

На правах рукописи



БУЗЫКАНОВ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА
ВЕСОВОГО ПРОСТРАНСТВА СОБОЛЕВА,
ПОВЫШАЮЩИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ**

Специальность: 05. 13. 01 -

“Системный анализ, управление и обработка информации
(технические системы)”

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Рязань 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный консультант

доктор технических наук, профессор

Кириллов Сергей Николаевич

Официальные оппоненты:

Рапопорт Лев Борисович - доктор физико-математических наук, профессор, зав. лабораторией динамики нелинейных процессов управления Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г.Москва

Кузнецов Алексей Евгеньевич - доктор технических наук, профессор, зам. директора НИИ «Фотон» при Рязанском государственном радиотехническом университете

Соловьева Елена Борисовна - доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой ТОЭ Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета им. В.И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ»

Ведущая организация

ОАО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем», г.Москва

Защита состоится "09" октября 2013 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.01 при ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

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

Автореферат разослан " ____ " _____ 2013 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1, ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Ученый секретарь

диссертационного совета

канд. техн. наук, доцент



В.Н. Пржегорлинский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Качество и эффективность функционирования современных цифровых систем обработки информации (СОИ) в значительной степени определяются алгоритмами, применяемыми при дискретной обработке сигналов. Весомый вклад в этой области внесли как отечественные ученые - Котельников В.А., Гоноровский И.С., Коршунов Ю.М., Василенко Г.И., Галушкин А.И., Цыпкин Я.З., Воронов А.А., Мышкис А.Д., Гельман Б.Д. и др., так и зарубежные - Шеннон К., Дженкинс Г., Ваттс Д., Марпл-мл С.Л., Рабинер Л., Голд Б., Шафер Р.В., Вудс Р., Гонсалес Р., Прэтт У., Мала С., Добеши И. и др. Широкое распространение получили алгоритмы дискретной спектральной обработки сигналов и случайных процессов (СП), используемые в системах обработки и передачи информации. Основными задачами при этом являются повышение эффективности оценок спектральной плотности мощности (СПМ) случайных процессов, снижение ошибки вычислений при применении дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ), улучшение характеристик работы алгоритмов на основе вейвлет-преобразования, разработка помехоустойчивых дискретных систем обработки, а также повышение устойчивости алгоритмов обработки информации к действию различных мешающих факторов.

Основой всех современных систем дискретной обработки информации является теорема В.А. Котельникова, устанавливающая возможность точного восстановления мгновенных значений сигнала с ограниченным по частоте спектром исходя из отсчетных значений, взятых через равные промежутки времени. Основными объектами исследования, для которых данная теорема является критической, являются системы обработки речевой и телеметрической информации, когда ошибка при выборе частоты дискретизации приводит к нарушению работоспособности всей системы. Однако при практической реализации данной теоремы и ее различных модификаций перед разработчиком СОИ встают проблемы, связанные с тем, что спектр ограниченного во времени сигнала бесконечен в частотной области; идеальный низкочастотный фильтр, требуемый для точного восстановления сигнала, физически нереализуем; число отсчетов сигнала ограничено. В результате при практической реализации теоремы отсчетов В.А. Котельникова возникают ошибки наложения, вызванные нефинитностью спектра сигнала; усечения, обусловленные конечным числом отсчетов, и округления, связанные с неточностью представления отсчетных значений в цифровом виде. В частности, в системах обработки изображений появляются нелинейные искажения, заметные пользователю, которые мо-

гут существенно снизить эффективность СОО. Эти ошибки наиболее значительно проявляются при обработке информации в пространстве L_2 , в котором вводится ограничение только на энергию сигнала, и при наличии таких мешающих факторов, как некорректность задания частоты дискретизации, неточность измерения обрабатываемой функции, наличие аддитивных и мультипликативных шумов и т.д., это приводит к физически нереализуемым характеристикам СОО.

Данное обстоятельство показывает необходимость перехода к дискретным алгоритмам обработки в пространстве, более полно учитывающем характеристики реальных информационных сигналов и систем. Примером такого пространства является пространство Соболева, накладывающее, кроме ограничения на энергию сигнала, дополнительное ограничение на энергию производной. В связи с этим для повышения эффективности функционирования цифровых СОО необходимо решить задачу разработки методов и алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС) и СП в пространстве Соболева W_2^1 .

