

На правах рукописи



БАРАНЦЕВ Александр Александрович

АЛГОРИТМЫ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА И КОМПЕНСАЦИИ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ШУМОВ СИГНАЛОВ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ
С МАТРИЧНЫМИ ФОТОПРИЕМНИКАМИ

Специальность 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка
информации (технические системы)»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Рязань 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет» на кафедре автоматики и информационных технологий в управлении

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
профессор ФГБОУ ВПО «РГРТУ»
Бехтин Юрий Станиславович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент,
доцент ФГБОУ ВПО «ЯрГУ им.
П.Г. Демидова»
Приоров Андрей Леонидович

кандидат технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник
НИИ «Фотон» ФГБОУ ВПО «РГРТУ»
Москвитин Алексей Эдуардович

Ведущая организация: ГНЦ ФГУП ГосНИИАС, г. Москва

Защита диссертации состоится «26» декабря 2012 г.

в 12 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.211.01 в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Автореферат разослан « » ноября 2012 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



В. Н. Пржегорлинский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последнее время в промышленном производстве, медицине, военном деле наблюдается интенсивное внедрение разнообразных тепловизионных систем, обеспечивающих видеонаблюдение в инфракрасной области спектра. Такие системы отличаются наборами многоэлементных фотоприемников (МФП), которые имеют различную структуру расположения и соединения фоточувствительных элементов (ФЧЭ) [например, в виде линеек, матриц, с имитацией режима временной задержки и накопления заряда (ВЗН) и т.п.], работающих в разных участках инфракрасной области спектра и содержащих различные тепловые излучатели (ТИ) для калибровки. В тепловизионных системах с матричными МФП отечественного производства до сих пор острой остается проблема компенсации так называемых геометрических шумов (структурных помех, *fixed pattern noise*), обусловленных неоднородностью параметров ФЧЭ (до $\pm 30\%$).

Традиционные подходы к компенсации геометрических шумов дефектов (пробой p - n -переходов ФЧЭ), темнового тока (проявляется в наличии пьедестальных напряжений на выходе ФЧЭ), чувствительности (разброса коэффициентов передачи электронного тракта ФЧЭ) основаны на применении ТИ с различной радиационной температурой излучающих поверхностей с целью формирования в электронных трактах МФП опорных электрических сигналов. Двухуровневая калибровка (с «низкой» и «высокой» температурами) позволяет вычислить и записать в память оценки пьедестальных напряжений и коэффициентов передачи ФЧЭ с погрешностью 5 – 7 %, что неприемлемо для современных требований в 0,05-2,5 %. Причем даже такое качество коррекции геометрического шума обеспечивается только при наличии в составе тепловизионной системы высокостабильных ТИ. Кроме того, любой МФП обладает некоторой нестабильностью параметров ФЧЭ, которая проявляется в дрейфе интенсивности геометрического шума темнового тока и чувствительности с течением времени. Очевидно, что применение периодической калибровки, приемлемое для одного МФП, нарушает синхронную работу всей тепловизионной системы в рабочем (смотрящем) режиме, поскольку различные МФП с разными холодильниками (или без них) имеют разные временные пределы работоспособности.

Таким образом, исследование и разработка алгоритмов и средств вторичной обработки формируемых на выходе МФП изображений для компенсации остаточного геометрического шума представляются необходимыми и актуальными при создании как тепловизионных систем на базе МФП, так и систем для их автоматизированного исследования, измерения и контроля.

Степень разработанности темы. Один из подходов компенсации геометрического шума, похожий на калибровку от встроенного ТИ, ориентирован на использование источника внешнего эталонного опорного сигнала. Однако получение на входе объектива МФП неискаженных уровней оптического сигнала является сложной задачей из-за изменения состояния атмосферы, условий и времени коррекции, характеристик внешнего ТИ и т.п.

Альтернативным подходом решения проблемы компенсации геометрического шума считается статистическая обработка формируемых на выходе МФП изображений. Здесь можно выделить два направления. Первое

основано на анализе и использовании статистических характеристик тепловизионных изображений, в частности гистограмм выделяемых объектов, кластеризации, автокорреляционных функций и т.п. Данное направление представлено работами Алпатова Б.А., Еремеева В.В., Злобина В.К., Новикова М.В., Якушенкова Ю.Г., Porez F., Vitterli M. и др. Предложенные в данных работах методы и алгоритмы, преимущественно эмпирического характера, предполагают наличие МФП со сканирующими линейками ФЧЭ на базе ПЗС, стабильность анализируемой видеопоследовательности и основаны на сопоставлении статистических характеристик выходных сигналов МФП во временной, частотной и вероятностной областях. Если тепловизионная система содержит матричные МФП, то внутрикадровой статистики оказывается недостаточно, что значительно снижает эффективность известных методов и алгоритмов, а при существенной неоднородности сцен и дрейфе геометрического шума чувствительности они оказываются неработоспособными.

Второе направление связано с фильтрацией тепловизионных изображений на выходе МФП с остаточным геометрическим шумом. Данное направление представлено работами Бехтина Ю.С., Винецкого Ю.Р., Коршунова Ю.М., Тришенкова М.А., Филатова Ю.А., Якушенкова Ю.Г. и др. Классические решения основаны на одномерной и двумерной фильтрации выходных сигналов каждого ФЧЭ МФП во временной и частотной областях (фильтры Калмана, Винера, Ли, Куана, Фроста, медианные, билатеральные и т.п.), что обуславливает внесение таких «болезненных» искажений в ИК-изображение, как дополнительное размытие контуров объектов, сглаживание перепадов яркости. Другим существенным недостатком известных решений является необходимость подбора «своего» фильтра и его параметров для каждого МФП.

