. ВНТК «Оптико-электронные измерительные устройства и системы». – Томск. ТИАСУР. 1989.
18. Бехтин, Ю.С. Обработка сигналов многоэлементных фотоприемников [Текст] / Ю.С.Бехтин и др. // Тез. докл. межресп. НТК «Обработка растровых изображений в автоматических системах». – Тула. 1991.
19. Бехтин, Ю.С. Цифровая фильтрация сигналов многоэлементных ФПУ при оценке координат точечных объектов [Текст] // Проблемы математического моделирования и обработки информации в задачах автоматического управления: Межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТА. 1994.
20. Бехтин, Ю.С. Подавление мультипликативного шума при сжатии данных изображений, полученных с помощью радаров с синтезированной апертурой [Текст] // Тез. докл. I МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – М.: МЦНТИ. 1998. 6 с.
21. Бехтин, Ю.С. Подавление геометрического шума чувствительности без калибровки каналов ФПУ [Текст] // Проблемы математического моделирования и обработки информации в научных исследованиях: Сб. науч. тр. - Рязань: РГРТА. 1999. 6 с.
22. Бехтин, Ю.С. Подавление геометрического шума чувствительности и дефектов без калибровки каналов ФПУ [Текст] // Проблемы математического моделирования и обработки информации в научных исследованиях: Сб. науч. тр. – Рязань: РГРТА. 2000. 6 с.
23. Бехтин, Ю.С. Улучшение качества изображений многоэлементных фотоприемных устройств [Текст] / Ю.С.Бехтин, А.С.Медведев // Тез. докл. МНТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». - Рязань: РГРТА. 2002. 2 с.
24. Бехтин, Ю.С. Оптимальная Wavelet-декомпозиция изображения с использованием зашумленных данных [Текст] // Тез. докл. IV МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – М. 2002. 2 с.
25. Бехтин, Ю.С. Улучшение качества зашумленных изображений на основе вейвлет-преобразований [Текст] // Проблемы математического моделирования и обработки информации в научных исследованиях: Сб. науч. тр. - Рязань: РГРТА. 2003. 9 с.
26. Бехтин, Ю.С. Программный комплекс обработки зашумленных изображений на основе вейвлет-преобразований [Текст] / Ю.С.Бехтин, А.Н.Рычков // Тез. докл. V МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – М. 2003.
27. Бехтин, Ю.С. Средства Wavelet Toolbox в задаче восстановления изображений, полученных с помощью радаров с синтезированной апертурой [Текст] / Ю.С.Бехтин, А.А.Брянцев // Тез. докл. 13-й МНТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». – Рязань: РГРТА. 2004. 2 с.

28. Бехтин, Ю.С. Компенсация дрейфа коэффициентов передачи фотоэлементов тепловизионных матриц [Текст] / Ю.С.Бехтин и др. // Тез. докл. 13-й МНТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». – Рязань: РГРТА. 2004. 2 с.
29. Бехтин, Ю.С. Построение аппаратно-программных комплексов цифровой обработки изображений фотоэлектронных модулей [Текст] / Ю.С.Бехтин, А.А.Баранцев, В.Н.Соляков и др. // Тез. докл. XVIII МНТК по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М.: ФГУП НПО «Орион». 2004. 1 с.
30. Бехтин, Ю.С. Улучшение качества изображений многоэлементных фотоприемных устройств [Текст] / Ю.С.Бехтин, А.А.Баранцев // Тез. докл. VI МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – М. 2004. 3 с.
31. Бехтин, Ю.С. Компенсация разброса вольтовой чувствительности элементов смотрящих матриц оптико-электронных приборов при кадровой обработке видеоданных [Текст] / Ю.С.Бехтин, А.А.Баранцев // Тез. докл. VII МНТК «Распознавание». – Курск: КГТУ. 2005. 2 с.
32. Бехтин, Ю.С. Подавление спекл-шума на основе анализа множеств зашумленных и неискаженных данных изображений в системах машинного зрения [Текст] / Ю.С.Бехтин, А.А.Брянцев // Тез. докл. VII МНТК «Распознавание». – Курск: КГТУ. 2005. 2 с.
33. Бехтин, Ю.С. Комбинированная фильтрация изображений, полученных с помощью радаров с синтезированной апертурой [Текст] / Ю.С.Бехтин, А.А.Брянцев // Тез. докл. VIII МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – М. 2006. 1 с.
34. Бехтин, Ю.С. Методы и алгоритмы цифровой обработки ИК-изображений болометра без калибровки по геометрическому шуму [Текст] / Ю.С.Бехтин и др. // Тез. докл. XIX-й МНТК по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М.: ФГУП НПО «Орион». 2006. 1 с.
35. Бехтин, Ю.С. Предварительная текстурная сегментация при сжатии данных зашумленных изображений на основе вейвлет-преобразований [Текст] / Ю.С.Бехтин, А.А.Брянцев // Вестник РГРТУ. 2007. № 19. С.45-50.
36. Бехтин, Ю.С. Архивирование зашумленных изображений на основе вейвлет-преобразования [Текст] // Научное обозрение. 2008. № 1. С.69-74.
37. Бехтин, Ю.С. Вейвлет-кодирование зашумленных изображений [Текст] // Тез. докл. VIII МНТК «Распознавание». – Курск: КГТУ. 2008. 2 с.
38. Bekhtin Yu. Joint Noise Removal and Data Compression of SAR Images. Summary on 5-month-length visit at Norwegian University of Science and Technology (NTNU). Internal report № 429705, Department of Telecommunications, NTNU, Trondheim, Norway, 7035, February, 1997.

39. Bekhtin Yu. Optimal thresholding for wavelet-based encoding of noisy images. International Conference on Optimization of Finite Element Approximation and Splines and Wavelets, St.Petersburg, Russia, June, 2001. 1 с.
40. Bekhtin Yu. Optimal Subband Wavelet Thresholding using Noisy and non- Noisy Data of Images, 2nd IEEE Region 8 EURASIP Symposium on Image and Signal Processing and Analysis, Pula, Croatia, June, 2001. 4 с.
41. Bekhtin Yu. Searching an Optimal Wavelet Threshold using Noisy and non-Noisy Data of Images, Proceedings of International Conference SSAB'2001, Norrköping, Sweden, 14-15, March, 2001. 4 с.
42. Bekhtin Yu., Barantsev A., Solyakov V., Medvedev A. Digital Hardware and Software Design for Infrared Sensor Image Processing. Proceedings of SPIE, Vol. 5834, Article Nr. 333, 2005. 8 с.
43. Bekhtin Yu. Joint adaptive wavelet thresholding and bit allocation for data compression of noisy images. The 7th International TICSP Workshop on Spectral Methods and Multirate Signal Processing, SMMSP2007, Moscow, Russia, 1-2 September, 2007. 8 с.
44. А.с. 1481904 (СССР). Устройство восстановления информационных импульсов в условиях помех / Ю.М.Коршунов, Ю.А.Филатов, И.А.Лашин, Ю.С.Бехтин. // Б.И. – 1989. – № 19.
45. А.с. 1569959 (СССР). Многоканальный цифровой нерекурсивный фильтр / Ю.М.Коршунов, Ю.А.Филатов, Ю.С. Бехтин // Б.И. – 1990. – № 21.
46. А.с. 1638648 (СССР). Цифровое устройство для измерения амплитуды импульсов / Ю.М.Коршунов, Ю.А.Филатов, Ю.С. Бехтин // Б.И. – 1991. – № 12.

Бехтин Юрий Станиславович

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ВЕЙВЛЕТ-КОДИРОВАНИЯ ЗАШУМЛЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук