

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,
ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Գոմցյան Սվետլանա Գևորգի

**ԿԱՊԻ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐՈՒՄ ԱԶԴԱՆՇԱՆՆԵՐԻ ՎԵՑՎԼԵՏ-ՄՇԱԿՄԱՆ
ԵՂԱՆԱԿՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԵՎ ԲԱՐԵԼԱՎՈՒՄԸ**

Ե. 12.03 - «Հեռահաղորդակցական ցանցեր, սարքավորումներ և
համակարգեր» մասնագիտությամբ
տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՄԵՂՄԱԳԻՐ

Երևան 2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

Гомцян Светлана Геворковна

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ
ВЕЙВЛЕТ-ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.12.03 - "Телекоммуникационные сети, устройства и
системы"

Ереван 2019

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի Ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝ ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ. Ա.Գ. Ղուլյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տ.գ.դ., պրոֆ. Ս.Խ. Խոտավերդյան
տ.գ.թ. Ս.Գ. Էյրամջյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ Կապի միջոցների ԳՀԻ, ք.Երևան, ՀՀ

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 2019թ. օգոստոսի 30-ին, ժամը 14.00-ին, ՀԱՊՀ-ում գործող «Ռադիոտեխնիկայի և էլեկտրոնիկայի» 046 մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցե՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105, 17 մասնաշենք):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ-ի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2019 թ. հուլիսի 10-ին:

046 մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար՝



տ.գ.թ.,դոց. Մ.Յ. Այվազյան

Тема диссертации утверждена в Национальном политехническом университете Армении

Научный руководитель: д.ф.-м.н., проф. А.Г. Гулян

Официальные оппоненты: д.т.н., проф. С.Х. Худавердян
к.т.н. С.Г. Эйрамджян

Ведущая организация: НИИ средств связи, г. Ереван, РА

Защита диссертации состоится 30-го августа 2019 в 14.00 ч. на заседании Специализированного совета 046 - "Радиотехника и электроника", действующего при Национальном политехническом университете Армении (НПУА), по адресу: 0009, г. Ереван, ул. Теряна 105, корпус 17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.

Автореферат разослан 10-го июля 2019 г.

Ученый секретарь

Специализированного совета 046



к.т.н., доц. М.Ц. Айвазян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На протяжении нескольких веков математиков, а затем и представителей технических областей, интересовал вопрос о возможности простого и однотипного представления сложных функций и сигналов. Эта задача была решена достаточно эффективно с использованием рядов Фурье и разработанных на их основе методов преобразований. Однако в последние годы стало очевидным, что традиционный аппарат представления функций тригонометрическими рядами Фурье неэффективен для нестационарных, импульсных, цифровых сигналов и изображений, которые получают все большее распространение в современной технике связи. Разработка вейвлетов дала возможность создания новых базисных функций, которые кардинально отличаются от базисной функции рядов Фурье - синусоиды. Именно из-за их особенностей в последнее десятилетие вейвлет-технологии находят практическое применение в различных областях систем связи: при анализе и восстановлении сложных сигналов и изображений, выявлении их тонких локальных особенностей, очистке от шумов и при сжатии, что позволяет обеспечить более качественную передачу и прием радиотехнических сигналов. Этим объясняется актуальность данной работы.

Цель работы. Целью диссертационной работы является исследование методов применения вейвлет-технологий в системах связи и разработка средств для повышения эффективности и качества обработки сигналов и изображений.

Методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач были применены основы теории Фурье и вейвлет-преобразований, мощный инструментальный пакет Wavelet Toolbox системы MATLAB и методы математического моделирования, которые позволили разработать соответствующие программы для оценки эффективности предложенных алгоритмов вейвлет-обработки сигналов и изображений.

Научная новизна. В процессе исследований получены следующие результаты, отличающиеся новизной:

1. Показаны возможности вейвлет-преобразований при обработке радиотехнических сигналов и изображений, исследованы преимущества и недостатки вейвлет-функций, произведен сравнительный анализ между вейвлет-базисами и тригонометрическими рядами Фурье.

2. Предложены алгоритмы анализа и восстановления, вейвлет-фильтрации и сжатия, а также статистической обработки радиотехнических сигналов и изображений, которые используют наилучшие вейвлет-базисы, оптимальные уровни декомпозиции, эффективные методы пороговой обработки и оптимальные пороговые уровни, полученные в результате исследований.

3. По вышеописанным алгоритмам разработаны компьютерные программы, которые рассчитывают критерии качества обработанных сигналов и позволяют оценить эффективность предложенных алгоритмов.

4. Средствами MATLAB R2013a DSP System Toolbox V.8.4 разработана компьютерная модель восстановления и фильтрации одномерных сигналов, работа которой основана на предложенных алгоритмах.

5. Разработан новый алгоритм маркировки изображения цифровым водяным знаком, который использует лифтинг вейвлет-преобразование и комбинированный метод слияния изображений аддитивным механизмом. В алгоритме применяется биортогональный вейвлет-базис, заранее модифицированный по лифтинг-схеме.

Практическая ценность работы. Результаты исследований, выполненных в ходе диссертационной работы, разработанные алгоритмы и компьютерные программы по вейвлет-обработке одномерных и двумерных сигналов могут быть предложены специалистам различных технических областей для решения таких задач, как эффективное восстановление сигналов при приеме; сглаживание и фильтрация зашумленных сигналов; передача информации по узкополосным каналам связи с высокой точностью и степенью сжатия; идентификация и сохранение большого объема изображений в системах безопасности и видеонаблюдения, а также защиты авторских прав изображений и конфиденциальности данных.

Достоверность научных положений подтверждена соответствием теоретических основ, аналитических выводов и результатов, полученных в диссертационной работе.

Внедрение. Результаты диссертации внедрены:

- в Институте радиофизики и электроники НАН РА, г. Аштарак, Армения;

- в ЗАО "Рединет", г.Ереван, Армения.

Основные положения, выносимые на защиту:

- теоретические и практические результаты исследований методов Фурье и вейвлет-преобразований;

- результаты вейвлет-обработки одномерных и двумерных сигналов в среде Wavelet Toolbox системы MATLAB с использованием различных алгоритмов пороговой обработки и типов вейвлетов;

- алгоритмы и компьютерные программы, реализующие предложенные методы восстановления, фильтрации и сжатия радиотехнических сигналов, и соответствующие результаты.

- методы улучшения вейвлетов первого поколения, основанные на лифтинг-схеме.

- новый алгоритм маркировки изображения водяным знаком с применением модифицированного вейвлета.

Апробация работы. Основные научные и практические результаты диссертации докладывались на:

- международных научно-технических конференциях "Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций" (Севастополь, Россия, 2016, 2017 гг.);

- ежегодных научных конференциях НПУА (Ереван, Армения, 2016-2018 гг.);

• научных семинарах факультета Радиотехники и Систем связи НПУА (Ереван, Армения, 2016-2018 гг.).