Таким образом, необходимо использовать такую общую схему обработки тепловизионных изображений МФП, которая не зависит от типа и структуры МФП, вида ТИ, неоднородностей сцен формируемых видеопоследовательностей и которая позволит одновременно решить задачи фильтрации и комплексирования искаженных остаточным геометрическим шумом изображений, полученных в разных участках ИК-спектра.

Такой схемой является вейвлет-преобразование, где трансформация выходного сигнала МФП позволяет провести его детальный время-частотный анализ с эффективным разделением аддитивной и мультипликативной составляющих, обусловленных действием остаточных геометрических шумов темнового тока и чувствительности соответственно. Значительный вклад в теорию вейвлет-преобразования, в частности, вейвлет-фильтрации внесли зарубежные ученые: С.Бюррус (*Burrus*); П.Вайдьянатан (*Vaidianathan*), М.Веттерли (*Vetterli*), И.Добеши (*Daubechies*), Д.Донохо (*Donoho*), С.Малла (*Mallat*), И.Мейер (*Meyer*), Р.Куафман (*Coifman*), Н.Саито (*Saito*), Б.Видакович (*Vidakovic*) и др. Некоторыми теоретическими аспектами вейвлет-преобразования и его практическими приложениями занимались отечественные ученые: К.А.Алексеев, Б.А.Алпатов, Ю.С.Бехтин, Ю.А.Брюханов, В.В.Витязев, 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, А.Л.Приоров, М.К.Чобану и др. Однако в их работах задачи фильтрации решаются, как правило, для сигналов и изображений радио- и

оптического диапазона. Работ, посвященных применению вейвлет-преобразования для компенсации геометрического шума в тепловизионных системах, практически не встречается. Также в литературе не находят достаточного освещения вопросы комплексирования тепловизионных изображений, полученных в различных участках спектра ИК-излучения.

Цель и задачи диссертации. Целью диссертации является разработка алгоритмов и аппаратно-программного обеспечения вейвлет-анализа и обработки выходных сигналов (изображений) МФП разных ИК-диапазонов тепловизионной системы для компенсации геометрических шумов ФЧЭ и последующего комплексирования.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи.

1. Разработка и исследование алгоритмов компенсации остаточного геометрического шума темнового тока и чувствительности МФП на основе покадровой пороговой обработки вейвлет-коэффициентов.
2. Разработка и исследование алгоритмов компенсации геометрического шума в выходном сигнале (видеопоследовательности) МФП с использованием вейвлет-анализа и обработки когерентных структур и пространственно-ориентированных деревьев (ПОД).
3. Разработка алгоритмов комплексирования тепловизионных изображений, искаженных остаточным геометрическим шумом, с учетом дрейфа его параметров во времени на основе вейвлет-анализа и обработки когерентных структур и ПОД.
4. Разработка аппаратно-программных комплексов и программного обеспечения тепловизионных систем, реализующих полученные алгоритмы вейвлет-анализа и обработки сигналов матричных МФП.

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

1. Разработаны и исследованы алгоритмы текстурно-зависимой обработки вейвлет-коэффициентов тепловизионных изображений с остаточным геометрическим шумом с использованием локальных коэффициентов вариации и оценок по максимуму апостериорной плотности вероятности на основе обобщенного распределения Гаусса.
2. Разработаны алгоритмы вейвлет-анализа и обработки искаженных геометрическим шумом тепловизионных изображений на основе поиска и отделения в них когерентных структур в субполосах быстрого вейвлет-преобразования (БВП).
3. Разработаны и исследованы алгоритмы компенсации геометрического шума матричных МФП на основе пространственно-ориентированных деревьев (ПОД) быстрого вейвлет-преобразования.
4. Разработаны и исследованы алгоритмы комплексирования тепловизионных изображений различных ИК-поддиапазонов с использованием когерентных структур и ПОД БВП, учитывающих как стабильность, так и нестабильность параметров геометрического шума чувствительности во времени.
5. Предложены варианты построения аппаратно-программных комплексов обработки сигналов матричных МФП на базе персонального компьютера (ПК) и их программного обеспечения с использованием специализированных плат ввода-вывода, функционирующих в реальном масштабе времени.

Практическая ценность. Полученные алгоритмы вейвлет-анализа и компенсации геометрического шума матричных МФП обеспечивают построение специализированных аппаратно-программных комплексов и/или разработку пакетов прикладных программ для ЭВМ, с помощью которых производится эффективное подавление геометрического шума и комплексирование тепловизионных изображений с относительно высоким качеством. Данное обстоятельство обеспечивает пролонгацию работы тепловизионной системы в смотрящем режиме до нескольких часов и снимает проблему периодических калибровок МФП. Универсальность предложенных алгоритмов позволяет использовать их не только при эксплуатации существующих тепловизионных систем, но и на стадии производства для экспресс-оценки и настройки (калибровки) параметров МФП.

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 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 алгоритмами, данными протоколов приемосдаточных испытаний образца аппаратно-программного комплекса обработки сигналов матричного МФП.

Личный вклад автора. Основные теоретические положения диссертации получены в соавторстве; разработка представленных алгоритмов, статистическое моделирование на ЭВМ, разработка и отладка аппаратного и программного обеспечения выполнялись автором лично.

Реализация и внедрение. Диссертационная работа включает в себя исследования, выполненные в Рязанском государственном радиотехническом университете в рамках госбюджетных и хоздоговорных НИР № 30-03, № 9-08Г, № 41-10 (по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы», номер контракта 16.740.11.0086), в которых автор являлся исполнителем и ответственным исполнителем.

Для лабораторного практикума применяется разработанный в соавторстве учебный программный комплекс «IMPROC», версия 1.0, содержащий в том числе полученные в диссертации алгоритмы вейвлет-обработки зашумленных изображений на основе текстурно-зависимого анализа.

Разработанные алгоритмы предварительной калибровки, компенсации дрейфа коэффициентов передачи ФЧЭ матричных МФП внедрены в ФГУП «НПО «Орион» (г.Москва). Алгоритмы комплексирования мультиспектральных изображений на основе вейвлет-обработки внедрены в ОАО «Государственный Рязанский приборный завод».

Апробация работы. Материалы работы докладывались и обсуждались на МНТК по фотозлектронике и приборам ночного видения (г. Москва, 2004, 2006, 2010, 2012 г.); МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (г. Москва, 2004 г.), МНТК «Распознавание», (г. Курск, 2005 г.), на трех международных и всероссийских научно-технических конференциях и семинарах кафедры РГТУ (г.Рязань) за 2004-2012 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, из них четыре статьи в журналах из списка ВАК РФ, 9 тезисов докладов на научных конференциях, 1 статья на английском языке в Proceedings of SPIE, свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2012617750.

Структура диссертации. Диссертация общим объемом 166 с. состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 145 с. основного текста, перечень используемой научно-технической литературы из 122 наименований на 11 с., 4 приложения на 10 с., 80 рис. и 6 табл.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Алгоритмы анализа и оценивания вейвлет-коэффициентов, учитывающие текстуру искаженного геометрическим шумом тепловизионного изображения и использующие локальные коэффициенты вариации и обобщенное распределение Гаусса.
2. Алгоритмы кадровой вейвлет-фильтрации и комплексирования искаженных остаточным геометрическим шумом тепловизионных изображений на основе отделения когерентных структур.
3. Алгоритмы вейвлет-фильтрации и комплексирования искаженных остаточным геометрическим шумом тепловизионных видеопоследовательностей с использованием пространственно-ориентированных деревьев быстрого вейвлет-преобразования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновываются необходимость и актуальность темы исследований, формулируются цель и задачи диссертационной работы, определяется научная и практическая значимость полученных результатов, а также излагаются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дается сравнительный обзор существующих технологий, методов, способов и алгоритмов анализа и обработки тепловизионных изображений, искаженных геометрическим шумом МФП.

Отмечается, что при решении задач подавления геометрического шума используется парадигма, основанная на представлении геометрического шума детерминированным процессом, при котором пространственное распределение шума считается не зависящим от времени. При ее технической реализации применяются две группы методов. Первая группа методов основана на использовании средств дискретно-аналоговой обработки сигналов и включает методы компенсации, двойной коррелированной выборки, стабилизации выходного сигнала. Данные методы реализуются производителем МФП и требуют предварительного изучения физических источников геометрического шума и выбора таких методов, которые эффективно подавляют его составляющие, которые преобладают в МФП

данного типа. Вторая группа методов подавления геометрического шума основана на использовании средств аналогово-цифровой схмотехники. Эти методы не предполагают предварительного изучения физических источников геометрического шума. Для их реализации МФП подвергают предварительной калибровке от источника эталонного теплового излучения (ТИ), преобразуют отклики на эталонное излучение в цифровую форму, преобразуют их в поправочные коэффициенты, запоминают и используют поправочные коэффициенты для коррекции выходного сигнала МФП.

Показано, что для матричных МФП использование ТИ не полностью убирает геометрический шум темного тока и чувствительности. В связи с этим ставится задача компенсации остаточного геометрического шума на основе вторичной статистической обработки тепловизионных изображений, математическая модель которых имеет следующий вид:

$$Y = KX + B + \nu, \quad (1)$$

где Y - регистрируемое на выходе МФП (зашумленное) тепловизионное изображение; X - неискаженное (оригинал) изображение наблюдаемой сцены; K - остаточный геометрический шум чувствительности, который действует как мультипликативный шум с единичным средним и распределением, близким к нормальному; B - остаточный геометрический шум темного тока (напряжения), в общем случае равномерно-распределенный в некотором интервале допустимых пьедестальных напряжений ФЧЭ для данного МФП; ν - тепловой аддитивный шум ФЧЭ, действие которого проявляется в высокочастотной области. Показано, что в зависимости от структуры электронного тракта ФЧЭ (например, наличие полосовых фильтров) тепловой шум является центрированным коррелированным случайным процессом. Приводится алгоритм расчета ковариационной матрицы теплового шума для типовой модели электронного тракта ФЧЭ с полосовым фильтром. Также показано, что флуктуационный шум ν из-за его коррелированности оказывается близким к поведению составляющей B , а наиболее существенное влияние на качество формируемого на выходе МФП изображения оказывает мультипликативная составляющая K сигнала (1).

