

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 004.932

РУИС ЭЧЕНАГУСИА
Луис Альфонсо

**АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ДИСКРЕТНОГО
ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации

Минск 2014

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель

Борискевич Анатолий Антонович, кандидат технических наук, доцент, учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», доцент кафедры сетей и устройств телекоммуникаций

Официальные оппоненты:

Старовойтов Валерий Васильевич, доктор технических наук, профессор, Государственное научное учреждение «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси», главный научный сотрудник

Хейдоров Игорь Эдуардович, кандидат физико-математических наук, Белорусский государственный университет, доцент кафедры радиофизики и цифровых медиатехнологий

Оппонирующая организация

Белорусский национальный технический университет

Защита состоится 10 апреля 2014 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.01 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail dissovet@bsuir.by.

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Эффективность современных систем цифровой обработки информации, широко используемых в таких областях, как топография, картография, медицина, видеонаблюдения, аэрофотография, метеорология и защита информации зависит от выбора формы представления информации и методов ее обработки. В настоящее время для повышения их характеристик эффективности используется дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) на основе лифтинг-схемы, которая по сравнению с ДВП на основе банка фильтров обеспечивает низкую вычислительную сложность и возможность адаптации к информации. Существует ряд проблем применения лифтинг-схемы: зависимость ее эффективности от четности размера анализируемого сигнала, динамический диапазон вейвлет-коэффициентов зависит от параметров лифтинг-операций и эффективность адаптивности вычисления ДЛВП за счет учета локальных особенностей информации. Таким образом, тема диссертационной работы является актуальной, определяет цель и задачи исследований.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами

Исследования проводились на кафедре сетей и устройств телекоммуникаций учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в рамках научно-исследовательских госбюджетных тем: 1) ГБ 06-2033 «Разработка методов обработки, передачи и распределения мультимедийной информации» (этап «Разработать и исследовать высокоскоростные методы передачи мультимедийной информации по различным каналам связи») (2006–2010 гг., № ГР 200797); 2) ГБ 11-2033 «Разработка и исследование методов и технологий построения мультисервесных локальных мобильных сетей» (2011–2015 гг., № ГР 20121437).

Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка методики анализа и синтеза алгоритмов адаптивного дискретного вейвлет-преобразования (ДЛВП), обеспечивающих улучшение частотно-пространственных и/или частотно-временных характеристик эффективности вейвлет-преобразования с учетом ограничений в системах обработки информации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ свойств основных дискретных преобразований, используемых в цифровой обработке изображений;

- разработать методику оценки частотно-пространственных свойств дискретного вейвлет-преобразования;
- разработать эффективные алгоритмы вычисления дискретного вейвлет-преобразования без адаптации к информации;
- разработать алгоритмы дискретного вейвлет-преобразования с адаптацией к локальным особенностям информации;
- осуществить программные реализации разработанных алгоритмов и исследовать их характеристики эффективности для систем обработки изображений.

Объектами исследования являются системы обработки изображений.

Предметом исследования являются дискретные вейвлет-преобразования для сжатия изображений.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика анализа и оценки частотно-пространственных свойств дискретного вейвлет-преобразования, основанная на выявлении взаимосвязи между параметрами и расположением элементов структуры лифтинг-схемы с помощью рекурсивного вычисления характеристик эффективности ДВП, что позволяет определить оптимальную структуру лифтинг-схемы с учетом ограничений в системах обработки информации.

2. Алгоритм вычисления адаптивного обобщенного вейвлет-преобразования с первичным предсказанием и без дополнительной информации об адаптации, основанный на объединении арифметических операций, оператора обновления и функции принятия решения, и адаптации операции обновления в вейвлет-области по критерию минимизации локального взвешенного среднего детализирующих вейвлет-коэффициентов, что обеспечивает повышение точности вычисления аппроксимационных вейвлет-коэффициентов по сравнению с Хаара, Биор5/3, Биор7/5 и Биор9/7 вейвлет-функциями без адаптации на 0,4, 3, 34 и 57,3 соответственно, без увеличения длины кодового слова исходного изображения в зависимости от количества уровней вейвлет-разложения.

3. Алгоритм вычисления адаптивного вейвлет-преобразования с первичным обновлением первого порядка, основанный на адаптивном выборе порядка предсказания высокочастотных вейвлет-коэффициентов и формировании дополнительной информации об адаптации, что обеспечивает увеличение концентрации энергии изображения по сравнению с вейвлет-функциями Хаара, Биор5/3 и Биор9/7 без адаптации в 5, 4 и 2 раза соответственно, без увеличения динамического диапазона исходного изображения и уменьшение в 3 раза вычислительной сложности по сравнению с вейвлет-функцией Биор9/7.

4. Алгоритм вычисления адаптивного дискретного вейвлет-преобразования с первичным обновлением и учетом перцептуальной значимости отсчетов, основанный на адаптивном предсказании детализирующих вейвлет-коэффициентов

по критерию оптимизации распределения ошибки квантования исходного изображения, что обеспечивает уменьшение вычислительной сложности в 7 раз по сравнению с вейвлет-функцией Биор9/7, увеличение концентрации энергии изображения по сравнению с вейвлет-функциями Хаара, Биор5/3 и Биор9/7 без адаптации в 7, 6 и 3 раза при сохранении динамического диапазона исходного изображения и почти идеальном восстановлении.

Личный вклад соискателя

Основные результаты диссертации получены автором самостоятельно. В публикациях с соавторами вклад соискателя определяется рамками изложенных в диссертации результатов. Соавтором основных публикаций является научный руководитель, канд. техн. наук А.А. Борискевич, вклад которого связан с определением цели и задач исследований, выбором методов исследований, интерпретацией и обобщением результатов.

Апробация результатов диссертации

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: International scientific and technical conference "Prospects of development of modern information and communication technologies" (Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan, 2011); 5-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения (БелИСА, Минск, Беларусь, 2011 г.); XI Белорусско-российская научно-техническая конференция «Технические средства защиты информации» (БГУИР, Минск, Беларусь, 2013 г.); Международный научно-технический семинар «Телекоммуникации: Сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных» (БГУИР, Минск, Беларусь, 2011, 2012 гг.).

Опубликованность результатов диссертации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 12 печатных работ, в том числе 5 статей в научных рецензируемых журналах общим объемом 2,5 авторских листа; 6 статей и тезисы в сборниках и материалах конференций. Подана заявка на получение 1 патента.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложения. Общий объем диссертационной работы составляет 139

страниц, из них 91 страница текста, 68 рисунков на 23 страницах, 28 таблиц на 9 страницах, 2 приложения на 10 страницах, библиография из 80 источников на 6 страницах, включая 12 публикаций автора и положительное решение на выдачу патента на 2 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** и в общей характеристике работы обоснована актуальность темы диссертации, рассмотрены основные направления исследований, показана необходимость проведения исследований адаптивных дискретных вейвлет-преобразований для улучшения частотно-пространственных и временных свойств вейвлет-преобразований в системах фильтрации, распознавания, сжатия и синтеза одномерных и двумерных сигналов, поставлены задачи исследований и приведены методы их решения.

В **первой главе** проведен анализ свойств основных дискретных ортогональных преобразований, используемых в цифровой обработке изображений.

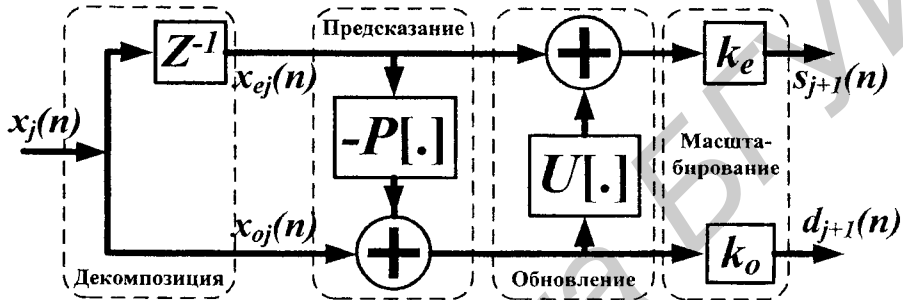
Проведен анализ систем цифровой обработки изображений для решения задач фильтрации, обнаружения, распознавания, кодирования, сжатия на основе дискретного вейвлет-преобразования.

Проведен сравнительный анализ свойств следующих дискретных ортогональных преобразований: Карунена–Лозва преобразования (КЛП), дискретного преобразования Фурье (ДПФ), дискретного косинусного преобразования (ДКП) и дискретного вейвлет-преобразования на основе банка фильтров (ДВПБФ). По сравнению с другими основными дискретными ортогональными преобразованиями, ДВПБФ является сепарабельным преобразованием, с хорошей пространственно-частотной локализацией и высокой многомасштабированной характеристикой концентрации энергии. Показано, что ДВПБФ характеризуется высокой вычислительной сложностью, отсутствием возможности адаптации к особенностям исходной информации и требует значительного объема используемой памяти по сравнению с ДПФ и ДКП.

Для устранения недостатков ДВПБФ используется лифтинг-схема, основанная на следующих основных лифтинг-операциях на j -м уровне вейвлет-разложения (рисунок 1): декомпозиции исходного сигнала $x_j(n)$ на четные $x_{e_j}(n)$ и нечетные $x_{o_j}(n)$ отсчеты, предсказании, обновлении и масштабировании коэффициентами k_e и k_o низкочастотных $s_{j+1}(n)$ и высокочастотных $d_{j+1}(n)$ вейвлет-коэффициентов соответственно.

ДЛВП обладает низкой вычислительной сложностью, малым объемом используемой памяти и возможностью адаптации параметров лифтинг-схемы к особенностям (яркостным, контрастным, граничным условиям) исходного изображения.

Установлены проблемы, возникающие при вычислении ДЛВП. Эффективность выполнения лифтинг-операции декомпозиции зависит от четности количества отсчетов исходного сигнала. На эффективность предсказания влияют порядок предсказателя и степень локальной гладкости анализируемого сигнала. Динамический диапазон вейвлет-коэффициентов и их отклонения от исходных значений зависит от выбора параметров лифтинг-операций обновления и масштабирования при многомасштабном вычислении вейвлет-преобразования из-за свойства накопления и повторяемости данных лифтинг-операций.



Z^{-1} – элемент задержки; $P[.]$ и $U[.]$ – операторы предсказания и обновления

Рисунок 1 – Блок-схема основных лифтинг-операций ДВП

Проанализированы параметры стандартных биортогональных *Cohen-Daubechies-Feauveau (CDF)* вейвлет-функций: Хаара (*CDF 2/2*), Биор5/3 (*CDF 5/3*) и Биор9/7 (*CDF 9/7*).

Для выявления особенности аппаратной реализации ДЛВП и выработки рекомендаций по их применению с учетом приложений цифровой обработки информации приведена классификация и анализ следующих архитектур аппаратных средств реализации одномерного ДЛВП: архитектуры прямого отображения, архитектуры складывания, программируемой архитектуры на основе МАС, флиппинг-архитектуры, универсальной архитектуры, рекурсивной архитектуры, архитектуры с двойным сканированием и архитектуры на основе МАС- μ P.

Во второй главе рассматриваются методика оценки эффективности параметров лифтинг-схемы и методы улучшения ДЛВП на ее основе.

Для оценки частотно-пространственных свойств ДЛВП предложена методика, позволяющая определить оптимальную структуру лифтинг-схемы с учетом ограничений в системах обработки информации. Данная методика основана на выявлении взаимосвязи между параметрами и расположением элементов структуры лифтинг-схемы с помощью рекурсивного вычисления характеристик эффективности ДВП. Данная методика позволяет улучшить характеристики стандартных и синтезировать новые алгоритмы дискретного вейвлет-преобразования для частотно-

пространственных критериев (точности аппроксимации информации, степени концентрации энергии).

С помощью разработанной методики осуществляется выбор основных параметров элементов структуры лифтинг-схемы:

1. Соотношение частотно-временной неопределенности вейвлет-функций. Данный параметр характеризует частотную и временную локализацию исходного сигнала в вейвлет-области. Установлено, что существует нелинейная зависимость между оценкой степени частотно-пространственной локализации вейвлет-функций и уровнем вейвлет-разложения i_n , т.е. с увеличением уровня декомпозиции ухудшается их локализация в частотно-пространственной области (таблица 1).