Публикации. Основные положения диссертации представлены в 8 научных работах, список которых приводится в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы, включающего 122 наименований. Основной текст работы составляет 113 страниц, включая 59 рисунков и 7 таблиц. Общий объем работы составляет 124 страницы. Диссертация написана на армянском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследования, изложены изучаемые объекты и методы. Представлены практическое значение работы, научная новизна, а также основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе осуществлен обзор основных положений теории Фурье- и вейвлет-преобразований, получивших в настоящее время широкое применение для анализа и обработки радиотехнических сигналов.

Отмечены основные недостатки тригонометрических рядов Фурье: 1) для точного восстановления периодических и, тем более, нестационарных сигналов необходим расчет чрезвычайно большого количества гармоник ряда Фурье, что приводит к определенным расчетным трудностям и увеличению машинного времени; 2) быстрые методы преобразования Фурье (БПФ) дают возможность сократить время анализа и синтеза сигналов, но не уменьшают погрешности восстановления при неизбежном сокращении количества спектральных составляющих и, в частности, вследствие проявления эффекта Гиббса; 3) в реальных условиях возникающие в сигналах скачки и разрывы приводят к появлению в Фурье-спектре высокочастотных составляющих, что затрудняет оценку локальных особенностей при анализе и синтезе таких сигналов во временной области; 4) оконное или кратковременное преобразование Фурье (КПФ) позволяет рассматривать сигналы в частотно-временной области, однако фиксированные размеры "окон" трудно приспособить к разнообразным локальным особенностям.

Вейвлеты лишены вышеперечисленных недостатков, так как представляют собой математические функции, которые наделены способностью масштабироваться и перемещаться по всей временной оси; локализованы как во временной, так и в частотной областях, что необходимо для выявления локальных особенностей сигнала; обладают свойством самоподобия и ограниченностью по времени (компактны), т.е. могут интегрироваться от $-\infty$ до $+\infty$; имеется наличие нулевых моментов и ортогональность, что обеспечивает точное восстановление сигналов.

В отличие от преобразования Фурье, при вейвлет-анализе и синтезе сигналов используют пару интегрируемых по всей временной оси функций: вейвлет-функцию $\psi(t)$, которая определяет детализирующие вейвлет-

коэффициенты (D_j) и масштабирующую функцию $\phi(t)$, которая определяет аппроксимирующие вейвлет-коэффициенты (A_m).

Основные результаты, полученные опытным путем при сравнении Фурье- и вейвлет-преобразований, можно свести к следующему:

1. При непрерывном преобразовании (НВП) вейвлеты способны лучше представлять сложные и зашумленные радиотехнические сигналы со всеми мельчайшими деталями, о чем наглядно свидетельствуют полученные вейвлет-спектрограммы, причем их эффективность во много раз превосходит возможности даже кратковременного преобразования Фурье (КПФ). Составленная автором программа реализует НВП и КПФ синусоиды с двумя разрывами: без шума и с наложением шумов и строит соответствующие спектрограммы (рис.1). Очевидно, что КПФ неспособно выявить локальные особенности сигнала на фоне шумов, тогда как вейвлет-спектрограмма отчетливо показывает наличие двух разрывов, что свидетельствует о высокой разрешающей способности вейвлетов.

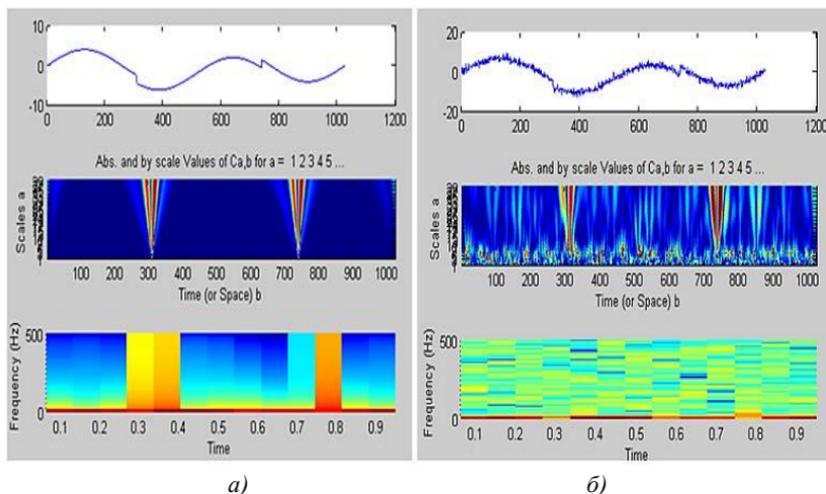


Рис.1. Вейвлет- и Фурье-спектрограммы синусоиды с двумя разрывами: без шума (а) и с наложением шумов (б)

2. При восстановлении сигналов быстрое вейвлет преобразование (БВП) не уступает результатам, полученным при БПФ (в обоих случаях ошибка восстановления - порядка 10^{-15}). Здесь следует учесть важное обстоятельство: в разработанной программе не давалось ограничение на количество гармоник ряда Фурье (по умолчанию оно равно половине отсчетов исследуемого сигнала), что, однако, осуществляется на практике для сокращения расчетного времени и приводит к неизбежному увеличению ошибки восстановления. Между тем БВП реализуется на первом уровне декомпозиции, при котором рассчитываются вейвлет-коэффициенты только одного уровня, что дает возможность уменьшить количество арифметических действий.

Во второй главе разработаны алгоритмы восстановления, фильтрации и статистической вейвлет-обработки одномерных сигналов, в которых применяются наилучшие средства и методы совершенствования и эффективного решения вышеупомянутых задач. Исследования были проведены в среде MATLAB как в командном режиме, так и с помощью обширных средств графического интерфейса пользователя (GUI).

1. На рис.2 представлен алгоритм одноуровневого вейвлет-преобразования.

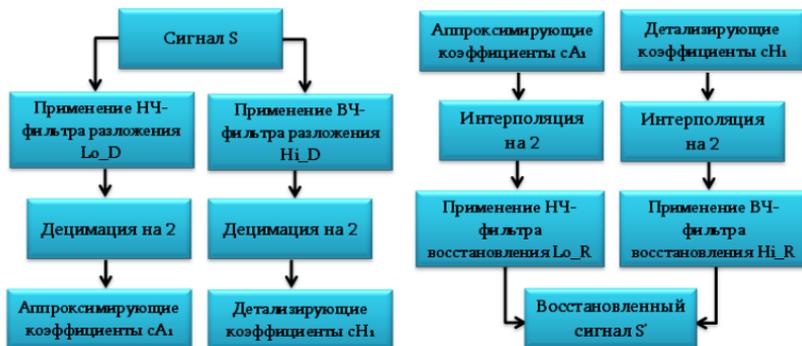


Рис.2. Алгоритм одноуровневого вейвлет-анализа и синтеза сигнала

В командном режиме MATLAB разработана программа, осуществляющая данный алгоритм. Далее был произведен поиск оптимального вейвлет-базиса и уровня декомпозиции, на основе которых алгоритм дает точное восстановление исходного сигнала с наименьшими временными затратами. Рассмотрен звуковой сигнал, состоящий из 900 отсчетов, применены вейвлет-базисы haar, db3, sym2, coif1, bior2.4, rbio1.5 и шесть уровней декомпозиции. В качестве меры восстановления рассчитаны нормы среднеквадратичной ошибки восстановления (MSE) в случае каждого вейвлета. Построены графики зависимости MSE_{norm} от уровней декомпозиций (Decomposition Level), из которых следует (рис.3), что для исследуемого сигнала наилучшие результаты обеспечивают наиболее регулярные, симметричные биортогональные вейвлеты и вейвлет Хаара (haar, bior2.4, rbio1.5). Следует отметить, что точное восстановление сигнала можно получить и при одноуровневом преобразовании, сокращая тем самым количество рассчитываемых вейвлет-коэффициентов.