Отмечается, что для получения оценки оригинала изображения \hat{X} необходимо либо синтезировать помехоустойчивый и инвариантный к постоянной составляющей фильтр, либо проводить двухшаговую обработку с поиском на первом шаге оценки постоянной составляющей \hat{B} и ее последующем вычитании. Наибольший интерес с точки зрения эффективности и простоты реализации вызывают алгоритмы адаптивной фильтрации мультипликативных помех, использующие коэффициенты вариации, вычисляемые через дисперсии и квадраты выборочных средних для мультипликативного шума и текстуры изображения соответственно. В работе исследованы фильтры Ли (Lee), Куана (Khuan), Фроста (Frost) и др., относящиеся к классу адаптивных фильтров первого порядка, а также фильтры второго порядка, вычисляющие оценки \hat{X} по максимуму апостериорной плотности вероятности. В процессе машинного моделирования на ряде тестовых изображений было выявлено, что на эффективность

применения подобных фильтров сильно влияет разнообразие текстур изображений. Делается вывод о необходимости текстурно-зависимого анализа и обработки тепловизионных изображений. Также показано, что подобные решения не позволяют компенсировать остаточный геометрический шум из-за внесения фильтрами дополнительных искажений, при этом не учитывается дрейф параметров геометрического шума в смотрящем режиме работы МФП.

В связи с этим в работе обосновывается выбор вейвлет-преобразования и подчеркивается, что такая трансформация выходного сигнала МФП (1) позволяет провести его детальный время-частотный анализ с эффективным разделением аддитивной и мультипликативной составляющих, обусловленных действием остаточных геометрических шумов темнового тока и чувствительности соответственно. В общем виде вейвлет-преобразование двумерного сигнала (1) представляется в виде массива вейвлет-коэффициентов W_Y , состоящего из суммы массива вейвлет-коэффициентов оригинала W_X и массива вейвлет-коэффициентов суммарных искажающих воздействий W_ξ (W – символ вейвлет-преобразования):

$$\begin{aligned} W_Y &= W(Y) = W(KX) + W(B) + W(v) = W(X) + W(X(K-1)) + W_B + W_v = \\ &= W_X + W_Z + W_B + W_v = W_X + W_\xi. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, ставится задача разработки алгоритмов анализа и обработки массива вейвлет-коэффициентов вида (2) с целью поиска оценок вейвлет-коэффициентов W_X и последующего восстановления оценки оригинала изображения через обратное вейвлет-преобразование. В главе также приводится сравнительный детальный обзор известных алгоритмов вейвлет-фильтрации на основе пороговой обработки вейвлет-коэффициентов и комплексирования на уровне пикселей.

Вторая глава посвящена разработке алгоритмов обработки вейвлет-коэффициентов тепловизионного изображения с использованием текстурно-зависимого анализа и отбора когерентных структур для компенсации остаточного геометрического шума и комплексирования.

На основе статистической обработки данных измерений реальных МФП показывается, что закон распределения коэффициентов передачи электронных трактов ФЧЭ (геометрический шум чувствительности) близок к нормальному с единичным средним. Такое же поведение сохраняется в области вейвлет-трансформанты. При этом, благодаря высокочастотным свойствам вейвлет-преобразования, в субполосах, соответствующих так называемым «деталям», нет постоянной составляющей, а действие мультипликативного шума K похоже, но не идентично действию аддитивного шума. Данное обстоятельство позволяет перенести текстурный анализ точек изображения непосредственно на стадию вейвлет-преобразования. Показано, что на уровне вейвлет-преобразования коэффициент вариации для оригинала имеет вид:

$$C_X^2 = \frac{C_{W_Y}^2 - C_{W_Z}^2}{V_2^{[j]}(1 + C_Z^2)}, \quad (3)$$

где $V_n^{[l]} = \sum_k \sum_l (\tilde{H}_k \tilde{G}_l)^n$, $\tilde{H}_k = h_k^j$; $\tilde{G}_l = g_l^{[j-1]} h_l^{j-1}$, 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 $C_{w_z} = \sqrt{V_2^{[j]}} C_z$, j - текущий уровень быстрого вейвлет-преобразования. Определены три возможные ситуации при сравнении оценок коэффициентов вариации вейвлет-коэффициентов - неоднородная текстура, точечный объект и однородная текстура соответственно:

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

Для получения оценок вейвлет-коэффициентов, соответствующих неоднородной текстуре, предлагается использовать обобщенное распределение Гаусса $f_X(x) = B(\beta, \sigma) \exp\{- (G(\beta, \sigma)|x|)^\beta\}$, $-\infty < x < +\infty$, $\beta > 0$, где B , G - параметры, определяемые через дисперсию σ^2 и коэффициент эксцесса β . Оценка \hat{w}_X находится через численное решение уравнения $\beta_\pm G_\pm |w_Y - w_X|^{\beta_\pm - 1} + \beta_X G_X |w_X|^{\beta_X - 1} = 0$, 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 $\kappa_{n,W_X} = V_n^{[j]} \kappa_{n,X}$.