Таблица 1 – Частотно-временная локализация вейвлет-функций

Вейвлет-функции	Локализация энергии вейвлет-функций										
	$i_n=1$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Хаара (Биор1.1)	НЧ	0,00	3,17	4,62	6,62	9,40	13,31	18,83	26,64	37,67	53,28
	ВЧ	0,00	2,33	2,84	3,88	5,45	7,69	10,87	15,38	21,75	30,76
Биор2/6 (Биор 1.3)	НЧ	2,70	3,80	4,11	4,24	4,32	4,36	4,39	4,41	4,42	4,42
	ВЧ	1,13	1,31	1,39	1,43	1,45	1,46	1,47	1,47	1,47	1,47
Биор2/10 (Биор 1.5)	НЧ	3,25	4,32	4,38	4,39	4,40	4,40	4,40	4,40	4,40	4,40
	ВЧ	1,13	1,25	1,28	1,29	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30
Биор 5/3 (Биор2.2)	НЧ	2,51	3,44	4,83	6,84	9,92	14,46	21,21	31,16	45,84	67,48
	ВЧ	1,02	1,51	2,22	3,31	4,91	7,28	10,75	15,87	23,40	34,50
Биор 2.4	НЧ	3,16	3,99	4,35	4,73	5,06	5,33	5,54	5,70	5,83	5,92
	ВЧ	1,02	1,16	1,29	1,38	1,46	1,52	1,56	1,59	1,62	1,64
Биор 9/7 (Биор4.4)	НЧ	2,94	3,84	4,21	4,42	4,50	4,54	4,56	4,57	4,57	4,58
	ВЧ	1,21	1,27	1,30	1,31	1,32	1,32	1,32	1,33	1,33	1,33

2. Коэффициенты лифтинг-операторов предсказания $p^{ls}(l)$, обновления $u^{ls}(l)$ и масштабирования (K_P, K_U) для достижения компромисса между быстрым действием и частотно-пространственными характеристиками ДЛВП.

3. Степень гладкости и количество нулевых моментов вейвлет-функций позволяют анализировать особенности мелкомасштабной структуры сигнала и/или его медленно изменяющиеся составляющие.

4. Расширения на границах сигнала. Для повышения точности вычисления ДЛВП оптимальным способом расширения анализируемой последовательности является симметричное расширение, так как оно не вызывает резких перепадов значений элементов на границах и приводит к сглаживанию или обнулению высокочастотных вейвлет-коэффициентов при выполнении лифтинг-операции предсказания.

В зависимости от частотно-пространственных критериев (точности аппроксимации информации или степени концентрации энергии) осуществляется выбор расположения параметров элементов лифтинг-схемы из двух вариантов: с первичным предсказанием или с первичным обновлением. После предварительного

определения расположения и выбора параметров элементов лифтинг-схемы осуществляется рекурсивное вычисление характеристик эффективности ДЛВП:

1. Динамический диапазон и длина кодового слова. Определено, что динамический диапазон и длина кодового слова увеличиваются в зависимости от количества уровней разложения при многомасштабном вычислении вейвлет-преобразования.

2. Оценка соотношения энергия/количество нулей основана на вычислении распределения энергии между вейвлет-коэффициентами, характеризующего взаимосвязь между количеством нулевых вейвлет-коэффициентов и энергией ненулевых вейвлет-коэффициентов.

3. Для оценки степени концентрации энергии в вейвлет-области используется коэффициент выигрыша кодирования с преобразованием, основанный на вычислении соотношения между средним арифметическим $AM(\sigma_i^2)$ и средним геометрическим $GM(\sigma_i^2)$ значений дисперсии вейвлет-коэффициентов σ_i^2 :

$$G_{TC} = \frac{AM(\sigma_i^2)}{GM(\sigma_i^2)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 / \left(\prod_{i=1}^N \sigma_i^2 \right)^{1/N}, \quad (1)$$

где N – количество поддиапазонов вейвлет-коэффициентов; i – индекс поддиапазонов вейвлет-коэффициентов.

4. Для качества аппроксимации исходного изображения предлагается использовать степень сходства гистограмм исходного изображения h_o и низкочастотного поддиапазона h_{LL} вейвлет-преобразования:

$$A_h = \frac{1}{N_h} \sum_n |h_o(n) - h_{LL}(n)|, \quad (2)$$

где N_h – количество значений гистограмм.

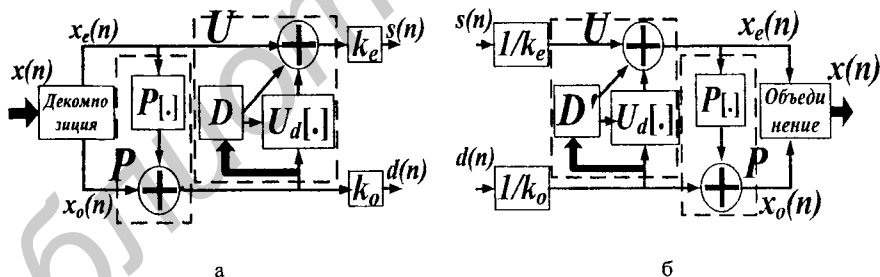
Приведен сравнительный анализ лифтинг-архитектур аппаратной реализации ДЛВП с помощью предложенного подхода к оценке эффективности характеристик архитектур, основанного на оценке объема памяти промежуточных низкочастотных вейвлет-коэффициентов, количества элементов вычислительного устройства, количества тактов, времени критического пути, сложности управления процессом вычисления, гибкости для реализации множества вейвлет-функций и коэффициент полезного действия (КПД) аппаратных средств на первом такте вычислений с учетом свойств и параметров вейвлет-преобразования.

В результате сравнительного анализа лифтинг-архитектур аппаратной реализации ДЛВП предложена обобщенная структура основных связей между их базовыми элементами низкого, среднего и высокого уровней, позволяющая выявить новые направления развития и совершенствования архитектуры.

На основе предложенной методики разработаны модифицированные алгоритмы вычисления одномерного ДЛВП Биор7/5, двумерного гибридного ДЛВП Биор9/7-Хаар и бинарного ДЛВП:

- алгоритм вычисления ДЛВП Биор7/5, основанный на модификации параметров лифтинг-операторов с рациональными коэффициентами, что позволяет уменьшить вычислительную сложность в 2 раза и превзойти Биор5/3 по характеристикам эффективности (степени концентрации энергии, гладкости). Алгоритм вычисления двумерного гибридного ДЛВП Биор9/7-Хаар, основанный на использовании биортогональных вейвлет-функций Биор9/7 для неограниченных исходных значений и Хаара на граничных значениях, что позволяет не использовать методы расширения границ, сократить объем буферизируемых промежуточных вейвлет-коэффициентов и ускорить вычисление преобразования, кроме того, увеличивает значение GTC на 30 % больше, чем для ДЛВП Биор9/7. Исключение операции расширения границ позволяет избежать накопления ошибок квантования, что приводит к повышению точности вычисления низкочастотных вейвлет-коэффициентов и снижению ошибок восстановления в режиме сжатия с потерями;

- алгоритм вычисления бинарного дискретного вейвлет-преобразования на основе лифтинг-схемы (БДЛВП), обеспечивающий низкую вычислительную сложность, низкий объем бинарных промежуточных данных, отсутствие эффектов и ошибок квантования, а также отсутствие изменения исходного динамического диапазона изображений в вейвлет-области. Алгоритм БДЛВП улучшает качество аппроксимации исходного изображения по сравнению с алгоритмами ДЛВП Хаара, Биор5/3, Биор7/5 и Биор9/7 на всех уровнях вейвлет-разложения.