2. Вейвлет-фильтрация отличается от традиционных методов фильтрации радиотехнических сигналов и заключается в ограничении уровня детализирующих вейвлет-коэффициентов путем установления некоторого порога ограничения. При этом важную роль имеет определение оптимального значения порога, метода пороговой обработки, оптимального уровня декомпозиции и типа вейвлетов, при которых возможна эффективная очистка, сглаживание и точное восстановление зашумленных сигналов без потери полезной информации.

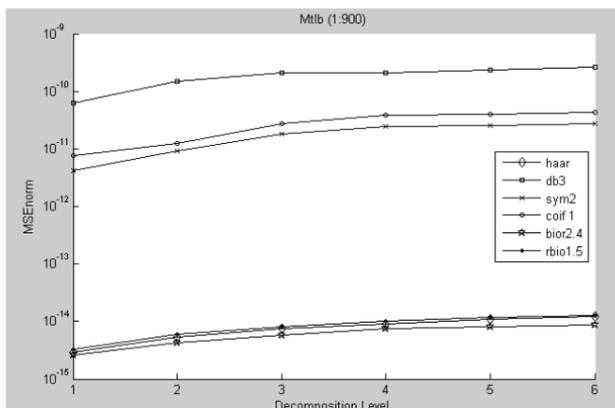


Рис.3. Зависимость ошибки восстановления от уровней декомпозиции

На рис.4 показана схема разработанного алгоритма вейвлет-фильтрации радиотехнических сигналов, эффективность которого зависит от перечисленных факторов. Также была составлена программа, осуществляющая данный алгоритм.

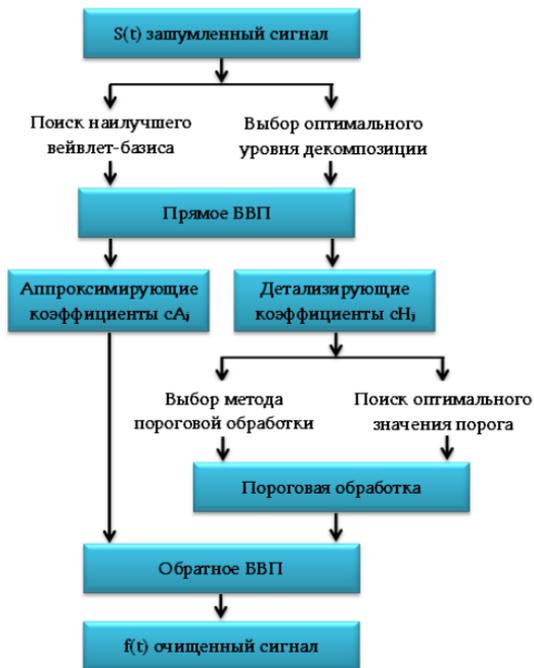


Рис.4. Алгоритм вейвлет-фильтрации сигнала

На основе проведенных в диссертационной работе исследований для улучшения результатов фильтрации тестового сигнала noisump по представленному алгоритму предлагается: 1) использовать симметричные ортогональные вейвлеты семейства $\text{sym}N$ и биортогональные вейвлеты семейства $\text{bior}N_rN_b$ более высокого порядка; 2) осуществлять очистку на низких уровнях декомпозиции, где лучше выявляются высокочастотные компоненты сигнала, к которым причисляются шумы; 3) использовать локальный метод мягкой пороговой обработки, при котором задается оптимальное значение порога для каждого вейвлет-коэффициента.

Наиболее значимым фактором при улучшении результатов вейвлет-фильтрации является определение оптимального значения порога. При больших значениях порогов очистка сигнала получается лучше, но повышается опасность потери некоторой части полезной информации. В поисках оптимального порога была составлена программа, рассчитывающая его значение универсальным методом sqrtwolog . Кроме полученного значения $\text{thr}=3.7233$, также апробированы значения $\text{thr}=0.7233, 1.7233, 2.7233, 4.7233, 5.7233, 6.7233$ и для каждого случая реализована вейвлет-фильтрация с использованием вейвлета $\text{sym}8$ до 6-ого уровня декомпозиции и глобального метода пороговой обработки. Оценены уровни шума отфильтрованных детализирующих коэффициентов посредством расчета стандартного отклонения (STD) и построены графики зависимости STD от значений порогов (Thresh), которые свидетельствуют об оптимальности выбранного значения $\text{thr}=3.7233$ как при мягком (soft), так и при жестком (hard) методе установки порога (рис.5).

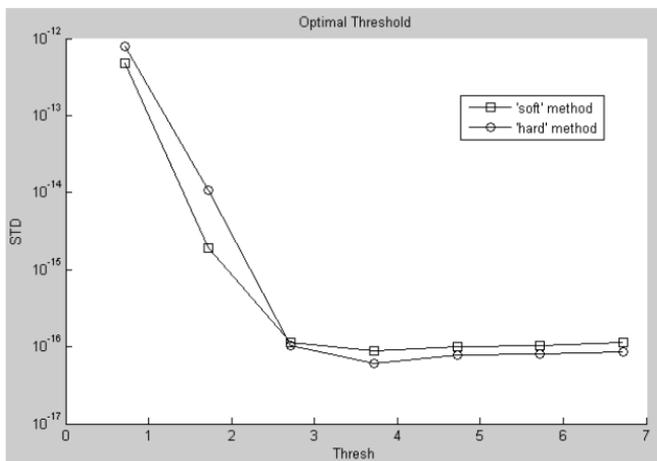


Рис.5. Зависимость STD детализирующих коэффициентов от пороговых значений

3. Средствами пакета MATLAB R2013a DSP System Toolbox V.8.4 разработана компьютерная модель восстановления и фильтрации одномерных сигналов в режиме реального времени на основе разработанных

алгоритмов, применяющих эффективные методы вейвлет-обработки и оптимальные вейвлет-базисы (рис.6). Данная модель способна обеспечить среднеквадратичную ошибку восстановления, не превышающую значение $2 \cdot 10^{-11}$ для исследуемого тестового сигнала noisichir.

