

На правах рукописи



МАЛЕБУ Дамаиу Педру

**АЛГОРИТМЫ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА И БЕСПОРОГОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ
ПРИ СПИНТ-КОДИРОВАНИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения
Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Рязань 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет» на кафедре радиоуправления и связи.

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент,
доцент Ярославского государственного
университета им. П.Г. Демидова
Приоров Андрей Леонидович

кандидат технических наук,
доцент Муромского института (филиала)
Владимирского государственного
университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых
Ракитин Алексей Валерьевич

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «МИРЭА», г. Москва

Защита диссертации состоится « 11 » июня 2015 г.
в 13 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 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 « ___ » _____ 2015 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



Г.В. Овечкин

Актуальность темы. В современных радиотехнических системах с радарными прямым и боковым обзором (радаров с синтезированной апертурой) формирование радиолокационных изображений (РЛИ) сопровождается появлением спекл-шума (*speckle*), что затрудняет качественное представление РЛИ в телевизионном стандарте. 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 передачи радиолокационных изображений с сильно развитым спекл-шумом по линиям связи с ограниченной пропускной способностью предварительная фильтрация увеличивает временные и аппаратные затраты, а сжатие изображений (с потерями) может увеличить остаточный шум. Таким образом, для согласования фильтрации и компрессии необходимо использовать общую схему обработки изображения.

Признанным эффективным подходом является вейвлет-обработка радиолокационных сигналов, где традиционно и фильтрация, и компрессия осуществляются путем порогового отсечения вейвлет-коэффициентов. Однако выбор порога не всегда оказывается удачным, что приводит к появлению артефактов звона и размытию контуров объектов на восстановленном РЛИ. В диссертационной работе даются теоретические и практические решения проблемы беспорогового вейвлет-кодирования зашумленных РЛИ на основе известного вейвлет-кодека SPIHT при фиксированной квоте битов, причем требования к визуальному (субъективному) качеству восстановленных после компрессии изображений специально не оговариваются. Тем не менее, разработанные алгоритмы обеспечивают получение восстановленных изображений относительно высокого качества, без новых артефактов и искажений по сравнению с известными методами и алгоритмами предварительной фильтрации и вейвлет-кодеков.

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.Кюафман (*Coifman*), У.Пирлман (*Pearlman*), Н.Саито (*Saito*), Дж.Шапиро (*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.

Для задач совместного сжатия и шумоподавления 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 битов. В работах О.-К.Снайх (*Al-Snaykh*), Р.Мерсеро (*Mercereau*) проведено исследование вейвлет-кодеков 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 кодеков, 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 радиолокационных изображений, искаженных мультипликативным спекл-шумом.

Теоретические аспекты вейвлет-кодирования зашумленных изображений при фиксированной квоте битов разработаны и представлены в работах Ю.С.Бехтина (Россия). В основном данные работы используют пороговую обработку вейвлет-коэффициентов, что не гарантирует качество анализа и вейвлет-кодирования РЛИ в случае, если они сформированы при действии так называемого сильно развитого спекл-шума. Кроме того, не известны результаты практического применения вышеперечисленных подходов в реальных радиотехнических системах как наземного, так и бортового базирования, а также в системах телевидения.

Цель и задачи работы. Целью диссертации является разработка алгоритмов и их программных реализаций вейвлет-анализа и беспороговой фильтрации при SPIHT-кодировании РЛИ с сильно развитым спеклом при фиксированной квоте битов, предназначенных для повышения эффективности передачи информации по каналам связи и ее хранения в радиотехнических и телевизионных системах.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи.

1. Разработка теоретических положений совмещения фильтрации и сжатия данных зашумленного изображения без использования пороговой обработки вейвлет-коэффициентов при фиксированной квоте битов.

2. Разработка алгоритмов предварительной обработки изображения и вейвлет-коэффициентов перед SPIHT-кодированием, учитывающих текстуру радиолокационных изображений и распределение вейвлет-коэффициентов по субполосам или представленных в виде пространственно-ориентированных деревьев быстрого вейвлет-преобразования.
3. Модификация алгоритма SPIHT для выбора его оптимальной рабочей точки с учетом результатов применения алгоритмов беспороговой фильтрации.