а – прямое преобразование; б – обратное преобразование
Рисунок 2 – АОЛВП с адаптацией модуля отображения-обновления

В третьей главе исследованы предложенные методы адаптации ДЛВП, основанные на анализе результатов локальной предварительной обработки информации для повышения точности вычисления и улучшение частотно-пространственных и временных свойств вейвлет-преобразований.

Предложен алгоритм вычисления адаптивного обобщенного вейвлет-преобразования (АОЛВП) с модулем первичного отображения-предсказания P

(рисунок 2), основанный на адаптивном операторе ${}^O U_d[.]$ модуля отображения-обновления U с учетом минимизации локального взвешенного среднего детализирующих коэффициентов $A_W^O(m, n)$ в вейвлет-области и выборе порогового значения Th_A , что позволяет выбрать вейвлет-функцию с определенным порядком обновления $O = [4, 2, 0]$ с помощью функции принятия решения об адаптации:

$$D(A_W^O(m, n), Th_A) = \begin{cases} 0 & \text{при } |A_W^2(m, n)| > Th_A \text{ и } |A_W^4(m, n)| > Th_A, \\ 2 & \text{при } |A_W^2(m, n)| \leq Th_A \text{ и } |A_W^4(m, n)| > Th_A, \\ 4 & \text{при } |A_W^2(m, n)| > Th_A \text{ и } |A_W^4(m, n)| \leq Th_A. \end{cases} \quad (3)$$

Данный алгоритм не использует дополнительную информацию об адаптации при восстановлении изображения и позволяет повысить точность вычисления аппроксимационных вейвлет-коэффициентов. Установлено, что качество аппроксимации исходного изображения на основе низкочастотных вейвлет-коэффициентов при использовании алгоритма АОЛВП выше по сравнению с вейвлет-функциями Хаара, Биор5/3, Биор7/5 и Биор9/7 на 0,4, 3, 34 и 57,3 соответственно. Определено, что длина кодового слова (в битах) по сравнению с Биор5/3 и Биор9/7 не изменяется и не зависит от количества уровней вейвлет-разложения.

Недостатком лифтинг-схемы АДЛВП с первичным предсказанием, основанной на адаптивном предсказании, является возможность потери линейности вейвлет-преобразования из-за нелинейного характера функции принятия решения D . Поскольку нелинейность функции принятия решения D приводит к увеличению ошибок аппроксимации различных областей изображения, то для реализации гарантированного линейного АДЛВП целесообразно использовать лифтинг-схемы с первичным обновлением.

Предложен эффективный алгоритм вычисления адаптивного дискретного вейвлет-преобразования АДЛВП_к с первичным обновлением, основанный на использовании локальной предварительной обработки, определяющей контурные области изображения I в горизонтальном $\tilde{G}_{\text{cont}}^x$ и вертикальном $\tilde{G}_{\text{cont}}^y$ направлениях с помощью оператора Собеля для адаптивного предсказания ${}^O P_d[.]$ высокочастотных вейвлет-коэффициентов с учетом степени близости пикселей к контурам (рисунок 3) в соответствии с функцией принятия решения $D(\tilde{G}_{\text{cont}}^{x(y)}(m, n))$ о выборе порядка предсказателя $O = [5, 3, 1]$:

$$D(\tilde{G}_{\text{cont}}^{x(y)}(m, n)) = \begin{cases} 1 & \text{при } \tilde{G}_{\text{cont}}^{x(y)}(m, n) \geq 5, \\ 3 & \text{при } 5 > \tilde{G}_{\text{cont}}^{x(y)}(m, n) \geq 3, \\ 5 & \text{при } 3 > \tilde{G}_{\text{cont}}^{x(y)}(m, n) \geq 0. \end{cases} \quad (4)$$

Для сохранения линейности вейвлет-преобразования используется оператор обновления первого порядка. Недостатком данного алгоритма является необходимость дополнительной информации об адаптации при восстановлении изображения.

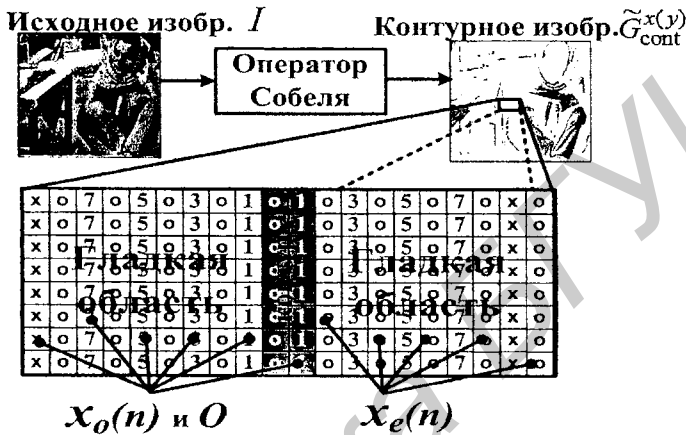


Рисунок 3 – Выбор порядка предсказателя контурной линии в гладкой области изображения

При анализе результатов моделирования установлено, что предложенные алгоритмы по критерию компактности энергии превосходят вейвлет-функции Хаара, Биор5/3 и Биор9/7 без адаптации в 5, 4 и 2 раза соответственно, обеспечивая увеличение концентрации энергии изображения в минимальном количестве вейвлет-коэффициентов, без увеличения динамического диапазона исходного изображения в вейвлет-области. В результате чего вычислительная сложность ДЛВП уменьшается в 3 раза по сравнению с вейвлет-функцией Биор9/7 и не требуется увеличения физических ресурсов для временного хранения промежуточных низкочастотных вейвлет-коэффициентов.