Расширением теории анализа Фурье является обобщенное представление обрабатываемой информации, одним из вариантов которого выступает теория ортогональных многочленов. При этом для более компактного представления необходимо максимально учитывать всю имеющуюся информацию о сигнале и, в частности, информацию о характеристиках его изменения, которая может быть представлена, например, в виде отсчетов его производной. Поэтому актуальной является задача разработки методов обобщенного представления обрабатываемых сигналов, учитывающих различную дополнительную информацию в системах обработки телеметрических сигналов и результатов измерений.

Наряду с ошибками дискретной обработки, на точность восстановления информации оказывают значительное влияние различные шумы, действующие в каналах обработки и передачи. При этом снижение влияния этих шумов также возможно за счет использования кроме информации об отсчетах сигнала дополнительной информации в виде значений его производной в точках отсчета. Для этого необходимо рассмотреть как модификацию классических алгоритмов, так и разработку новых методов фильтрации с синтезом собственных оптимизированных фильтров. Наиболее распространенным критерием при синтезе фильтров в системах обработки информации является критерий минимума среднеквадратической ошибки (СКО) восстановления информационного сигнала. Однако использование отсчетов сигнала и его производной позволяет, при условии идеального

восстановления, синтезировать коэффициент передачи фильтра, оптимальный по критерию минимума дисперсии шума на выходе системы обработки. Это условие при отсутствии или ограниченной априорной информации о спектральных характеристиках шума не приводит к дополнительному искажению сигнала на выходе. Для оценки влияния ошибки округления на форму восстановленного сигнала также необходимо исследовать алгоритмы снижения шумов квантования при цифровой обработке в пространстве Соболева W_2^1 .

В настоящее время одним из наиболее бурно развивающихся направлений по обработке различной информации является вейвлет-обработка. Причина этого кроется в возможности более корректной обработки нестационарных случайных процессов, яркими представителями которых являются звуковые сигналы и видеоизображения. Развитие теории вейвлет-преобразования позволило существенно повысить качество ЦОС, создать новые методы и системы сжатия и фильтрации изображений, речевых и телеметрических сигналов. При этом важной задачей является разработка методов построения вейвлет-функций, позволяющих наиболее компактно представлять обрабатываемые сигналы в современных СОИ, использующих вейвлет-преобразование. В данном случае объектами исследования являются системы сжатия речи и изображений, а также системы распознавания. Одним из путей решения этой задачи может быть вейвлет-обработка информации в весовом пространстве Соболева (ВПС) W_2^1 , что приводит к необходимости разработки методов и алгоритмов получения ортогональных и биортогональных в ВПС вейвлет-функций и исследования их свойств.

Таким образом, актуальной является задача разработки и исследования методов и алгоритмов ЦОС с использованием отсчетов сигнала и его производной с целью повышения эффективности функционирования СОИ и снижения влияния различных мешающих факторов.

Цель и задачи работы. Основной целью работы являются разработка и исследование методов и алгоритмов цифровой обработки информации на основе представления в ВПС с использованием дополнительных сведений в виде отсчетов производной, обеспечивающих повышение эффективности функционирования СОИ и устойчивости к действию различных мешающих факторов.

Поставленная цель работы включает решение следующих задач:

- разработка и исследование методов и алгоритмов дискретной спектральной обработки информации в ВПС W_2^1 ;

- разработка и исследование методов и алгоритмов дискретного спектрального анализа СП в ВПС W_2^1 ;
- разработка и исследование методов обобщенной спектральной обработки информации в ВПС;
- разработка методов построения ортогональных и биортогональных в ВПС вейвлет-функций и исследование особенностей их применения для цифровой обработки информации;
- разработка и исследование методов и алгоритмов фильтрации информации в весовом пространстве Соболева;
- синтез коэффициентов передачи двухканальной дискретной системы обработки с использованием отсчетов сигнала и его изменения, оптимальных по критерию минимума дисперсии аддитивного шума на выходе при условии идеального восстановления сигнала.

Весь этот комплекс актуальных задач характеризуется как теоретическое обобщение и решение крупной научно-технической проблемы, имеющей важное хозяйственное значение и направленной на разработку новых и совершенствование существующих методов и средств анализа обработки информации, повышение эффективности функционирования и помехоустойчивости СОИ.

Методы исследований. В работе использовались методы математической статистики, вариационного и матричного исчисления, вычислительной математики и теории вейвлет-функций. Данные теоретические методы сочетались с экспериментальными исследованиями на основе имитационного моделирования.

Научная новизна. В рамках данной диссертационной работы получены следующие новые научные результаты.

- Разработан метод вычисления дискретного спектра сигнала в весовом пространстве Соболева W_2^1 , позволяющий снизить ошибки наложения, а также уменьшить влияние аддитивных шумов и шумов квантования при цифровой обработке сигналов.