Другой алгоритм вейвлет-анализа (фильтрации) основан на выделении когерентных структур, то есть сильно коррелированных с выбранным вейвлет-базисом компонентов двумерного сигнала. Оценка оригинального изображения является суммой M ($M < I$) когерентных структур вида $\hat{X} = \sum_{k=1}^M W^{-1}\{w_{Y_k}\}$, где $|w_{Y_k}| \geq |w_{Y_{k+1}}|$, $\forall k \in [1, \dots, I]$, I - число пикселей изображения. При любом M определяется остаток Y_M , вычисляемый как разность между исходным искаженным изображением и изображением, полученным после обратного вейвлет-преобразования (восстановления) над всеми когерентными структурами:

$$Y_M = Y - \sum_{k=1}^M \mathbf{W}^{-1}\{w_{Y_k}\} = \sum_{k=M+1}^I \mathbf{W}^{-1}\{w_{Y_k}\}, \quad (4)$$

где символом \mathbf{W}^{-1} обозначена операция вычисления обратного вейвлет-преобразования. Остаток Y_M будет считаться шумом, если коэффициент нормированной корреляции этого остатка в выбранном вейвлет-базисе будет больше коэффициента нормированной корреляции шума ρ_{I-M} :

$$\rho^2(Y_M) = \frac{|W_{Y_M}|^2}{\sum_{k=M+1}^I |W_{Y_k}|^2} > \rho_{I-M}^2.$$

Отмечается, что удаление когерентных структур внешне похоже на так называемую грубую пороговую обработку вейвлет-коэффициентов (*hard thresholding*) с величиной порога

$$\tau = \rho_{I-M} \sqrt{\sum_{k=M+1}^I |W_{Y_k}|^2}. \quad (5)$$

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 остаточного геометрического шума. В работе также проанализировано влияние типа вейвлет-базиса из семейств вейвлетов Добеши, симлетов, куафлетов и биортогональных вейвлетов на эффективность обработки по критериям пикового отношения сигнал-шум (ПОСШ), нормированной кросс-корреляции (НК), индекса структурного сходства (SSIM) и др. Устойчивые результаты (погрешность компенсации геометрического шума составила 2-3 %) получены для вейвлетов db7, cdf 9.7.

Отмечается, что традиционное при комплексировании на уровне пикселей мультиспектральных изображений «правило отбора максимума» (*maximum-selection fusion rule*), которое заключается в сравнении по абсолютной величине соответствующих вейвлет-коэффициентов всех исходных изображений и формировании по наибольшим с помощью обратного вейвлет-преобразования результирующего изображения, не работает для тепловизионных изображений при наличии остаточного геометрического шума чувствительности. Идея предлагаемого в работе алгоритма состоит в отборе таких когерентных структур тепловизионных изображений разных участков ИК-спектра, где достигается максимальная корреляция между нелинейной аппроксимацией некоторого зашумленного изображения и выбранным вейвлет-базисом. Чтобы избежать появления артефактов в результирующем изображении, в работе используется инвариантное к сдвигу дискретное вейвлет-преобразование (SI-DWT).

Пусть имеется L искаженных тепловизионных изображений одной и той же сцены, которые получены МФП в разных участках ИК-спектра и которые формируют библиотеку исходных изображений $\{Y^1, Y^2, \dots, Y^L\}$. Тогда наилучшей когерентной структурой с номером α во всех исходных изображениях библиотеки считается такая, которая минимизирует функцию стоимости:

$$C(Y^\alpha) = \min_{\alpha} C(Y^\alpha), \quad \alpha = 1, \dots, L, \quad (6)$$

где

$$C(Y^\alpha) = \sum_{i=1}^I \Phi \left(\frac{|W_{Y_i^{(\alpha)}}|^2}{\|Y^i\|^2} \right). \quad (7)$$

Выбор наилучшей когерентной структуры по алгоритму (6), (7) зависит от вида вогнутой функции Шура Φ . В работе используется энтропия вида

$\Phi(u) = -u \ln u$, $u \geq 0$. Предлагаемый алгоритм автоматического комплексирования носит итерационный характер и определяет вложенность алгоритмов по выделению когерентных структур по каждому изображению и отбору среди них наилучших в смысле критерия (6) для последовательного восстановления остатков.

Показана относительно быстрая сходимость алгоритмов фильтрации и комплексирования с помощью выделения когерентных структур (2-3 итерации), при этом наблюдается увеличение значения ПОСШ в среднем на 3-5 дБ, а критерия SSIM – на 20-25 %. При этом погрешность вычисления оценок коэффициентов передачи и пьедестальных напряжений ФЧЭ составляет порядка 1,5-1,8 %, что соответствует современным требованиям к МФП.

В третьей главе рассматриваются алгоритмы вейвлет-фильтрации и комплексирования видеопоследовательностей тепловизионных изображений, учитывающих дрейф параметров геометрического шума чувствительности во времени, на основе пространственно-ориентированных деревьев быстрого вейвлет-преобразования.

В предположении, что геометрический шум темного тока и дефектов учтены на этапе предварительной калибровки, математическая модель наблюдаемого сигнала во времени (то есть по кадрам, в рабочем режиме) имеет вид:

$$\hat{X}(t) = Y(t) / K(t) = K(t)X(t) / K(t) = X(t)Z(t), \quad (8)$$

где $\hat{X}(t)$ – оценка оригинала изображения $X(t)$, $Y(t)$ – сигнал на выходе МФП, $K(t)$ – матрица текущих значений коэффициентов передачи ФЧЭ, $K(0)$ – матрица оценок коэффициентов передачи ФЧЭ, полученных на этапе предварительной калибровки, t – номер кадра, $t=0, 1, 2, \dots$. Поскольку со временем увеличивается расхождение между текущими значениями $K(t)$ и их калибровочными оценками $K(0)$, то возрастает среднеквадратическая ошибка $CKO(t) = E\left\{X(t) - \hat{X}(t)\right\}^2$, здесь E – символ математического ожидания, и уменьшается значение ПОСШ

$$ПОСШ(t) = 10 \lg \frac{\max\{\hat{X}(t)\}^2}{CKO(t)}. \quad (9)$$

Модель вида (8) интерпретируется как наблюдение в смысле минимума СКО или максимума ПОСШ (9) оценки $\hat{X}(t)$, которая искажается мультипликативным процессом $Z(t)$ с единичным средним в каждом кадре.