Предложен алгоритм вычисления адаптивного дискретного вейвлет-преобразования АДЛВПпт с первичным обновлением, основанный на адаптивном предсказании $P_{HT}[\cdot]$ детализирующих вейвлет-коэффициентов $d_{HT}(n)$ с учетом распределения единичных пикселей $HT(m, n)$ бинарного изображения HT , формируемого из исходного изображения по критерию оптимизации распределения ошибки квантования и согласованного с местоположениями детализирующих коэффициентов вейвлет-матрицы (рисунок 4).

Для адаптации операции предсказания используется функция принятия решения $D(HT(m, n))$, определяющая степень значимости нечетного пиксела $x_o(n)$ с помощью соотношений

$$D(HT(m,n)) = \begin{cases} P_{HT}[x_o(n)] = d_{HT}(n) = 0 & \text{при } HT'(m,n) = 1, \\ P_{HT}[x_o(n)] = d_{HT}(n) = x_o(n) - s(n) & \text{при } HT'(m,n) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где HT' – бинарное горизонтально-вертикальное переупорядоченное изображение.

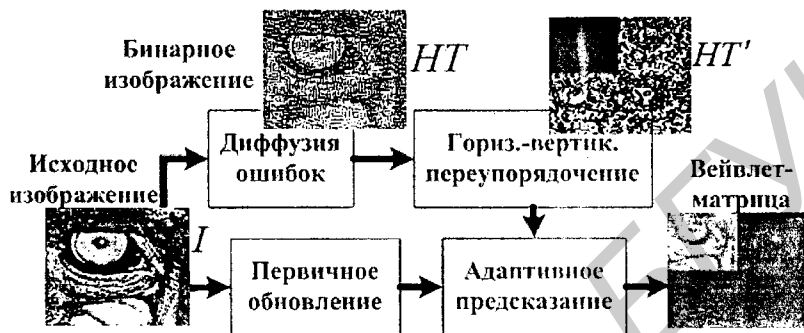


Рисунок 4 – Блок-схема прямого одноуровневого АДЛВП_{пт}

Для сохранения линейности вейвлет-преобразования используется оператор обновления U_{HT} первого порядка с весовыми коэффициентами (1/2, 1/2).

Для оптимального соотношения между быстродействием и количеством нулевых вейвлет-коэффициентов адаптивное предсказание используется только на нижних уровнях вейвлет-разложения изображения, а для вычисления вейвлет-коэффициентов на остальных уровнях вейвлет-преобразований (Хаара, Биор5/3, Биор9/7 и т.д.) используется одно из стандартных дискретных вейвлет-преобразований (Хаара, Биор5/3, Биор9/7 и т.д.).

При анализе результатов моделирования установлено, что за счет обработки незначимых пикселей с помощью процедуры рассеяния ошибки квантования предложенный алгоритм по критерию компактности энергии превосходит вейвлет-функции: бинарную, Хаара, Биор5/3, Биор7/5 и Биор9/7 без адаптации в 10, 7, 6, 6 и 3 раза соответственно, без изменения динамического диапазона исходного изображения. В результате чего вычислительная сложность ДЛВП уменьшается в 7 раз при почти идеальном восстановлении.

Предложена маска диагональных весовых коэффициентов для формирования бинарного изображения, позволяющая достичь компромисса между быстродействием алгоритма и качеством восстановления изображения.

В четвертой главе рассматриваются вопросы программно-аппаратной реализации разработанных алгоритмов АДЛВП в различных процедурах сжатия изображений и оценки их характеристик.

Предложен алгоритм прямого многоуровневого доменного вейвлет-преобразования Хаара ($DHWT$ – *Domain Haar Wavelet Transform*), основанный на рекурсивной Z-перестановке доменных блоков исходных значений и

многоуровневой конвейерной обработке низкочастотных вейвлет-коэффициентов. Суть алгоритма состоит в предварительной Z -перестановке размером 4×4 исходных значений и формировании в результате их последовательного считывания доменных блоков, позволяющих локально вычислять двумерное вейвлет-преобразование Хаара.

Установлено, что алгоритм $DHWT$ обеспечивает компактную аппаратную реализацию прямого дискретного вейвлет-преобразования и высокую скорость вычислений за счет минимизации объема буферной памяти для временного хранения промежуточных низкочастотных вейвлет-коэффициентов. Значения вейвлет-коэффициентов, вычисленные с помощью предложенного алгоритма $DHWT$, в точности совпадают со значениями вейвлет-коэффициентов, получаемыми с помощью методов $RCWT$ (последовательная обработка строк и столбцов) и $LBWT$ (поочередная обработка строк и неполных столбцов со сдвигом вдоль столбцов), но предложенный алгоритм $DHWT$ значительно улучшает зависимость размеров буфера от размеров матрицы исходных значений: $J_{RCWT} = 2^{2N}$, $J_{LBWT} = 2^{N+1}$ и $J_{DHWT} = 4(N-1) - 1$, где N – максимальное число уровней вейвлет-разложения.

Предложен программный модуль сжатия без потерь ($LLRBC$), основанный на использовании адаптивного вейвлет-преобразования АДЛВП $_k$, которое обеспечивает высокую точность аппроксимации гладких, контурных и текстурных областей изображений. Для восстановления исходного изображения с помощью обратного АДЛВП $_k$ с тремя или более разными порядками (например $O = [1, 3, 5]$) (5), необходимо дополнительное изображение с информацией о местоположении порядков предсказания, для кодирования которого требуется достаточно большое количество битов. В связи с этим для увеличения коэффициента сжатия изображений предлагаются новые алгоритмы АДЛВП $_k13$ и АДЛВП $_k15$, использующие схему с двумя порядками предсказания ($O = [1, 3]$ или $O = [1, 5]$). Они увеличивают концентрацию энергии вейвлет-коэффициентов за счет достижения оптимального соотношения между пространственным и частотным разрешениями и уменьшают количество битовых плоскостей дополнительного изображения об адаптации посредством его бинаризации.

Для эффективного сжатия дополнительного бинарного изображения предлагается использовать стандарт $JBIG$ (*Joint Bi-level Experts Group*).

Для эффективного сжатия матрицы вейвлет-коэффициентов предлагается древовидно-блочный гибридный алгоритм (ДБАС- L), основанный на компактном представлении блочно-древовидных структур, что учитывает особенности алгоритмов $SPIHT$ на низкочастотных уровнях разложения и $SPECK$ на L -х высокочастотных уровнях с целью их эффективного объединения и обеспечивает возможности управления соотношением быстродействие/коэффициент сжатия, а также уменьшение количества значимых битов в сжатом битовом потоке.