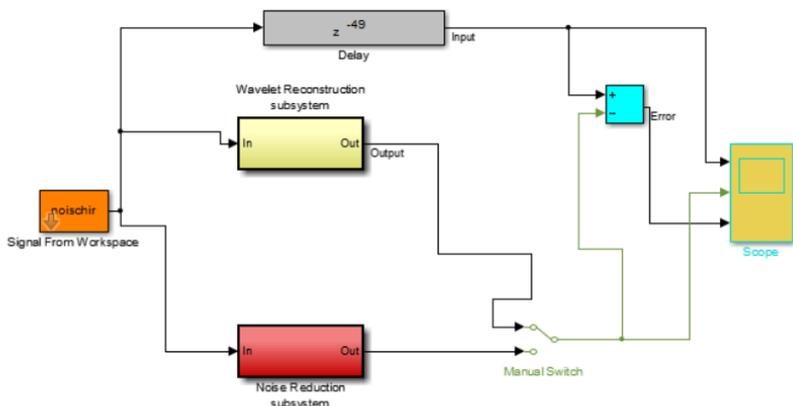


Рис.6. Компьютерная модель вейвлет-фильтрации и восстановления одномерных сигналов

4. Средствами пакета Wavelet Toolbox в диссертационной работе предложен способ статистической обработки QRS комплекса кардиосигнала, эффективность которого обеспечивается вышепредложенными методами пороговой обработки и, для рассматриваемого случая, наилучшим вейвлетом sym4. Получены функции распределения плотности сигнала в виде гистограмм и численные значения статистических параметров (среднее, медиана, мода, среднеквадратичные отклонения и др.), имеющие большую диагностическую ценность (рис.7).

В третьей главе исследованы и усовершенствованы методы вейвлет-восстановления, фильтрации и сжатия двумерных сигналов на основе алгоритмов, которые были предложены во 2-ой главе. В этом случае вейвлеты представляются функциями двух переменных - x и y : для НВП:

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_1 \cdot a_2}} \psi\left(\frac{x - b_1}{a_1}, \frac{y - b_2}{a_2}\right), \quad (1)$$

для ДВП:

$$\psi_{m,k} = 2^{-m/2} \psi(2^{-m}V - k), \quad \varphi_{m,k}(t) = 2^{-m/2} \varphi(2^{-m}V - k). \quad (2)$$

В частотной области для вейвлет-фильтров:

$$\begin{aligned} \Phi(x, y) &= \varphi(x)\varphi(y), & \Psi_{LH} &= \varphi(x)\psi(y), \\ \Psi_{HL} &= \psi(x)\varphi(y), & \Psi_{HH} &= \psi(x)\psi(y). \end{aligned} \quad (3)$$

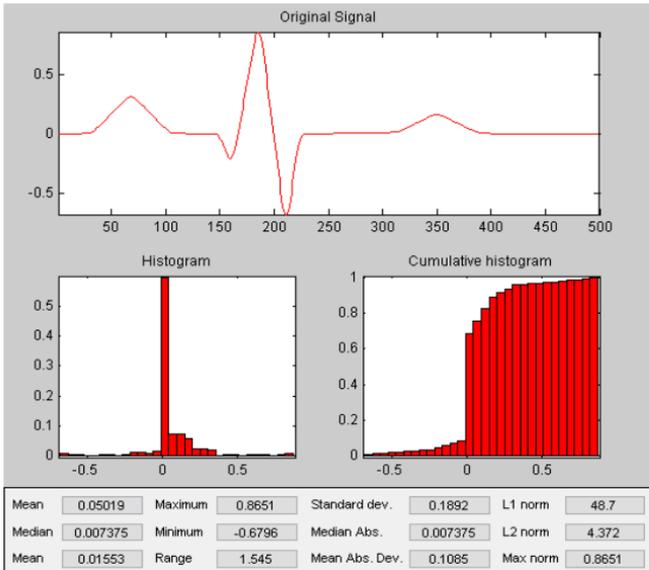


Рис.7. Статистическая обработка QRS-комплекса кардиосигнала

В системе MATLAB двумерный сигнал $S(x,y)$ принято представлять в виде аппроксимирующего вейвлет-коэффициента cA_j и трех детализирующих коэффициентов: горизонтального – cH_j , вертикального – cV_j и диагонального – cD_j , которые являются элементами двумерной матрицы в соответствующих направлениях. Тогда, согласно быстрому алгоритму Маллата, двумерный сигнал раскладывается в следующую последовательность:

$$S(x, y) \rightarrow (cA_1, cH_1, cV_1, cD_1) \rightarrow (cA_2, cH_2, cV_2, cD_2, cH_1, cV_1, cD_1) \rightarrow \dots$$

1. С применением различных вейвлет-базисов и 6-и уровней декомпозиции осуществлены анализ и синтез тестового изображения belmont1 и для каждого случая рассчитана максимальная ошибка восстановления (maxERR). Полученные значения приводят к выводу, что при анализе и синтезе двумерных сигналов оптимальными являются симметричные биортогональные вейвлеты, которые имеют две пары функций разложения и восстановления, что делает их более эффективными по сравнению с остальными вейвлетами. Причем наименьшую погрешность восстановления, как и в случае одномерных сигналов, можно получить при БВП и на первом уровне декомпозиции, что выгодно с точки зрения сокращения расчетного времени.

2. При вейвлет-фильтрации изображений важную роль имеет определение оптимальных значений порогов для детализирующих коэффициентов, так как при очистке неизбежно сталкиваются с

противоречием: невозможно одновременно получить хорошую очистку изображения и точное восстановление.

В поисках оптимальных порогов, была составлена программа, основанная на разработанном ранее алгоритме вейвлет-фильтрации. Наилучшие результаты получены установкой глобального штрафного порога (Penalize Thresh). Программа определяет оптимальное пороговое значение, при котором возможно обеспечить хорошую фильтрацию и приемлемое качество восстановленного изображения, а также оценивает стандартные отклонения вертикальных, горизонтальных и диагональных вейвлет-коэффициентов первого уровня. Кроме полученного значения $thr = 23.03$, также апробированы значения $thr = 4.88, 10.88, 16.88, 28.88, 34.88, 40.88$ и для каждого случая реализована вейвлет-фильтрация с использованием вейвлета $sym8$ до 6-го уровня декомпозиции. Зависимости STD от значений порогов представлены на рис.8. Полученные результаты указывают, что при очистке изображений от шумов предпочтительнее жесткие методы пороговой обработки.