Основная идея алгоритмов обработки заключается в представлении текущего кадра в виде совокупности пространственно-ориентированных деревьев (ПОД), которые используются при кодировании вейвлет-коэффициентов по алгоритмам EZW, SPIHT. В таком представлении все коэффициенты вейвлет-декомпозиции упорядочиваются в виде ПОД, корнями которых являются точки аппроксимации самой низкочастотной субполосы с тремя потомками. На рис.1, а, б показана структура связей «родитель-потомки» для трехуровневого быстрого вейвлет-преобразования.

Разработанный алгоритм фильтрации геометрического шума чувствительности основан на применении мягкой пороговой обработки (soft

thresholding) вейвлет-коэффициентов высокочастотных субполос, поскольку на уровне ПОД вейвлет-преобразования мультипликативная помеха рассматривается как аддитивная шумовая составляющая. Вейвлет-коэффициенты первого уровня (аппроксимация) являются большими по величине, поскольку именно сюда происходит «перекачка» энергии сигнала при вейвлет-преобразовании (рис.2, а), следовательно, их необходимо исключить из рассмотрения. Тогда вычисляется дисперсия $\sigma_{\Xi}^2(t)$ оставшихся вейвлет-коэффициентов ПОД и выставляется величина порога:

$$\tau_{\text{ПОД}_j}(t) = \text{ПОД}_j(1,t) \cdot \sigma_{\Xi, \text{ПОД}_j}(t), \quad (10)$$

где $\text{ПОД}_j(1,t)$ – первый элемент ПОД с номером j , $j=1, 2, \dots, N$, N – количество ПОД в изображении.

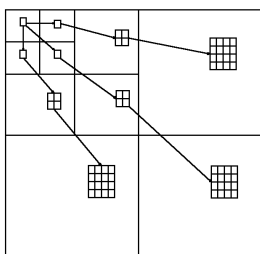
Отмечается, что отклонения кривых ПОД зашумленных изображений от «идеальной» кривой носят хаотический характер (рис. 2, а), который особенно сильно проявляется в области расположения «высокочастотных» вейвлет-коэффициентов, отвечающих за детали изображения. Поскольку «правило отбора максимума» при комплексировании не работает, то наоборот, желательно оставлять те вейвлет-коэффициенты, которые ближе к «идеальной» кривой. С другой стороны, пороговая обработка, используемая в вышеописанном алгоритме, приводящая к обнулению «высокочастотных» вейвлет-коэффициентов, уничтожает полезный контент, хранящийся в них. Таким образом, необходимо найти компромисс между противоречивыми требованиями, что приводит к следующему алгоритму обработки.

1. Вычислить быстрое вейвлет-преобразование зашумленных телевизионных изображений, подвергающихся комплексированию.
2. Преобразовать массивы вейвлет-коэффициентов в виде множеств векторов ПОД.
3. Выполнить поиск минимальных по амплитуде вейвлет-коэффициентов путем применения операции сравнения всех соответствующих ПОД из множеств ПОД.
4. Сформировать множество ПОД из найденных вейвлет-коэффициентов с минимальной амплитудой с учетом знаков.
5. Выполнить обратное преобразование множества ПОД в массив вейвлет-коэффициентов.
6. Выполнить обратное вейвлет-преобразование над новым массивом вейвлет-коэффициентов и сформировать комплексированное изображение.

Результат работы предложенного алгоритма для одного ПОД тестового изображения показан на рис. 2, б. Из рисунка видно, что удается «синтезировать» кривую спада вейвлет-коэффициентов ПОД комплексированного изображения, незначительно отклоняющуюся от кривой спада вейвлет-коэффициентов ПОД неискаженного изображения.

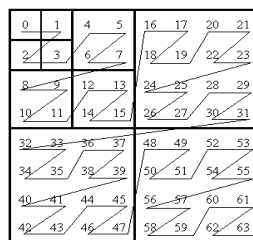
Показано, что аналогичный подход можно применить и для обработки видеопоследовательности, если группу соседних кадров, в которых сцена изменяется незначительно, считать как библиотеку мультиспектральных изображений. В работе исследовано влияние количества кадров на скорость и точность обработки видеопоследовательности.

Результаты статистического моделирования показали относительно высокое бодродействие соответствующих алгоритмов обработки, поскольку они не содержат рутинных итерационных вычислительных процедур, кроме того, отсутствие пороговой обработки вейвлет-коэффициентов позволяет избежать появления блочных артефактов на комплексированном изображении. Проведенные вычислительные эксперименты показали значительное улучшение качества передаваемых изображений, что увеличивает интервал между калибровками МФП до нескольких часов. При этом работоспособность предложенных алгоритмов фильтрации комплексирования сохраняется при значениях коэффициента нормированной кросс-корреляции НК=0,5.



a

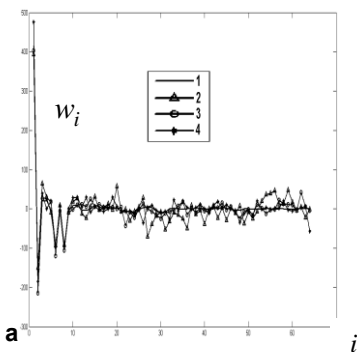
Структура ПОД



б

Порядок обработки ПОД

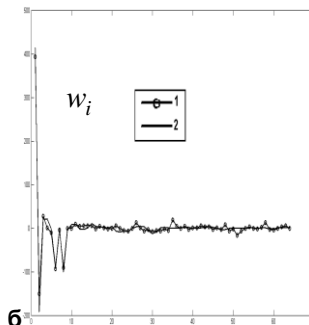
Рис.1



a

i

Поведение нормализованных вейвлет-коэффициентов ПОД для тестового изображения при отсутствии шума (1) и при его наличии (2 – 4)



б

Поведение вейвлет-коэффициентов ПОД оригинального (1) и комплексированного (2) изображений

Рис.2

Четвертая глава посвящена практической реализации полученных алгоритмов вейвлет-анализа и обработки тепловизионных изображений с остаточным геометрическим шумом.