Результаты моделирования показывают, что предложенный программный модуль с использованием ДБАС-2 и АДЛВП $_k15$ обеспечивает повышение коэффициента сжатия на 6%, 10%, 8% и 8% по сравнению со стандартом

JPEG2000 для тестовых изображений *France*, *Mandrill*, *Barbara* и *Lena* соответственно.

Предложен программный модуль сжатия с потерями (ГАССП), основанный на использовании адаптивного преобразования АДЛВП_{пт}, которое обеспечивает незначительное перцепционное искажение в восстановленном изображении за счет обработки незначимых пикселей с помощью процедуры рассеяния ошибки квантования, и для эффективного сжатия матрицы вейвлет-коэффициентов используется древовидно-блочный гибридный алгоритм ДБАС-2.

Результаты моделирования предложенного программного модуля показывают, что при коэффициентах сжатия от 2 до 11 качество восстановленного изображения в понятии *SSIM* (*Structural SIMilarity*) изменяется незначительно от 1 до 0.99945 (рисунок 5).

Определено, что данный программный модуль относится к классу почти без потерь и позволяет достичь коэффициента сжатия до 5 при высоком качестве восстановления $SSIM=0.9999553$, близкого к оригиналу.



Рисунок 5 – Оценка качества восстановленного изображения с использованием обратного АДЛВП_{пт} на основе *SSIM*

Предложенные программные модули сжатия реализованы в беспилотной летательной системе *SANT ARPIA-1* для обработки (рисунок 6) аэрофотографических изображений, имеющих следующие особенности: размер 2784x1856, разрешение 5.2 – 21 Мп, формат *RAW (.CR2 RGBG)* или *JPEG (.JPG RGB)* с длиной кодового слова 16 или 8 бит, и объемом памяти приблизительно 21 или 6 Мбайт, соответственно. Система *SANT ARPIA-1* обладает следующими техническими характеристиками: максимальное время полета 90 мин, дальность 100 км, скорость 200 км/ч, максимальная высота 3300 м, вес 85 кг, максимальный вес полезной нагрузки 17 кг, объем бортовой памяти 8 Гбайт, размах крыльев самолета 382 см и длина самолета 290 см.

Применение разработанного программного модуля ГАСБП сжатия без потерь (рисунок 6), основанного на использовании адаптивного вейвлет-преобразования

АДЛВПК15, позволяет обеспечить сжатие визуальной значимой информации в 5 раз, а смещенной информации в 1.5 раза.

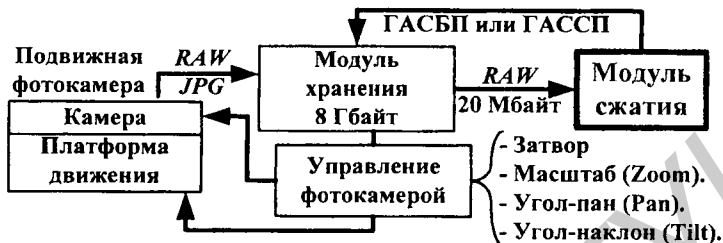


Рисунок 6 – Обработка неподвижных изображений в системе *SANT ARPIA-1*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана методика анализа и оценки частотно-пространственных свойств дискретного вейвлет-преобразования, позволяющая определить оптимальную структуру лифтинг-схемы с учетом ограничений в системах обработки информации.

Выявлено, что увеличение динамического диапазона вейвлет-матрицы зависит от количества уровней вейвлет-разложения при выполнении лифтинг-операции масштабирования. Определены условия уменьшения динамического диапазона вейвлет-матрицы в зависимости от выбора p -битного сдвига значений отсчетов сигнала, количества лифтинг-шагов и уровней вейвлет-разложения.

Определено, что основными параметрами эффективности вейвлет-преобразования для решения задачи сжатия без потери изображений являются количество нулей и соотношение энергия/количество нулей, а для решения задачи сжатия с потерями – гладкость и коэффициент выигрыша кодирования вейвлет-коэффициентов.

Установлено, что выбор оптимальных вейвлет-функций для улучшения характеристик программно-аппаратной реализации лифтинг-схемы дискретного вейвлет-преобразования зависит от динамического диапазона, длины кодового слова и вычислительной сложности.

Определено, что выбор симметричного расширения значений элементов на границах приводит к увеличению общего количества нулевых вейвлет-коэффициентов и корреляции высокочастотных вейвлет-коэффициентов при выполнении лифтинг-операции предсказания.

Приведена оценка характеристик эффективности архитектур (объем памяти промежуточных низкочастотных вейвлет-коэффициентов, количество элементов вычислительного устройства, количество тактов, время критического пути, сложность управления процессом вычисления, гибкость для реализации множества вейвлет-функций и КПД аппаратных средств на первом такте вычислений) с учетом свойств и параметров дискретного вейвлет-преобразования.

Предложена обобщенная структура основных связей между базовыми элементами низкого, среднего и высокого уровней архитектуры аппаратных средств реализации дискретного вейвлет-преобразования, позволяющая выявить новые направления развития и совершенствования архитектур. Разработанная методика предназначена для анализа дискретного вейвлет-преобразования на основе биортогональных вейвлет-функций [1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

2. Разработан алгоритм адаптивного обобщенного вейвлет-преобразования с первичным предсказанием, основанный на объединении арифметических операций, оператора обновления и функции принятия решения в отображение-обновление и его адаптации в вейвлет-области по критерию минимизации локального взвешенного среднего детализирующих вейвлет-коэффициентов, что обеспечивает повышение точности вычисления аппроксимационных вейвлет-коэффициентов за счет выбора оптимального соотношения между пороговым значением функции принятия решения и локальным взвешенным средним детализирующих коэффициентов в вейвлет-области и не требует передачи дополнительной информации об адаптации для идеального восстановления исходного сигнала.

Установлено, что предложенный алгоритм улучшает качество аппроксимации исходного изображения на основе низкочастотных вейвлет-коэффициентов на 0.4, 3, 34 и 57.3 по сравнению с Хаара, Биор5/3, Биор7/5 и Биор9/7 вейвлет-функциями без адаптации соответственно. Определено, что длина кодового слова вейвлет-коэффициентов не зависит от размера блока исходного изображения и количества уровней вейвлет-разложения по сравнению с Биор5/3 и Биор9/7 вейвлет-функциями без адаптации [1, 6].