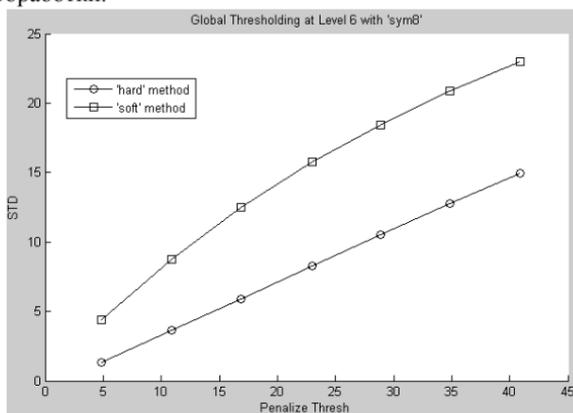


Рис.8. Зависимости стандартных отклонений детализирующих коэффициентов от значений порогов

3. Вейвлет-сжатие основывается на свойстве вейвлетов концентрировать энергию сигналов в немногочисленных вейвлет-коэффициентах, приравнивая остальные к нулю. Процесс сжатия, как и в случае фильтрации, осуществляется методами пороговой обработки детализирующих коэффициентов. На рис.9 показан разработанный алгоритм сжатия изображения, который основывается только на БВП, без квантования и кодирования. Цель – показать эффективность самих вейвлетов, а дальнейшая обработка изображения приведет только к улучшению результатов сжатия.

В диссертационной работе был исследован режим сжатия изображений без потерь, когда степень сжатия обычно не превышает 2...5. В качестве исследуемого сигнала рассматривалось одно из изображений камеры видеонаблюдения производственного помещения в формате JPEG, объемом

282 кБ. Наибольшую эффективность разработанного алгоритма можно обеспечить при выборе оптимальных методов пороговой обработки, значения порогов и наилучшего вейвлет-базиса для исследуемого изображения. Используются вейвлеты haar, coif2, coif5, bior2.8, bior6.8, 2-ой и 6-ой уровни декомпозиции, глобальный и локальный жесткий метод пороговой обработки.

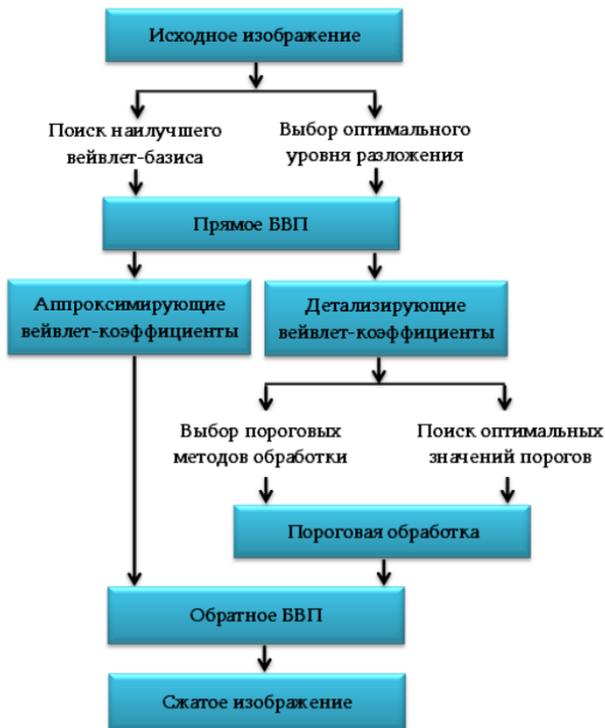


Рис.9. Алгоритм сжатия изображения на основе ВВП

На основе полученных результатов сделаны следующие выводы: 1) для сжатия изображений в наибольшей степени подходят симметричные биортогональные вейвлеты и ортогональные вейвлеты Коэфлета высокого порядка с наибольшим количеством нулевых моментов; 2) с увеличением степени сжатия ухудшается качество изображения; 3) с точки зрения сохранения качества сжатого изображения, наиболее эффективными являются метод локальной пороговой обработки и верхние уровни декомпозиции; 4) высокую степень сжатия можно обеспечить при глобальной пороговой обработке на низких уровнях декомпозиции. Так, на 6-ом уровне декомпозиции при глобальном методе обработки (Global) с применением вейвлета coif5 можно обеспечить наибольшее сжатие данного изображения: более чем в 5,4 раза (51,9 кБ). На 2-ом уровне декомпозиции

наименьший объем изображения – 75 кБ (сжатие в 3,76 раза) – получается с использованием вейвлета *biog6.8*, причем в этом случае изображение более качественное (рис. 10).



Рис. 10. Сжатое изображение объемом 51,9 кБ (а) и 75 кБ (б)

Для оценки качества сжатого изображения, по разработанному алгоритму составлена программа, определяющая пиковое значение отношения сигнал/шум (PSNR). Получены графики зависимости PSNR от пороговых значений при использовании вейвлетов *haar*, *coif5*, *biog6.8* на 2-ом и 6-ом уровнях декомпозиции. По графикам можно определить наилучшие значения порогов, при которых обеспечивается сжатие без потерь ($PSNR \geq 28$ дБ).

В четвертой главе исследованы методы улучшения вейвлетов первого поколения по лифтинг-схеме. Были модифицированы биортогональные вейвлеты *biog2.4* и *biog2.6*, а также схожие по свойствам вейвлеты Коэн-Добеши-Фово *cdf2.4* и *cdf2.6*. Улучшенные вейвлеты апробированы при восстановлении сигнала и изображения. С применением модифицированного вейвлета *LS-biog2.6* разработан новый алгоритм маркировки изображения цифровым водяным знаком.

1. Общая идея улучшения вейвлетов по лифтинг-схеме основывается на предсказании коэффициентов ВЧ (или НЧ) вейвлет-фильтра посредством модификации коэффициентов НЧ (или ВЧ) вейвлет-фильтра при помощи улучшающей последовательности. Если известны частотные функции $H(z), G(z)$ и $\tilde{H}(z), \tilde{G}(z)$ фильтров разложения и восстановления биортогональных вейвлетов, первичным элементарным шагом лифтинга является модификация следующих фильтров:

$$H(z) = H(z) - G(z)P(z^{-2}), \quad \tilde{G}(z) = \tilde{G}(z) + \tilde{H}(z)P(z^2). \quad (4)$$

При дуальном шаге модифицируются фильтры:

$$G(z) = G(z) - H(z)Q(z^2), \quad \tilde{H}(z) = \tilde{H}(z) + \tilde{G}(z)Q(z^{-2}), \quad (5)$$

где $P(z^2)$ и $Q(z^2)$ – улучшающие последовательности ($z = e^{-i\omega}$).

При модификации вейвлетов *biog2.4*, *biog2.6* и *cdf2.4*, *cdf2.6* были улучшены все четыре фильтра этих вейвлетов. Для этого получены нормированные оптимальные значения первичного и дуального шагов,

которые соответствуют лифтинг-фильтрам, а в качестве улучшающей последовательности использовался соответствующий полином Лорана.