Отмечается, что техническое решение данной задачи возможно получить: а) с помощью внешних по отношению к ПК устройств, содержащих мощные процессоры обработки сигналов (DSP), буферную память для записи кадров; б) с применением плат сопряжения на ПЛИС, где вероятны существенные временные задержки при перепрограммировании ПЛИС; в) с применением в качестве устройства сопряжения плат аналого-цифрового или цифрового ввода-вывода, устанавливаемых в ПК, которые не содержат встроенного DSP. В последнем варианте, как относительно просто и недорого, алгоритмы обработки выходного сигнала МФП полностью реализуются через программное обеспечение в ПК, которое и управляет работой всей цепи «МФП – плата сопряжения – ПК».

Приводятся два варианта технической реализации разработанных алгоритмов на основе плат цифрового (ADM-DIO32) и аналого-цифрового ввода (AMBPCI) в аппаратно-программном комплексе (АПК), подключаемом к измерительному стенду и состоящем из болометра, блока электронной обработки, ПК класса IBM PC (не менее 2,6 ГГц) с разработанным оригинальным программным обеспечением. Программное обеспечение для операционной системы Windows 9x, XP, 2000, выполняющее алгоритмическое сопряжение ПК с платой AMBPCI, создано в среде разработки Visual C++ 6.0 с применением библиотеки классов MFC. В приложении реализован однодокументный интерфейс (SDI), а также возможность непрерывного ввода изображений (так называемый видеорежим).

Программное обеспечение включает оригинальные алгоритмы калибровки по оптическому сигналу и двухточечной коррекции (по «низкой» и «высокой» температурам) с погрешностью не более 4 % при исходном разбросе 35 %. Для рабочего режима (после калибровки) применяется алгоритм покадровой (размером от 240×320 до 600×800) вейвлет-обработки сигналов МФП в реальном времени на основе ПОД, рассмотренный в третьей главе. Проведенные на ФГУП «НПО «Орион» (г. Москва) испытания АПК показали, что интервал между калибровками неохлаждаемого МФП увеличивается с 20-30 мин до 2-3 часов. Кроме того, выявлено, что по выходным данным алгоритмов вейвлет-обработки возможно проводить измерения ряда электрофизических параметров ФЧЭ и соответствующих электронных схем МФП с относительной погрешностью не более 0,8 %.

В работе также приводится описание первой версии учебного программного комплекса обработки изображений на основе вейвлет-преобразования IMPROC. Кроме известных алгоритмов обработки шумоподавления изображений, данный комплекс содержит алгоритмы шумоподавления, изложенные во второй главе диссертации.

В приложениях приведены: таблицы статистических данных и расчетов, акты внедрения результатов работы, протоколы испытаний АПК обработки сигналов МФП.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе исследований решена важная научно-техническая задача, связанная с разработкой эффективных алгоритмов вторичной обработки тепловизионных изображений матричных МФП с остаточным геометрическим шумом.

1. Проведен сравнительный обзор методов, алгоритмов и технических решений компенсации геометрического шума в тепловизионных системах с матричными МФП. Показана перспективность вторичной обработки тепловизионных изображений с остаточным геометрическим шумом на основе вейвлет-преобразования.

2. Обоснованы математические модели сигналов МФП (до и после вейвлет-преобразования), учитывающие действие геометрического шума чувствительности и темнового тока (напряжения), а также теплового шума в ФЧЭ, путем статистической обработки данных испытаний образцов матричных МФП.

3. Разработаны алгоритмы фильтрации искаженных остаточным геометрическим шумом тепловизионных изображений с использованием текстурно-зависимого анализа на уровне вейвлет-преобразования и поиска оценок вейвлет-коэффициентов по критерию максимума апостериорной плотности вероятности на неоднородной текстуре с помощью обобщенного распределения Гаусса. Алгоритм обеспечивает повышение ПОСШ в среднем на 3-5 дБ, а значение критерия SSIM на 10-15 %.

4. Разработаны алгоритмы фильтрации искаженных остаточным геометрическим шумом тепловизионных изображений с отделением когерентных структур на основе грубой пороговой обработки вейвлет-коэффициентов. Алгоритмы обеспечивают повышение ПОСШ в среднем на 5-7 дБ, а значение критерия SSIM на 20-25 %.

5. Разработаны алгоритмы комплексирования искаженных остаточным геометрическим шумом тепловизионных изображений разных участков ИК-спектра с отделением когерентных структур, обеспечивающие погрешность компенсации геометрического шума чувствительности до 2 %.

6. Разработан алгоритм вейвлет-анализа и фильтрации искаженных тепловизионных видеопоследовательностей МФП на основе ПОД с мягкой пороговой обработкой вейвлет-коэффициентов, обеспечивающие пролонгацию работы МФП в смотрящем режиме до нескольких часов.