3. Разработаны алгоритмы адаптивного вейвлет-преобразования, основанные на использовании локальной предварительной обработки контурных областей изображения для адаптивного выбора порядка предсказания высокочастотных вейвлет-коэффициентов, оператора обновления первого порядка для сохранения линейности вейвлет-преобразования и формирования дополнительной информации о выбранных порядках предсказания.

Установлено, что предложенные алгоритмы по критерию компактности энергии превосходят вейвлет-функции Хаара, Биор5/3 и Биор9/7 без адаптации в 5, 4 и 2 раза соответственно и обеспечивают увеличение концентрации энергии изображения в минимальном количестве вейвлет-коэффициентов без увеличения динамического диапазона исходного изображения. Определено, что

вычислительная сложность ДЛВП уменьшается в 3 раза и не требуется увеличения физических ресурсов для временного хранения промежуточных низкочастотных вейвлет-коэффициентов [1, 4, 5].

4. Разработан алгоритм адаптивного дискретного вейвлет-преобразования, основанный на адаптивном обнулении высокочастотных вейвлет-коэффициентов с помощью перцептуальной маски, учитывающей свойства интеграции зрительной системы восприятия, что обеспечивает минимизацию количества незначимых детализирующих коэффициентов и увеличения количества нулевых вейвлет-коэффициентов.

Установлено, что предложенный алгоритм по критерию компактности энергии превосходит в 7, 6 и 3 раза вейвлет-функции Хаара, Биор5/3 и Биор9/7 без адаптации соответственно, без изменения динамического диапазона исходного изображения. Определено, что вычислительная сложность ДЛВП уменьшается в 7 раз и не требуется увеличения физических ресурсов для временного хранения промежуточных низкочастотных вейвлет-коэффициентов при почти идеальном восстановлении.

Определено, что маска с диагональными весовыми коэффициентами (1/2, 1/2) для формирования бинарного изображения позволяет достичь оптимального соотношения между быстродействием и качеством восстановления изображения [5].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Предложенные алгоритмы представляют собой основу для разработки:

1. Аппаратно-программного комплекса для развития и совершенствования систем обнаружения сетевых аномалий и вторжений, основанных на вычислении адаптивного вейвлет-преобразования информации о сетевом трафике для повышения их эффективности [1, 4, 5, 6].

2. Программного комплекса вычисления и анализа свойств дискретного адаптивного вейвлет-преобразования для использования в учебном процессе Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники по дисциплинам «Цифровая обработка биомедицинских сигналов и изображений» и «Цифровая обработка и защита мультимедийной информации» специальностей телекоммуникационного профиля [1, 6].

3. Программного комплекса для развития и совершенствования систем обработки, передачи и хранения аэрофотографической, медицинской и спутниковой информации [10, 11].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Борискевич, А.А. Дискретное лифтинг вейвлет-преобразование с первичным обновлением и адаптивным предсказанием на основе локального критерия гладкости изображения / А.А. Борискевич, Л.А. Руис // Известия Нац. академии наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2011. – № 4. – С. 102–109.

2. Ruiz, L.A. Método para el cálculo bidimensional de la transformada wavelet Haar de domenes basada en una recursiva permutación-Z / L.A. Ruiz, A.A. Boriskevich, V.Yu. Tsviatkou // Revista Ingeniería U.C. – 2011. – № 3 (18). – С. 29–41.

3. Руис, Л.А. Обобщенная архитектура аппаратных средств реализации дискретного лифтинг вейвлет-преобразования / Л.А. Руис, А.А. Борискевич, И.А. Борискевич // Известия Нац. академии наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2012. – № 4. – С. 89–98.

4. Борискевич, А.А. Гибридный алгоритм сжатия изображений без потерь на основе дискретного вейвлет-преобразования с адаптивным предсказанием / А.А. Борискевич, Л.А. Руис // Информатика. – 2013. – № 1 (37). – С. 48–56.

5. Руис, Э.Л.А. Алгоритм вычисления адаптивного лифтинг вейвлет-преобразования на основе диффузии ошибок предсказания / Л.А. Руис, А.А. Борискевич // Доклады БГУИР. – 2013. – № 6. – С. 55–61.

Статьи в сборниках и материалах конференций

6. Руис, Л.А. Алгоритм вычисления адаптивного обобщенного лифтинг вейвлет-преобразования без дополнительной информации / Л.А. Руис, А.А. Борискевич // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраич. кодирование и безопасность данных: материалы междунар. науч.-техн. семинара, Минск, янв. –дек. 2011 г. / БГУИР; редкол.: В.Ф. Голиков [и др.]. – Минск, 2011. – С. 26–32.

7. Руис, Л.А. Алгоритм вычисления бинарного дискретного вейвлет-преобразования на основе лифтинг-схемы / Л.А. Руис, А.А. Борискевич // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраич. кодирование и безопасность данных: материалы междунар. науч.-техн. семинара, Минск, янв. –дек. 2012 г. / БГУИР; редкол.: В.Ф. Голиков [и др.]. – Минск, 2012. – С. 47–56.

Тезисы докладов

8. Руис, Л.А. Доменное вейвлет-преобразование для миниатюризации бортовых комплексов обработки целевой информации / Л.А. Руис, А.А. Борискевич, В.Ю. Цветков // 5-я Междунар. науч. конф. по техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного назначения, Минск, 2012. – С. 17–18.

25–26 мая 2011 г. / Гос. военно-промышленный комитет Республики Беларусь. – Минск, 2011. – С. 144–147.

9. Руис, Л.А. Алгоритм вычисления гибридного лифтинг вейвлет-преобразования без расширения границ сигнала / Л.А. Руис, А.А. Борискевич, В.Ю. Цветков // Prospects of development of modern information and communication technologies Procee. Int. Scien. And Tech. Conf., Baku, 22–24 sep. 2011 / Min. Comm. and Inf. Tech. Azerbaijan Rep. – Baku, 2011. – С. 492–497.

10. Руис, Л.А. Алгоритм обнаружения сетевых вторжений на основе вейвлет-анализа / Л.А. Руис, М.А. Млаги, А.А. Борискевич // Технические средства защиты информации: тез. докл. XI Белорус.-российск. науч.-техн. конф., Минск, 24–28 мая 2013 г. / БГУИР; редкол.: В.Ф. Голиков [и др.]. – Минск, 2013. – С. 36.