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

1. Разработаны и исследованы алгоритмы текстурно-зависимого анализа и беспороговой обработки вейвлет-коэффициентов РЛИ с развитым спеклом с использованием их локальных оценок по максимуму апостериорной плотности вероятности на основе IV типа распределения Пирсона и обобщенного распределения Гаусса перед SPIHT-кодированием.
2. Разработаны и исследованы алгоритмы бортового SPIHT-кодирования многообзорных PCA-изображений, использующие переупорядочение пространственно-ориентированных деревьев быстрого вейвлет-преобразования и обеспечивающие автоматический выбор вейвлет-базиса из сформированной библиотеки базисов и оптимальной рабочей точки.
3. Получены текстурно-зависимые SPIHT-алгоритмы сжатия изображений, сформированных с помощью радаров прямого и бокового обзоров и искаженных спекл-шумом, на основе встраивания алгоритмов беспороговой вейвлет-фильтрации.

Практическая ценность. Полученные алгоритмы вейвлет-обработки РЛИ с развитым спеклом позволяют при кодировании на заданной скорости осуществлять эффективное сглаживание спекла в смысле минимизации среднеквадратического отклонения (СКО) и максимизации пикового отношения сигнал-шум (ПОСШ), а также других критериев качества, как, например, нормализованной кросс-корреляции, индекса сходства SSIM и т.п.

Разработанные алгоритмы допускают относительно легкую модификацию и могут широко использоваться в других практических приложениях, например в задачах архивации и передачи искаженных данных по каналам связи с ограниченной пропускной способностью.

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 радиолокационных изображениях с развитым спекл-шумом.

Личный вклад автора. Все основные результаты диссертации получены автором лично и опубликованы в трех работах без соавторов и в остальных в соавторстве с д.т.н., проф. Ю.С.Бехтиным и к.т.н., доц. Брянцевым А.А.

Реализация и внедрение. Диссертационная работа включает в себя исследования, выполненные в Рязанском государственном радиотехническом университете в рамках программы подготовки иностранных специалистов.

Ряд теоретических положений вейвлет-кодирования зашумленных изображений отражены в курсах лекций по дисциплинам «Кодеки сигналов в МТКС», «Новые информационные технологии в МТКС», «Цифровая обработка сигналов в МТКС», «Цифровая обработка и анализ изображений», читаемых в Рязанском государственном радиотехническом университете и Юго-Западном государственном университете (г. Курск). Для лабораторного практикума применяется разработанный автором учебный программный комплекс IMPROC, версия 2.0, содержащий, в том числе, полученные в диссертации алгоритмы обработки зашумленных изображений на основе метода SPIHT.

Апробация работы. Материалы работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях (МНТК) Embedded Computing – MECO (Черногория, 2013, 2014), SPIE Remote Sensing (Нидерланды, 2014), Electrical Engineering FIE (Куба, 2014), «Распознавание» (г.Курск, 2013), «Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы» (АР Крым, 2013).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ на русском и английском языках, включая 7 статей, из которых 3 статьи опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, 3 статьи изданы на английском языке и индексированы в IEEE и SCOPUS. Две публикации отмечены дипломами за лучшую научную работу. Без соавторов опубликовано 2 статьи.

Структура диссертации. Диссертация общим объемом 198 с. состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения, содержит 198 с. основного текста, перечня используемой научно-технической литературы из 161 наименования на 11 с., 96 рисунков и 11 таблиц.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ:

1. Алгоритмы оценивания вейвлет-коэффициентов быстрого вейвлет-преобразования РЛИ с развитым спеклом, учитывающие текстуру изображения и использующие локальные коэффициенты вариации и IV тип распределения Пирсона и обобщенное распределение Гаусса, что приводит к отсутствию артефактов звона и размытия краев объектов на восстановленном изображении, а также к выигрышу по ПОСШ и степени сжатия по SPIHT в среднем 5-6 дБ и 0,2 – 0,4 бит/пиксель соответственно.
2. Алгоритмы беспороговой фильтрации многообзорных PCA-изображений, использующие логическую обработку вейвлет-коэффициентов пространственно-ориентированных деревьев быстрого вейвлет-преобразования и обеспечивающие автоматический выбор вейвлет-базиса из сформированной библиотеки базисов и оптимальной рабочей точки кодека SPIHT, что приводит к повышению качества восстановленного изображения на 7-9 дБ по ПОСШ и 20-45 % по индексу сходства SSIM.
3. Модифицированные алгоритмы наземной и бортовой SPIHT-компрессии РЛИ с развитым спеклом, учитывающие результаты встроенной беспороговой фильтрации и обеспечивающие функционирование в реальном масштабе времени.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается 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 методов и алгоритмов 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 РЛИ с сильно развитым спеклом 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, логнормальное 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 приравнивании незначительных 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 похожее, но не идентичное поведение вейвлет-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 алгоритмов беспороговой фильтрации при SPIHT-кодировании РЛИ с развитым спеклом при условии жесткого ограничения на квоту битов. Обоснована эффективность алгоритмов сжатия зашумленного радиолокационного изображения, если они учитывают все его текстурные особенности в рамках единого критерия или подхода. Приводится перечень применяемых в работе объективных (СКО, ПОСШ, нормализованная кросс-корреляция, индекс структурного сходства SSIM) и субъективных (артефакты звона, размытие краев объектов) критериев для оценки эффективности разработанных и известных алгоритмов.

Вторая глава посвящена разработке алгоритмов беспороговой фильтрации вейвлет-коэффициентов радиолокационного изображения с использованием текстурно-зависимого анализа при SPIHT-кодировании.

Для улучшения качества РЛИ $Y = X \cdot Z$, где Y – регистрируемое изображение, X – неизвестный оригинал, Z – мультипликативный шум с единичным средним (спекл), перед его компрессией алгоритмом SPIHT

предлагается по отдельности найти оценки в текстурных сегментах 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 . 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:

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

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. 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 $\hat{w}_Y = f(w_Y)$, $C_{W_{\max}} = \max\{\hat{C}_{W_Z}\}$; данная ситуация соответствует неоднородной текстуре;
- 2) если $\hat{C}_{W_Y} > C_{W_{\max}}$, то $\hat{w}_X = w_Y$; данная ситуация соответствует наличию точечных объектов на РЛИ;
- 3) 3) если $\hat{C}_{W_Y} \leq \hat{C}_{W_Z}$, то $\hat{w}_X = 0$; данная ситуация соответствует однородной текстуре.

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

Для получения оценок вейвлет-коэффициентов, соответствующих неоднородной текстуре, предлагается вычислять оценки вейвлет-коэффициентов по максимуму апостериорной плотности вероятности, чтобы не применять здесь традиционную пороговую обработку. Показано, что в ряде случаев для радиолокационных изображений, в частности РСА-изображений, унимодальные гистограммы вейвлет-коэффициентов в ВЧ субполосах первых уровней декомпозиции являются сильно асимметричными, а для других случаев 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 $f_X(x) = B(\beta, \sigma) \exp\{- (G(\beta, \sigma)|x|)^\beta\}$, $-\infty < x < +\infty$, $\beta > 0$, где B , G - параметры, определяемые через дисперсию σ^2 и коэффициент эксцесса β . Оценка \hat{w}_X находится через численное решение уравнения $\beta \Xi G_\Xi |w_Y - w_X|^{\beta \Xi - 1} + \beta_X G_X |w_X|^{\beta_X - 1} = 0$, 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 $\kappa_{n,W_X} = K_n^{[j]} \kappa_{n,X}$.

Для выбора соответствующего закона распределения используются оценки коэффициентов асимметрии, вычисляемые по гистограммам вейвлет-коэффициентов в каждой субполосе декомпозиции и сравниваемые с некоторым заданным порогом.

На основе статистических моделей спекла (экспоненциальное распределение и гамма-распределение) была модифицирована методика текстурного анализа на уровне вейвлет-преобразования. Получены выражения для первых четырех центральных моментов вейвлет-коэффициентов, которые зависят от μ_X и $K_n^{[j]}$. В результате оценки вейвлет-коэффициентов в участках с неоднородной текстурой вычисляются относительно быстро при использовании IV типа распределения Пирсона.

Особенностью модификации алгоритма SPIHT 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 беспороговой текстурной обработки на уровне вейвлет-преобразования в смысле минимума СКО и максимума ПОСШ, а также по индексу сходства

SSIM. Исходное и обработанное PCA-изображения показаны на рисунках 1 и 2 соответственно. Аналогичные результаты получены для изображений от РЛС прямого обзора.

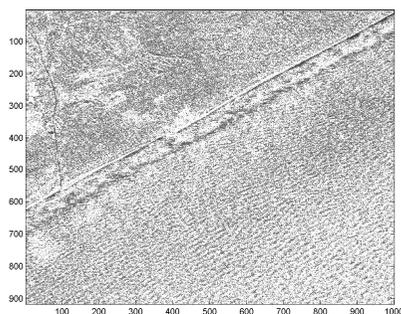


Рисунок 1. Оригинальное PCA-изображение со спекл-шумом, 8 бит/пиксель

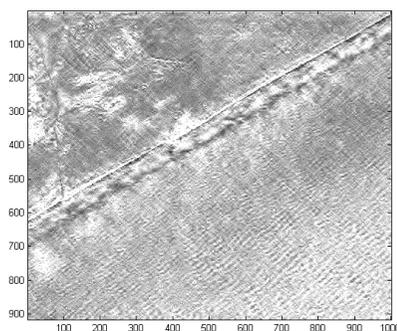


Рисунок 2. Обработанное PCA-изображение, вейвлет CDF 9.7, три уровня БВП, 0,2 бит/пиксель

В третьей главе рассматриваются алгоритмы бортовой беспороговой вейвлет-фильтрации и SPIHT-компрессии изображений, полученных с помощью радаров с синтезированной апертурой, на основе пространственно-ориентированных деревьев быстрого вейвлет-преобразования.

Формирование многообзорных PCA-изображений на борту летательного аппарата традиционно осуществляется усреднением промежуточных кадров, содержащих одну и ту же сцену. В случае сильно развитого спекла такая операция приводит к росту как пространственной, так и радиометрической погрешностей в процессе компрессии. Основная идея заключается в том, чтобы заменить усреднение промежуточных кадров их комплексированием. Показано, что традиционные методы и алгоритмы вейвлет-комплексирования (в частности, правило отбора максимального вейвлет-коэффициента), не работают в случае зашумленных изображений. С другой стороны, пороговая обработка вейвлет-коэффициентов, подавляя спекл, привносит артефакты звона и размытие краев объектов. В работе предлагается заменить пороговую обработку логической обработкой вейвлет-коэффициентов, которые представлены в виде пространственно-ориентированных деревьев (ПОД) быстрого вейвлет-преобразования, что выполняется в ходе SPIHT-кодирования.

Вейвлет-коэффициенты верхнего уровня декомпозиции (аппроксимация) обрабатываются усреднением, а из вейвлет-коэффициентов нижних уровней промежуточных изображений (детали)

синтезируется ПОД с вейвлет-коэффициентами, имеющих минимальную амплитуду. Это делается с помощью логической операции сравнения.