- Получен аналог дискретной теоремы Винера - Хинчина в весовом пространстве Соболева W_2^1 с использованием отсчетов автокорреляционной функции (АКФ) и отсчетов взаимной корреляционной функции (ВКФ) СП и его производной.

- Предложен алгоритм вычисления сглаженных оценок СПМ и синтезированы оптимальные сглаживающие окна в весовом пространстве Соболева W_2^1 , позволяющие получить более эффективные оценки СПМ СП.

- Разработаны и исследованы алгоритмы обобщенного спектрального представления информационных сигналов на основе ортогональных в ве-

совом пространстве Соболева многочленов Лежандра.

- Разработаны и исследованы методы синтеза ортогональных и биортогональных в весовом пространстве Соболева вейвлет-функций, а также рассмотрены варианты их практического применения.

- Разработаны методы и алгоритмы фильтрации сигналов в весовом пространстве Соболева W_2^1 .

- Исследован алгоритм двухканальной дискретной обработки с использованием отсчетов сигнала и его производной, удовлетворяющий условию идеального восстановления при минимуме дисперсии шума на выходе системы.

- Проанализирован алгоритм двухканальной дискретной обработки с использованием отсчетов сигнала и его производной, а также синтезированы коэффициенты передачи интерполирующих фильтров, обеспечивающие минимум СКО сигнала на выходе системы.

Практическая значимость и внедрение результатов работы.

Представленные в работе методы и алгоритмы обработки с использованием отсчетов сигнала и его изменения могут быть использованы в помехоустойчивых СОИ. Реализация результатов исследований позволит повысить технические характеристики устройств передачи и обработки информации, что обеспечит улучшение показателей качества функционирования СОИ, а также снизит чувствительность к влиянию различных мешающих факторов.

Результаты диссертационной работы нашли применение в практических разработках для ОАО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем», ЗАО «Научно-технический центр системного моделирования», ООО «Центр спутниковой связи», локомотивного депо Рыбное и ООО ОКБ «Автоматизированные системы и приборы», что подтверждено соответствующими актами.

Основные положения, выносимые на защиту

- Методы и алгоритмы вычисления дискретного спектра сигнала и оценки СПМ стационарного случайного процесса в ВПС W_2^1 , позволяющие снизить частоту дискретизации в 2 раза в каждом канале обработки и уменьшить СКО, определяемую влиянием шумов квантования, в 2...3 раза по сравнению с классическими методами и алгоритмами в пространстве L_2 .

- Методы синтеза ортогональных и биортогональных в весовом пространстве Соболева вейвлет-функций, обеспечивающих выигрыш в степени концентрации энергии в низкочастотной области для реалистичных изображений порядка 3...8 % и повышение качества фильтрации телеметрических сигналов на 10...15 % по сравнению с аналогичными алгоритмами в пространстве L_2 .

- Методы фильтрации информационных сигналов в весовом пространстве Соболева, позволяющие повысить качество обрабатываемого речевого сигнала (РС) на 0.2...1 балл при низкочастотной фильтрации и на 10...15 % снизить уровень шумов при вейвлет-фильтрации по сравнению с аналогичными алгоритмами в пространстве L_2 .
- Алгоритм двухканальной дискретной обработки с использованием отсчетов сигнала и его изменения, удовлетворяющий критерию идеального восстановления сигнала при минимуме дисперсии шума на выходе системы, обеспечивающий выигрыш до 50 % по дисперсии шума на выходе по сравнению с известными двухканальными системами обработки и до 10 % по сравнению с одноканальными системами, использующими фильтр Винера на выходе.
- Процедура синтеза коэффициентов передачи интерполирующих фильтров двухканальной дискретной системы с использованием отсчетов сигнала и его изменения, минимизирующих среднеквадратическую ошибку восстановления информационного сигнала на выходе.

Вклад автора в разработку проблемы. Выносимые на защиту положения предложены соискателем в ходе выполнения научно-исследовательских работ на кафедре радиопреимущества и связи Рязанского государственного радиотехнического университета в период с 2000 по 2011 гг. В научных работах лично соискателем предложены основные идеи синтезированных методов и алгоритмов, проведено их теоретическое обоснование, выполнены качественное и количественное исследование синтезированных моделей и алгоритмов, а также практическая реализация методов и имитационное моделирование на ЭВМ.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- Пятая МНТК "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика". Москва, 1999.
- Международная молодежная научно-техническая конференция "XXV Гагаринские чтения". Москва, 1999.
- 36-я НТК РГРТА. Рязань, 2000.
- Международная НТК "Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций". Материалы конференции. Рязань, 2000, 2001, 2002, 2010, 2011.
- 3, 5, 13-я Международная конференция и выставка "Цифровая обработка сигналов и ее применение". Москва, 2000, 2003, 2011.
- Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов "Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании". Рязань, 2001, 2002, 2003, 2010.