11. Гонсалес, К.В. Алгоритм обнаружения сетевых аномалий на основе главных компонент и опорных векторов / К.В. Гонсалес, Л.А. Руис, А.А. Борискевич // Технические средства защиты информации: тез. докл. XI Белорус.-российск. науч.-техн. конф., Минск, 24–28 мая 2013 г. / БГУИР; редкол.: В.Ф. Голиков [и др.]. – Минск, 2013. – С. 36–37.

Патенты

12. Устройство доменного вычисления коэффициентов прямого двухмерного вейвлет-преобразования Хаара: заявка на пат. 9888 Респ. Беларусь, МПК G06F 17/00 / А.А. Борискевич, В.Ю. Цветков, И.А. Борискевич, Л.А. Руис; заявитель учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». – № и 20130259; заявл. 26.03.2013. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. Положительное решение 01.11.2013.

РЭЗЮМЭ

Руйс Эчанагусія Луіс Альфонса

Адаптыўныя алгарытмы дыскрэтнага вэйвлет-пераўтварэння для сціску відарысаў

Ключавыя словы: адаптацыя, ліфтынг-схема, дыскрэтнае вэйвлет-пераўтварэнне, сістэма апрацоўкі інфармацыі, частотна-прасторавыя ўласцівасці, сціск відарысаў.

Мэта працы: распрацоўка метадыкі аналізу і сінтэзу алгарытмаў адаптыўнага дыскрэтнага вэйвлет-пераўтварэння, якія забяспечваюць павышэнне частотна-прасторавых і / або -часавых характарыстык эфектыўнасці вэйвлет-пераўтварэння, з улікам абмежаванняў у сістэмах апрацоўкі інфармацыі.

Метады даследавання: метады лічбавай апрацоўкі відарысаў, распазнавання вобразаў, статыстычнага аналізу і апрацоўкі даных.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацавана метадыка, заснаваная на ўліку ўзаемасувязі паміж параметрамі ліфтынг-схемы, характарыстыкамі эфектыўнасці і частотна-прасторавымі ўласцівасцямі вэйвлет-пераўтварэння, што дазваляе ажыццявіць сінтэз, аналіз і ацэнку эфектыўнасці новых алгарытмаў адаптыўнага дыскрэтнага вэйвлет-пераўтварэння: алгарытм вылічэння адаптыўнага абагульненага ліфтынг вэйвлет-пераўтварэння з першасным прадказаннем і без дадатковай інфармацыі пра адаптацыю, алгарытм вылічэння адаптыўнага дыскрэтнага ліфтынг вэйвлет-пераўтварэння з першасным абнаўленнем і ўлікам перцептуальнай значнасці адлікаў.

Ступень выкарыстання: вынікі працы выкарыстаны ў БДУІР «Лічбавая апрацоўка біямедыцынскіх сігналаў і малюнкаў», у БДУІР «Лічбавая апрацоўка і абарона мультымедычнай інфармацыі» і ў Венесуэльскім ААТ ваенных прамысловасцей (CAVIM) у праекце беспілотнай лятальнай сістэмы *SANT ARPIA-1*.

Вобласць ўжывання: сістэмы апрацоўкі біямедыцынскай інфармацыі, сістэмы сціску відарысаў і абароны мультымедычнай інфармацыі.

РЕЗЮМЕ

Руис Эченагусиа Луис Альфонсо

Адаптивные алгоритмы дискретного вейвлет-преобразования для сжатия изображений

Ключевые слова: адаптация, лифтинг-схема, дискретное вейвлет-преобразование, система обработки информации, частотно-пространственное свойство, сжатие изображений.

Цель работы: разработка методики анализа и синтеза алгоритмов адаптивного дискретного вейвлет-преобразования, обеспечивающих улучшение частотно-пространственных и/или частотно-временных характеристик эффективности вейвлет-преобразования с учетом ограничений в системах обработки информации.

Методы исследования: методы цифровой обработки изображений, распознавания образов, статистического анализа и обработки данных.

Полученные результаты и их новизна: разработана методика, основанная на учете взаимосвязи между параметрами лифтинг-схемы, характеристиками эффективности и частотно-пространственными свойствами вейвлет-преобразования, что позволяет осуществить синтез, анализ и оценку эффективности новых алгоритмов адаптивного дискретного лифтинг вейвлет-преобразования: алгоритм вычисления адаптивного обобщенного лифтинг вейвлет-преобразования с первичным предсказанием и без дополнительной информации об адаптации, алгоритм вычисления адаптивного дискретного вейвлет-преобразования с первичным обновлением и учетом перцептуальной значимости отсчетов.

Степень использования: результаты работы использованы в учебном процессе БГУИР по дисциплинам «Цифровая обработка биомедицинских сигналов и изображений», «Цифровая обработка и защита мультимедийной информации» и в Венесуэльском ОАО военных промышленности (*CAVIM*) в проекте беспилотной летательной системы *SANT ARPIA-1*.

Область применения: системы обработки биомедицинской информации, системы сжатия изображений и защиты мультимедийной информации.

SUMMARY

Ruiz Echenagucia Luis Alfonso

Adaptive algorithms of discrete wavelet transforms for image compression

Keywords: adaptation, lifting scheme, discrete wavelet transform, information processing system, frequency and spatial property, image compression.

Aim of the work: development of analysis and synthesis procedure of discrete adaptive lifting wavelet transform algorithms providing increase of the frequency-spatial and/or -temporal wavelet transform performance taking into account the limitations existing in the information processing systems.

Research methods: methods of digital image processing, pattern recognition, statistical analysis and data processing.

The obtained results and their novelty: it's developed a procedure based on the relationship between the lifting scheme parameters, performance and frequency-spatial properties of the wavelet transforms. It allows us to implement the synthesis, analysis and performance estimation of new discrete adaptive lifting wavelet transform algorithms: algorithm for computing the generalized adaptive lifting wavelet transform with first-prediction and without side information about adaptation, algorithm for computing adaptive lifting wavelet transform with first-update and considering the perceptual sample significance.

Extent of usage: the results of researches have been used at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR) in the courses "Digital multimedia processing and protection» and "Digital biomedical signals and image processing" and in Venezuelan Limited Company of Military Industries (CAVIM) in the project of unmanned aerial systems SANT ARPIA-1 of Republic of Venezuela.

Field of application: biomedical information processing system, image compression system and multimedia protection system.

Научное издание

РУИС ЭЧЕНАГУСИА Луис Альфонсо

**АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ДИСКРЕТНОГО
ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации

Подписано в печать 19.02.2014.	Формат 60x84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 52.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6