7. Получен эвристический алгоритм вейвлет-анализа и фильтрации искаженных тепловизионных видеопоследовательностей МФП на основе ПОД, применяющий логическую обработку вейвлет-коэффициентов и характеризующийся относительно высоким быстродействием и отсутствием блочных артефактов в восстановленных кадрах видеопоследовательности.

8. Получен эвристический алгоритм вейвлет-анализа и комплексирования искаженных тепловизионных видеопоследовательностей МФП разных участков ИК-спектра на основе ПОД, применяющий логическую обработку вейвлет-коэффициентов и характеризующийся относительно высоким быстродействием и отсутствием блочных артефактов в комплексированных видеопоследовательностях.

9. Разработано и внедрено специализированное аппаратное, алгоритмическое и программное обеспечение тепловизионных систем с матричными МФП ближнего ИК-диапазона, а также учебного программного комплекса IMPROC.

10. Выполнено статистическое моделирование на тестовых и реальных тепловизионных изображениях, проведены экспериментальные исследования на аппаратно-программном комплексе обработки сигналов матричного МФП, подтвердившие правильность теоретических выводов диссертации.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. Баранцев А.А., Бехтин Ю.С., Мызин М.В. Сопряжение многоэлементных фотоприемных устройств с персональным компьютером на базе аналого-цифровых модулей ввода-вывода // Известия ТРТУ, Тематический выпуск, № 5 (60), Таганрог. Изд-во ТРТУ, 2006. С. 173-176.
2. Бехтин Ю.С., Баранцев А.А., Соляков В.Н., Медведев А.С. Аппаратно-программный комплекс цифровой обработки сигналов многорядных матричных фотоприемных устройств // Прикладная физика, № 3, 2007. С.77-82.
3. Бехтин Ю.С., Баранцев А.А., Брянцев А.А., Сагинов Л.Д., Соляков В.Н., Медведев А.С. Алгоритмы цифровой обработки ИК-изображений без калибровки по геометрическому шуму // Прикладная физика, № 1, 2008. С.110-113.
4. Баранцев А.А., Бехтин Ю.С., Брянцев А.А. Применение пространственно-ориентированных деревьев вейвлет-преобразования для комплексирования зашумленных мультиспектральных изображений // Известия ЮЗГУ, сер. «Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение», № 1, 2012. С.53-59.

Материалы конференций

5. Баранцев А.А., Бехтин Ю.С., Соляков В.Н., Медведев А.С. Компенсация дрейфа коэффициентов передачи фотоэлементов тепловизионных матриц // Тезисы 13-й МНТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций», Рязань, РГРТА, 14-16 декабря, 2004. 2 с.
6. Баранцев А.А., Бехтин Ю.С., Соляков В.Н., Медведев А.С. Построение аппаратно-программных комплексов цифровой обработки изображений фотоэлектронных модулей // Тезисы XVIII МНТК по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва, 25-28 мая, 2004. 1 с.
7. Баранцев А.А., Бехтин Ю.С. Улучшение качества изображений многоэлементных фотоприемных устройств // Цифровая обработка сигналов и ее применение // Тезисы 6-й МНТК; Москва, 31 марта - 2 апреля, 2004. С.106-108.
8. Баранцев А.А., Бехтин Ю.С. Компенсация разброса вольтовой чувствительности элементов смотрящих матриц оптико-электронных приборов при кадровой обработке видеоданных // Тезисы VII МНТК «Распознавание 2005», г. Курск, Россия, 4-7 октября 2005. 2 с.

9. Баранцев А.А. Компенсация дрейфа коэффициентов передачи фоточувствительных элементов смотрящих матриц ИК-диапазона // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций, 14-я международная научно-техническая конференция: материалы конференции, Рязань, 2005. С.113-114.
10. Баранцев А.А., Бехтин Ю.С., Соляков В.Н., Сагинов Л.Д. Методы и алгоритмы цифровой обработки ИК-изображений болометра без калибровки по геометрическому шуму // Тезисы XIX МНТК по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва, 23-26 мая, 2006. 1 с.
11. Баранцев А.А., Бехтин Ю.С. Методы и алгоритмы однокадровой оценки геометрического шума ФПУ на основе вейвлет-преобразований при нестационарных калибровочных полях // Тезисы XXI МНТК по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва, 25-28 мая 2010 г. С.222-223.
12. Баранцев А.А., Бехтин Ю.С. Алгоритмическое и программное обеспечение экспресс-оценки и повышения качества многоэлементных фотоприемных устройств на основе быстрого вейвлет-преобразования // Тезисы XXII МНТК по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва, 22-25 мая 2012 г. С.297-298.

Работы, опубликованные на английском языке

13. Bekhtin Yu., Barantsev A. Digital image enhancement for infrared photoreceivers // Digital Signal Processing and its Applications. The 6th International Conference, March, 31- April, 2, 2004, Moscow, Russia. 2 p. (тезисы)
14. 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 p. (статья)

Баранцев Александр Александрович

**АЛГОРИТМЫ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА И КОМПЕНСАЦИИ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ШУМОВ СИГНАЛОВ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ
С МАТРИЧНЫМИ ФОТОПРИЕМНИКАМИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать . Формат бумаги 60x84 1/16.
Бумага ксероксная. Печать ризографическая. Усл.печ.л. 1,0.
Тираж 100 экз.
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.