Таким образом, после обработки ПОД промежуточных кадров имеется новый набор ПОД для референсного (опорного) изображения. Если оценить дисперсию остаточного спекла в опорном изображении, то возможно выбрать соответствующее значение скорости передачи (ООР) для кодирования SPIHT. Для простоты вычислений дисперсии используется известное правило $\sigma_z^2 = 0.645 \text{ Median}(\text{HH}_1)$, которое вычисляет среднее значение вейвлет-коэффициентов в субполосе HH_1 второго уровня БВП. Таким образом, не требуется восстанавливать первоначальное изображение в полном объеме, что уменьшает количество необходимых вычислений. Полученное значение дисперсии

σ_z^2 остаточного спекла служит для выбора соответствующего значения скорости передачи данных BR в специальной таблице. Эта таблица была сформирована после имитационного моделирования, в котором использовались наборы тестовых изображений, искаженных спеклом с различными значениями дисперсий. Таблица содержит значения скоростей передачи данных (ООР) и количество уровней БВП, которые соответствуют различным интенсивностям спекла. Таким образом, после выбора ООР алгоритм SPIHT формирует выходной поток битов для данного канала передачи данных. Если выбранное значение BR больше допустимой скорости передачи канала (что случается относительно редко), то скорость передачи SPIHT уменьшается до допустимого значения. В этом случае нельзя ожидать заявленного высокого качества восстановленного после компрессии PCA-изображения.

Последовательность шагов алгоритма может быть записана следующим образом.

1. Выполнить БВП промежуточных PCA-кадров с заданным числом уровней (не менее трех), используя один из вейвлет-базисов.
2. Преобразовать массивы вейвлет-коэффициентов в виде наборов векторов ПОД:

$$\text{ПОД}^i(j, k), i=1 \dots L, 1 \leq j \leq N, 1 \leq k \leq K,$$

где L – число кадров, N – количество ПОД, K – число вейвлет-коэффициентов в ПОД; Например, если изображение имеет размер 512×512 , то $N=4096$, $K=64$ для $Q=3$.

3. Создать вектор, содержащий первые вейвлет-коэффициенты для всех ПОД:

$$P = \max_i \{ \text{ПОД}^i(j, 1) \}, 1 \leq j \leq N, i=1, \dots, L.$$

4. Нормализовать вейвлет-коэффициенты для всех ПОД.
5. Выполнить усреднение вейвлет-коэффициентов ПОД, принадлежащих верхнему уровню декомпозиции. Например, для случая

трехуровневого вейвлет-преобразования это будут первые четыре коэффициента ПОД.

6. Выбрать минимальные вейвлет-коэффициенты среди всех коэффициентов, принадлежащих к разным ПОД, для соответствующего кадра путем логического сравнения.

7. Создать новые ПОД, используя найденные вейвлет-коэффициенты (шаги 5 и 6).

8. Выполнить денормализацию, то есть умножить все выбранные значения вейвлет-коэффициентов ПОД на вектор P (шаг 3).

9. Выполнить обратное преобразование полученных ПОД в массивы вейвлет-коэффициентов, соответствующих поддиапазону HH_1 .

10. Вычислить оценку дисперсии σ_z^2 остаточного спекла в опорном изображении.

11. Найти значение скорости передачи, соответствующей дисперсии остаточного спекла, в специальной таблице.

12. Завершить выполнение алгоритма SPIHT, используя сформированные ПОД (шаги 7 и 8).

Алгоритм допускает некоторое усложнение, если включить процедуру отбора вейвлет-базиса из имеющейся библиотеки вейвлет-базисов. Дело в том, что различные типы вейвлетов (базисы) распределяют энергию входного изображения различными способами; следовательно, задача выбора подходящего вейвлет-базиса должна быть решена, так как различия между распределениями энергии важны при действии спекл-шума. Отбор вейвлет-базиса производится по функции стоимости Шура

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

где $w_{Y_i}^{(l)}$ - вейвлет-коэффициенты, рассчитанные для базиса β_l , $i=1, \dots, I$, $l=1, \dots, L$, здесь I - количество пикселей (вейвлет-коэффициентов), определяемое размерами изображения; $\sigma^2 = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I w_{Y_i}^2$ - дисперсия, рассчитанная для всех вейвлет-коэффициентов. После логической обработки, описанной выше, оценки вейвлет-коэффициентов \hat{w}_{X_i} в соответствии с моделью $Y = X \cdot Z$ дают новое значение функции стоимости:

$$C^* = \sum_{i=1}^I \Phi\left(\frac{1}{\sigma^2 I} |\hat{w}_{X_i}|^2\right).$$

Наилучший базис β_{opt} минимизирует разность между значением функции стоимости, рассчитанным для какого-либо вейвлет-базиса, и полученным значением C^* , откуда следует

$$\beta_{opt} = \arg \min |C(\beta_l) - C^*|.$$

Последовательность шагов формирования выходного ПОД повторяется для каждого вейвлет-базиса. В качестве функции стоимости в работе используется энтропия $\Phi(u) = -u \ln u$, $u \geq 0$. Учитывая ПОД в качестве когерентных структур, функция стоимости показывает, какой из вейвлет-базисов приносит максимальную энтропию.

В результате использования данного алгоритма формируется поток битов, который подается в линию связи. При этом распределение имеющейся квоты битов происходит по стандартам алгоритма SPIHT. Очевидно, что в случае зашумленных данных алгоритм SPIHT на финальной стадии использует нулевую зону, что равносильно грубой пороговой обработке вейвлет-коэффициентов. Таким образом, вероятно появление артефактов звона в восстановленном PCA-изображении, снижающие эффект от предварительного переупорядочения ПОД, из-за ошибок квантования, появляющихся на стадии кодирования. Следовательно, необходимо рассмотреть вопрос о снижении ошибок квантования при SPIHT-кодировании опорного PCA-изображения.

В связи с этим, в работе применяется следующая методика расчета уровней квантования. Интервалы равномерного квантования, которые откладываются, начиная с порогового уровня $\tau^{[j]}$, $j=1, \dots, J$, определяют 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 $t_{L/2} = 1$, здесь $M^{(j)}$ - количество значимых вейвлет-коэффициентов, которые не попали в нулевую зону. 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:

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

Отмечается, что расчет уровней квантования остается таким же и для вейвлет-коэффициентов НЧ субполосы (аппроксимации), при этом $t_0 = I^{(j)}$, то есть совпадает с числом вейвлет-коэффициентов в j -й субполосе.

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.

Результаты исследования и имитационного моделирования показали, что предложенный алгоритм обработки может работать в реальном масштабе времени по следующим причинам: во-первых, формирование ПОД является неотъемлемой частью алгоритма SPIHT, при этом не требуется восстановление всего исходного изображения, а только один поддиапазон для оценки дисперсии остаточного спекла, чтобы выбрать оптимальную рабочую точку ООР из встроеной таблицы; во-вторых, достаточно использовать три уровня БВП для SPIHT и трех промежуточных кадров (фреймов) для получения PCA-изображения с относительно высоким качеством (рисунки 3 и 4).

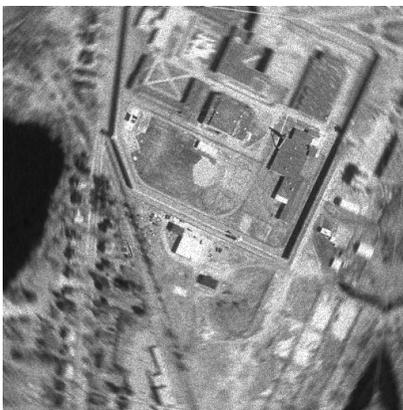


Рисунок 3. Смоделированное PCA-изображение (512×512), содержащее спекл и геометрические искажения из-за отклонений от траектории полета и нестабильности ориентации антенны

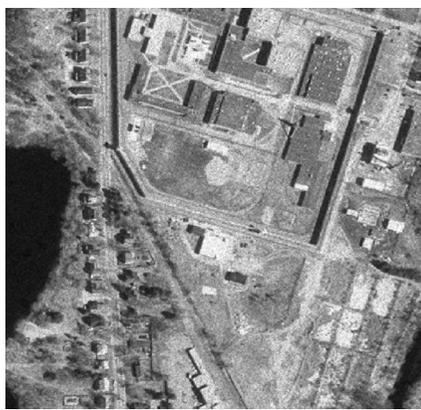


Рисунок 4. Восстановленное PCA-изображение после компрессии предложенным алгоритмом; ООР - 0,23 бит/пиксель.