Для восстановления тестового звукового сигнала были апробированы вейвлеты bior2.4, LS-bior2.4 и LS-cdf2.4, а для восстановления тестового изображения - вейвлеты bior2.6, LS-bior2.6 и LS-cdf2.6. Реализовано лифтинг-преобразование от 1-ого до 6-ого уровня. В качестве критерия восстановления рассчитана норма среднеквадратичной ошибки и построены графики зависимости MSE_{norm} от уровней разложения (рис.11). Результаты подтверждают эффективность модифицированных вейвлетов, при использовании которых ошибка восстановления получается в два раза меньше, чем при классических вейвлетах.

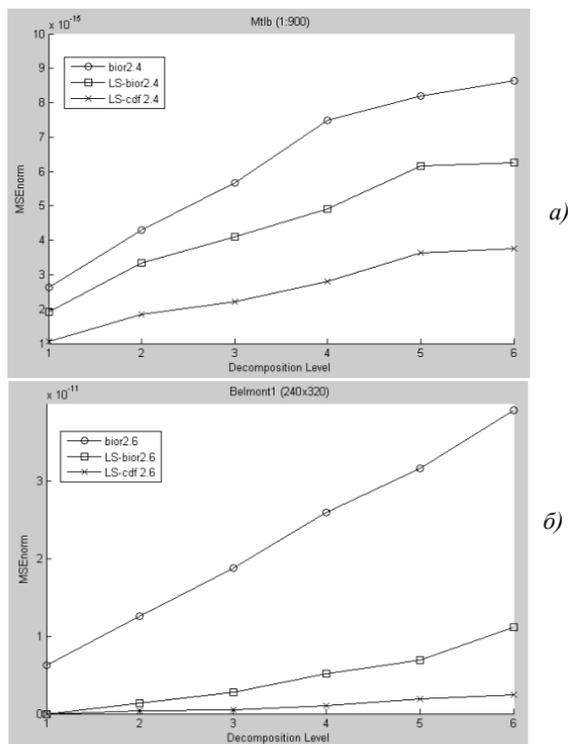


Рис.11. Зависимость ошибки восстановления сигнала (а) и изображения (б) от уровня декомпозиции с применением модифицированных вейвлетов

2. Эффективным методом для аутентификации и защиты авторских прав информации является маркировка данных цифровыми водяными знаками (ЦВЗ). На сегодняшний день существует множество методов внедрения ЦВЗ, однако требования, предъявляемые к ним одинаковы: ЦВЗ должен быть незаметным на маркированном изображении (МИ) и робастным к внешним воздействиям, что способствует его восстановлению с

приемлемым качеством. Для достижения незаметности целесообразно ЦВЗ внедрять в ВЧ область изображения, что связано с особенностями человеческого зрения. Однако этот поддиапазон более подвержен таким воздействиям как шумы, сжатие, что делает ЦВЗ менее робастным. Следовательно, важной задачей является решение данного противоречия.

Предложенный в диссертационной работе алгоритм внедрения и извлечения ЦВЗ представлен на рис.12.

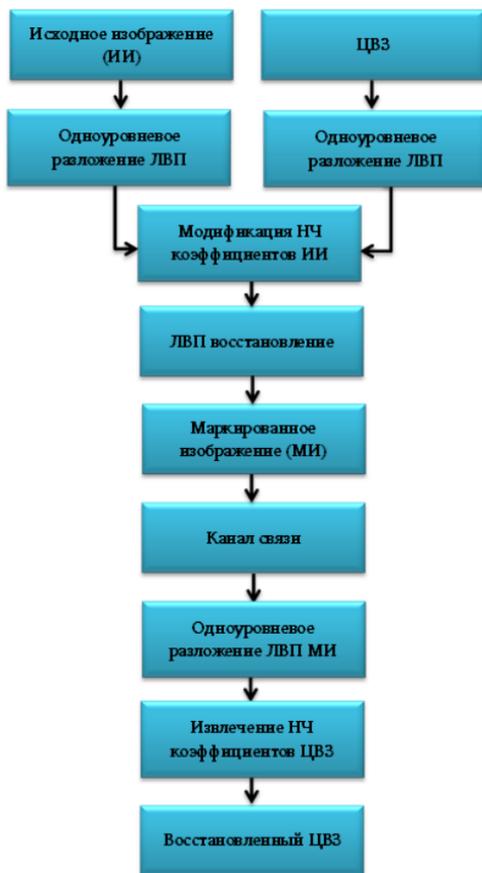


Рис.12. Алгоритм внедрения и извлечения ЦВЗ по лифтинг-схеме

Внедрение в изображение основывается на слиянии изображений аддитивным методом, при использовании модифицированного вейвлета LS-bior2.6 и одноуровневого лифтинг-преобразования (ЛВП). Для обеспечения робастности ЦВЗ внедряется в НЧ поддиапазон, модифицируя $LL_{ИИ}$ вейвлет-коэффициенты исходного изображения (ИИ):

$$LL'_{ИИ} = LL_{ИИ} + \alpha \cdot LL_{ЦВЗ}. \quad (6)$$

Для достижения незаметности подбирается необходимый коэффициент внедрения α , значения которого можно аддитивно изменять в зависимости от маркируемого изображения.

Извлечение ЦВЗ осуществляется по обратной формуле:

$$LL''_{\text{ЦВЗ}} = \frac{LL_{\text{ми}} - LL_{\text{ии}}}{\alpha}. \quad (7)$$

Составлена программа, реализующая разработанный алгоритм внедрения и извлечения ЦВЗ. Для оценки эффективности алгоритма рассчитаны PSNR маркированного изображения и maxERR восстановленного цифрового знака. Апробированы различные коэффициенты внедрения: $\alpha = 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 0.7$. Цель – выявить зависимость maxERR от коэффициента внедрения и определить оптимальные значения α , при которых $\text{PSNR} \geq 28\text{дБ}$, иначе ЦВЗ становится видимым на маркированном изображении. Для сравнения был использован модифицированный вейвлет LS-cdf2.6, а также преобразование Хаара, которое находит широкое применение при маркировке изображений вейвлетами. Рис.13 иллюстрирует зависимости пикового отношения сигнал/шум и максимальной ошибки восстановления от коэффициента внедрения при использовании вышеупомянутых вейвлетов.

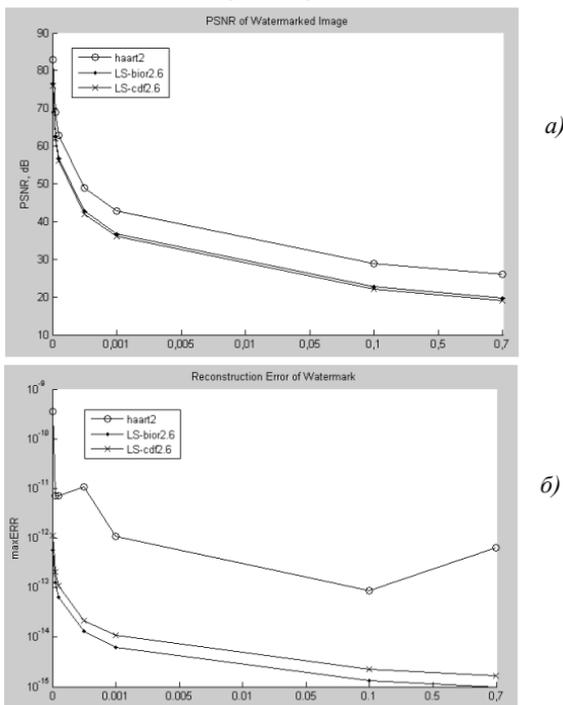


Рис.13. Зависимости пикового отношения сигнал/шум (а) и максимальной ошибки восстановления (б) от коэффициента внедрения

Результаты подтверждают действенность разработанного алгоритма и оптимальность модифицированного вейвлета, при помощи которого ЦВЗ можно восстановить на 2 порядка точнее, чем при преобразовании Хаара.

В заключении сформулированы основные теоретические и практические результаты работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Посредством сравнительного анализа, исследованы и обоснованы основные недостатки Фурье-преобразований и основные преимущества вейлет-функций [1,2].

2. Разработаны эффективные алгоритмы вейлет-анализа и синтеза радиотехнических сигналов и изображений, обеспечивающих погрешность восстановления порядка $10^{-12} \dots 10^{-15}$ [2-4].

3. На основе предложенных методов пороговой обработки и наилучших вейлет-базисов разработаны алгоритмы вейлет-фильтрации, эффективность которых подтверждается уровнями шума обработанных вейлет-коэффициентов [2-7].

4. На основе предложенных алгоритмов, разработана компьютерная модель восстановления и фильтрации одномерных сигналов в режиме реального времени, которая обеспечивает среднеквадратичную ошибку восстановления, не превышающую значение $2 \cdot 10^{-11}$.

5. Разработан алгоритм вейлет-сжатия изображений без потерь, при помощи которого исследуемый сигнал объемом 282 кБ удалось сжать более чем в 3,7 раза (75 кБ) с использованием биортогонального вейвлета bior6.8 на втором уровне декомпозиции [4,6]. Причем полученные результаты сопоставимы со стандартами JPEG2000, где сжатие без потерь вейлетом bior5.3 не превышает 2...5 раз.

6. Реализована модификация вейвлетов первого поколения bior2.4, bior2.6 и cdf2.4, cdf2.6 по лифтинг-схеме. Эффективность улучшенных вейвлетов подтверждается ошибками восстановления исследуемого сигнала и изображения, значения которых в 2 раза меньше, по сравнению с классическими вейвлетами [8].

7. Разработан новый алгоритм маркировки изображения цифровым водяным знаком, в котором используется быстрое вейлет-преобразование по лифтинг-схеме, метод слияния изображений по аддитивному механизму и модифицированный вейлет LS-bior2.6. Эффективность представленного алгоритма подтверждается отношением сигнал/шум маркированного изображения и среднеквадратичной ошибкой восстановления цифрового знака, значение которой на 2 порядка меньше, по сравнению с широко распространенным преобразованием Хаара [8].

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Бадалян Б.Ф., Гомцяц С.Г. Эффективные методы спектрального анализа сложных сигналов // Материалы 12-й Междунар. молод. научн.-техн. конф. "Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2016", 14-18 ноября 2016г. – Севастополь, 2016. – С. 141.

2. Бадалян Б.Ф., Гомцяц О.А., Гомцяц С.Г. Вейвлет-анализ кардиосигналов в среде MatLab // Известия ВУЗ-ов России: Радиоэлектроника. – СПб., 2017. – №6 – С.5-9.

3. Бадалян Б.Ф., Гомцяц О.А., Гомцяц С.Г. Вейвлет-компрессия и очистка изображений в пакете WAVELET TOOLBOX // Вопросы радиоэлектроники. Серия "Техника телевидения". – СПб., 2017. – Вып. 4. – С. 60-66.

4. Գումցյան Ս.Գ., Մարգարյան Ս.Ս., Բաղդասյան Բ.Ֆ., Գումցյան Հ.Ս. Ազդանշանների գումումը WAVELET TOOLBOX միջավայրում // ՀԱՊՀ Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու. – Երևան: Ճարտարագետ, 2017. – Մաս 1 – Էջ 395-400:

5. Бадалян Б.Ф., Гомцяц С.Г. Восстановление двумерных сигналов с применением вейвлет-технологий // Материалы 13-й Междунар. молод. научн.-техн. конф. "Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2017", 20-24 ноября 2017г. – Севастополь, 2017. – С. 191.

6. Գումցյան Ս.Գ. Ռադիոտեխնիկական ազդանշանների վերլուծություն Ֆուրյե-շարքերով և վեյվլետ-ֆունկցիաներով // ՀԱՊՀ Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու. – Երևան: Ճարտարագետ, 2018. – Մաս 1. – Էջ 284-292:

7. Գումցյան Ս.Գ. Երկչափ ազդանշանների վերականգնումը և սեղմումը վեյվլետ-ստեխնոլոգիաների կիրառմամբ // ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. Տեխնիկական գիտությունների սերիա. – 2018. – Հ. 71, №2. – Էջ 162-170:

8. Гулян А.Г., Гомцяц С.Г., Бадалян Б.Ф. Вейвлет-обработка сигналов и изображений модифицированными вейвлетами // Электронный научный журнал "Век качества". – Москва, 2018. – №4. – С. 81-97. Режим доступа: <http://www.agequal.ru/pdf/2018/418006.pdf> (доступ свободный).

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Ֆուրիե-շարքերը և դրանց վրա հիմնված ձևափոխության մեթոդները, անկախ իրենց ակնհայտ թերությունների, այժմ էլ ընկած են գիտության և տեխնիկայի նոր և առաջատար ոլորտների հիմքում: Սակայն Ֆուրիե-ձևափոխությունները պատկերացում են տալիս ազդանշանի մասին միայն հաճախականային տիրույթում և լավ չեն ներկայացնում ոչ պարբերական ազդանշանների տեղային առանձնահատկությունները: Ուստի վերլուծության համար առաջանում է այլ տեսակի ֆունկցիաների անհրաժեշտություն, որոնք տեղայնացված են ինչպես ժամանակի, այնպես էլ տարածության մեջ: Սկզբունքային նոր բազիսների հիման վրա կառուցվող վեյվլետ-ֆունկցիաները, իրենց առանձնահատկությունների շնորհիվ, վերջին տասնամյակներում գտնում են գործնական կիրառություն նաև կապի համակարգի տարբեր ոլորտներում՝ բարդ ազդանշանների և պատկերների նուրբ առանձնահատկությունների բացահայտման, վերլուծման և վերականգնման, սեղմման և աղմուկներից մաքրման գործընթացում: Դա կարող է ապահովել ազդանշանների ավելի որակյալ հաղորդում և ընդունում: Ուստի, վեյվլետ-տեխնոլոգիաների ներդրումը ժամանակակից կապի համակարգերում համարվում է արդիական խնդիր:

Աշխատանքի նպատակն էր ցույց տալ, որ վեյվլետները իր հատկությունների շնորհիվ ամենևին էլ չեն զիջում ազդանշանների ավանդական դարձած Ֆուրիե-վերլուծության ապարատին, իսկ որոշ հարցերում անհամեմատելի արդյունավետ են, ինչպես նաև առաջարկել կապի ոլորտում վեյվլետ-տեխնոլոգիաների կիրառման առավել օպտիմալ եղանակներ, ազդանշանների մշակումը արդյունավետ դարձնելու համար: Սույն նպատակն իրագործելու համար կատարվել են մի շարք հետազոտություններ և մշակումներ, որոնց հիմանական արդյունքները ներկայացվել են առենախոսությունում.