Четвертая глава посвящена практической реализации полученных алгоритмов вейвлет-анализа и обработки зашумленных изображений.

Разработана новая, вторая версия программного комплекса моделирования и обработки зашумленных изображений IMPROC, который кроме известных алгоритмов обработки фильтрации и компрессии включает разработанные в диссертации алгоритмы вейвлет-кодирования зашумленных изображений.

Комплекс обладает следующими основными характеристиками:

- возможность загрузки нескольких обрабатываемых изображений;
- возможность сохранения результата обработки;
- конфигурирование топологии соединения блоков обработки изображений и вычисления статистических характеристик;
- возможность создания «масок» для предотвращения модификации выбранных коэффициентов;
- поддержка областей, представляющих интерес (region-of-interest);
- вычисление коэффициентов вариации как в пространственной области, так и в области вейвлет-трансформанты;
- выполнение классификации текстур с использованием коэффициентов вариации;
- применение алгоритма SPIHT, в том числе ряд его модификаций, полученных автором и изложенных в главах 2 и 3;
- применение БВП и пакетного вейвлет-разложения;
- выполнение вейвлет-преобразования (виды используемых вейвлетов: db4, bior4.4, CDF9.7, sym4, coif3 и др.);
- выполнение обратного вейвлет-преобразования;
- логарифмирование изображения;
- потенцирование изображения;
- моделирование искажающих воздействий (speckle, gaussian);
- аффинные преобразования изображения;
- формирование модулей на языке описания аппаратуры Verilog.

Для формирования графического интерфейса пользователя используется библиотека GTK-2. Построение графиков выполняется с использованием программного обеспечения GnuPlot. Отображение изображений осуществляется с использованием приложения ImageMagick.

Комплекс построен на основе кросс-платформенных библиотек GLIB и GTK+. GLIB представляет собой относительно небольшую библиотеку базовых функций обработки данных и обеспечивает импорт/экспорт потоков, загрузку динамических библиотек.

Программный комплекс IMPROC ver.2.0 отличается дружелюбным и интуитивно-понятным интерфейсом, стабильностью работы для операционных систем Windows XP, Windows 7 (32 и 64 bit), Windows 8.1

(64 bit). Программный комплекс IMPROC ver.2.0 содержит интерфейс для подключения к лабораторным стендам на ПЛИС, расширяющим области его применения в соответствующих учебных курсах, лабораторных практикумах и научных исследованиях.

В приложениях приведены: акты внедрения результатов работы, копии дипломов о признании лучшими двух публикаций.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации решена научно-техническая задача разработки эффективных алгоритмов компрессии зашумленных радиолокационных 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 алгоритмов вейвлет-кодирования зашумленных изображений при фиксированной квоте бит.
2. Разработаны алгоритмы комбинированной обработки РЛИ со спеклом на основе текстурного анализа с помощью коэффициентов вариации, а также методика выбора оптимальной рабочей точки (скорости кодирования) кодека SPIHT, обеспечивающие повышение ПОСШ на 3-5 дБ.
3. Разработаны алгоритмы предварительной текстурно-зависимой субполосной беспороговой фильтрации вейвлет-декомпозированного изображения на основе анализа коэффициентов вариации. Алгоритмы работают в реальном масштабе времени и обеспечивают:
 - обнуление вейвлет-коэффициентов ВЧ субполос, принадлежащих однородным 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;
 - отсутствие артефактов звона и краевых искажений объектов на изображениях.
4. Разработана модификация SPIHT-алгоритма для субполосного текстурно-зависимого вейвлет-кодирования изображений, полученных от РЛС прямого и бокового обзоров, которая обеспечивает эффективное сжатие и подавление спекл-шума при анализе межуровневых связей типа «родитель – потомки». Выигрыши по ПОСШ и степени сжатия составляют в среднем 5-6 дБ и 0,2 – 0,4 бит/пиксель соответственно.