1. MATLAB և Mathcad միջավայրում հետազոտվել և հիմնավորվել են Ֆուրիե-ձևափոխության հիմնական թերությունները և վեյվլետ-ֆունկցիաների հիմնական առավելությունները՝ համեմատական վերլուծություն իրականացնելով:

2. Մշակվել են ռադիոտեխնիկական ազդանշանների և պատկերների վեյվլետ-վերլուծման և վերականգնման արդյունավետ ալգորիթմներ, որոնց շնորհիվ կարելի է ապահովել ազդանշանների և պատկերների վերականգնման $10^{-12} \dots 10^{-15}$ կարգի սխալանքներ:

3. Մշակվել են լավագույն վեյվլետ-բազիսներ և օպտիմալ շեմային մեթոդներ կիրառող վեյվլետ-գտման ալգորիթմներ, որոնց

արդյունավետության մասին վկայում են վեյվլետ-գործակիցների աղմուկների գնահատված մակարդակները:

4. MATLAB R2013a-ի DSP System Toolbox V.8.4 միջոցներով մշակվել է նաև միաչափ ազդանշանների վերականգնման և աղմուկներից մաքրման համակարգչային մոդել, որն ապահովում է $2 \cdot 10^{-11}$ արժեքը չգերազանցող միջին քառակուսային սխալանք:

5. Մշակվել է առանց որակի զգալի անկման վեյվլետ-սեղման ալգորիթմ, որի օգնությամբ հետագոտվող պատկերը հաջողվեց սեղմել ավելի քան 3,7 անգամ՝ bior6.8 վեյվլետի կիրառմամբ: Ստացված արդյունքները համեմատելի են JPEG2000-ում նախատեսված առանց կորուստի պատկերների սեղմման ստանդարտներին, որտեղ իրականացվում է սեղմում $2 \dots 5$ անգամ՝ bior5.3 վեյվլետի կիրառմամբ:

6. Իրականացվել է bior2.4, bior2.6 և cdf2.4, cdf2.6 վեյվլետների մոդիֆիկացում լիֆտինգ-սխեմայով: Բարելավված վեյվլետների արդյունավետության մասին վկայում են ազդանշանների և պատկերների վերականգնման սխալանքների արժեքները, որոնք 2 անգամ փոքր են դասական վեյվլետներով ստացված արդյունքներից:

7. Մշակվել է պատկերների՝ ջրանիշով մակնշման նոր ալգորիթմ, որը կիրառում է արագ վեյվլետ-ձևափոխություն լիֆտինգ-սխեմայով և պատկերների միաձուլման մեթոդ ադիտիվ մեխանիզմով: ԼԿՁ-ն իրականացվում է բարելավված LS-bior2.6 վեյվլետով: Մշակված ալգորիթմի արդյունավետության մասին վկայում են մակնշված պատկերի ազդանշան/աղմուկ հարաբերությունը և վերականգնված ջրանիշի միջին քառակուսային սխալանքը, որի արժեքը մոտ 2 կարգ փոքր է տվյալ գործընթացում մեծ կիրառություն ստացած Հաարայի ձևափոխության արդյունքներից:

Svetlana Gomtsyan

RESEARCH AND IMPROVEMENT OF WAVELET-SIGNAL PROCESSING METHODS IN COMMUNICATION SYSTEMS

SUMMARY

Fourier series and their transformation methods, despite their obvious disadvantages, are still lying in the fields of many new and advanced fields of science and technology. However, Fourier transforms represent the signal only in the frequency domain and do not represent the local specifications of non-periodic signals. Therefore there is the need for other types of analysis functions that are localized in both time and space. Wavelet-functions are built on the new principal bases and, thanks to their peculiar properties, have been finding their practical application in various areas of the communication system in the process of

detecting the subtle features, analyzing and restoring, compressing and denoising of complex signals and images. It can provide better signal transmission and reception. Thus, the introduction of wavelet-technology in modern communication systems is considered an urgent problem.

The purpose of the work is to show that, thanks to their peculiarity, the wavelets are not inferior to the traditional Fourier analysis apparatus, and in some cases are incomparably more effective, as well as to offer the most optimal ways of use the wavelet-technology in the field of communication to make the signal processing more efficient. To accomplish this goal, a number of research and development has been done, the main results of which are presented in the thesis:

1. Through comparative analysis, the main disadvantages of Fourier transforms and the main advantages of wavelet-functions were investigated and substantiated in the MATLAB and Mathcad software environments.

2. Efficient algorithms for wavelet-analysis and synthesis of radio-technical signals and images have been developed, that provide a root-mean-square error of the reconstruction of the order of $10^{-12} \dots 10^{-15}$.

3. Based on optimal threshold processing methods and the best wavelet-bases, wavelet filtering algorithms have been developed, the effectiveness of which was estimated by the noise levels of the processed wavelet coefficients.

4. Based on the proposed algorithms, with the help of MATLAB R2013a DSP System Toolbox V.8.4, a computer model for real-time reconstruction and filtering of one-dimensional signals has been developed, which provides a root-mean-square error of the restoration not exceeding $2 \cdot 10^{-11}$.

5. An image lossless compression algorithm has been developed by which the analyzed signal with size 282 kB was compressed more than 3.7 times (75 kB) using the bior6.8 biorthogonal wavelet at the second level of decomposition. Moreover, the obtained results are comparable with the JPEG2000 standards, where lossless compression does not exceed 2...5 times using the wavelet bior5.3.

6. The modification of the first generation wavelets bior2.4, bior2.6 and cdf2.4, cdf2.6 has been implemented according to the lifting scheme. The efficiency of the improved wavelets was confirmed by values of the reconstruction errors of the analyzed signals and images, which are twice smaller than the results obtained by classic wavelets.

7. A new algorithm for marking an image with a digital watermark has been developed, which uses a fast wavelet transform according to a lifting scheme, images fusion method using an additive mechanism and a modified LS-bior2.6 wavelet. The efficiency of the presented algorithm was confirmed by the signal-to-noise ratio of the marked image and the root-mean-square error of the reconstruction of the digital watermark, the value of which is two orders less than that obtained by the Haar-transform, which has found wide application in this field.