5. Разработаны алгоритмы анализа, комплексирования и SPIHT-кодирования промежуточных кадров (обзоров) PCA, основанные на замене традиционной пороговой обработки вейвлет-коэффициентов логическими процедурами переупорядочивания пространственно-ориентированных деревьев БВП. При этом обеспечивается полное отсутствие артефактов звона и размытия краев объектов и повышение качества восстановленного изображения на 7-9 дБ по ПОСШ и 20-45 % по индексу сходства SSIM.
6. Разработаны методики расчета уровней квантования для квантователей с равномерным квантованием, не требующих знания вида плотности вероятности значимых вейвлет-коэффициентов в пределах субполосы.
7. Разработано и внедрено в учебный процесс специализированное алгоритмическое и программное обеспечение учебного программного комплекса моделирования и обработки зашумленных изображений IMPROC ver 2.0, подключаемого к лабораторным стендам на ПЛИС.
8. Выполнено статистическое моделирование на тестовых и реальных радиолокационных изображениях, проведены экспериментальные исследования с помощью разработанного программного комплекса моделирования и обработки зашумленных изображений IMPROC ver 2.0, подтвердившие правильность теоретических выводов диссертации.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. Бехтин Ю.С., Брянцев А.А., Малебу Д.П. Беспороговая вейвлет-фильтрация спекл-шума в PCA-изображениях. Успехи современной радиоэлектроники, № 6, 2014. С.45-52.
2. Бехтин Ю.С., Малебу Д.П. Компрессия радиолокационных изображений на основе субполосного текстурного вейвлет-анализа. Телекоммуникации, № 1, 2014. С. 13-18.
3. Малебу Д.П. Повышение пропускной способности магистральной сети связи Республики Ангола на основе DWDM. Вестник РГРТУ. ISSN 1995-4565. № 4 (выпуск 46). Часть 1. Рязань, 2013. С.134-138.

Материалы конференций

4. Бехтин Ю.С., Малебу Д.П. Текстурно-зависимая обработка и компрессия радиолокационных изображений на основе вейвлет-преобразования. Сборник материалов XI МНТК «Распознавание – 2013», ЮЗГУ, г. Курск, 17-20 сентября 2013 г. С. 21 – 23.
5. Бехтин Ю.С., Брянцев А.А., Малебу Д.П. Фильтрация зашумленных видеопоследовательностей на основе беспороговой вейвлет-обработки. Материалы МНТК «Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы. ИИ-2013», ИПИИ НАН Украины, пос. Кацивели, АР Крым, 23-27 сентября 2013 г. С.44-45.

6. Малёбу Д.П. Транспортные радиорелейные линии города Луанда национальной сотовой сети связи. 59-я Студенческая научно-техническая конференция Рязанского государственного радиотехнического университета, Рязань, 2012. С. 3-4.

Работы, опубликованные на иностранных языках

7. Bekhtin Yu., Bryantsev A., Malebo D., and Lupachev A. Non-destructive wavelet-based despeckling in SAR images. Proceedings of SPIE Conference on Remote Sensing: SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques, XI, Vol. 8179, 81790T, P.13. Amsterdam, Netherlands, September, 22-24, 2014.
8. Bekhtin Yu., Malebo D. Combined Textural-Dependent Despeckling in SAR Images. Proceedings of 3rd Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Budva, Montenegro, 15 -19 June, 2014, pp.131-134.
9. Malebo D. Escolha Eficaz de Codec Wavelet-base para a Transmissão de Imagens Distorcidas em Redes de Telecomunicações. VII International Conference on Electrical Engineering FIE 2014, Santiago de Cuba, 23-27 June 2014.
10. Bekhtin Yu., Bryantsev A., Malebo D. Wavelet-based fusion of noisy multispectral images using Spatial Oriented Trees. Proceedings of 2nd Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), 2013, Budva, Montenegro, 15-20 June 2013, pp. 113 – 116, DOI 10.1109/MECO.2013.6601332.

МАЛЕБУ Дамиау Педру

АЛГОРИТМЫ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА И БЕСПОРОГОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ
ПРИ СПИНТ-КОДИРОВАНИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

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.
Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ .
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.