- Международная конференция "В.А.Котельников и его роль в развитии радиоэлектроники". Москва, 2003.
- II Всероссийская научно-техническая конференция "Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий", посвященная 100-летию со дня рождения М.С. Рязанского. Москва, 2009.
- VII научно-практическая конференция "Микротехнологии в авиации и космонавтике". Москва, 2009.
- III, IV Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». Москва, 2010, 2011.
- IX международная научно-техническая конференция "Перспективные технологии в средствах передачи информации ПТСПИ-2011". Владимир, 2011.
- The 19th International Conference on Systems, Signals and Image Processing IWSSIP 2012. Vienna, Austria, 2012.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 72 работы. Из них 1 монография, 1 патент, 22 статьи в центральной печати из списка ВАК, 8 статей в научно-технических журналах и межвузовских сборниках трудов, 36 тезисов докладов на конференциях, 4 учебно-методических пособия. Материалы исследований, связанных с диссертацией, представлены более чем в 15 отчетах о НИР.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 204 наименований и 5 приложений. Диссертация содержит 416 с., в том числе 297 с. основного текста, 14 таблиц и 225 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, дан обзор состояния вопроса, сформулированы цель и задачи исследований, показаны научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена синтезу и исследованию методов и алгоритмов спектральной обработки информации в весовом пространстве Соболева. На основе проведенного обзора литературы было показано, что использование при ЦОС дополнительной информации в виде отсчетов производной позволяет получать более устойчивые решения, робастные к воздействию различных мешающих факторов. В связи с этим предлагается проводить ЦОС в ВПС W_2^1 , которое определяется нормой и произведением функций $f(t)$ и $g(t)$ в виде

$$\|f\|_w = \left[(1-\alpha) \int_T |f(t)|^2 dt + \alpha \int_T \left| \frac{df(t)}{dt} \right|^2 dt \right]^{1/2}, \quad (1)$$

$$\langle f(t), g(t) \rangle_w = (1-\alpha) \int_T f(t)g(t)dt + \alpha \int_T \frac{df(t)}{dt} \frac{dg(t)}{dt} dt, \quad (2)$$

где $0 \leq \alpha < 1$ - параметр весового пространства.

На основании данного определения проведен синтез алгоритмов спектральной обработки детерминированных сигналов

$$S_w(w) = \frac{1}{2\pi((1-\alpha) + \alpha w^2)} \int_{-\infty}^{\infty} \left[(1-\alpha)f(t) - j\alpha w \frac{df(t)}{dt} \right] \exp(-j\omega t) dt, \quad (3)$$

где $S_w(w)$ - спектр функции $f(t)$. Таким образом, при аналоговом представлении сигнала спектр в ВПС совпадает со спектром в пространстве L_2 . Реализация алгоритмов цифровой обработки требует представления исходного детерминированного сигнала в дискретном виде. Эту задачу традиционно решают на основе теоремы В.А. Котельникова, которая определяет частоту дискретизации F_k как удвоенную максимальную частоту спектра сигнала $F_{\max}$. В случае отсутствия априорной информации о $F_{\max}$ завышение $F_d > 2F_{\max}$ приводит к увеличению времени обработки сигнала, а заниженное значение $F_d < 2F_{\max}$ вызывает появление искажений сигнала за счет наложения "зеркальных" спектров в частотной области.

Показано, что при дискретной обработке сигналов выражение (3) принимает вид

$$S_w(k) = \frac{1}{N \left[(1-\alpha) + \alpha \left(\frac{2\pi}{N} k \right)^2 \right]} \sum_{n=0}^{N-1} \left[(1-\alpha)f(n) - j\alpha \frac{2\pi}{N} k f'(n) \right] \exp(-j \frac{2\pi}{N} nk), \quad (4)$$

где $f(n)$ - отсчеты сигнала, $f'(n)$ - отсчеты производной, т.е. дискретные спектры в пространствах W_2^1 и L_2 различаются. При этом наличие весового частотно-зависимого коэффициента перед знаком суммы в выражении (4) приводит к нарушению периодичности структуры спектра в ВПС W_2^1 , что позволяет существенно снизить ошибку наложения.

Как показали исследования, дискретное преобразование Фурье в ВПС имеет меньшую, чем в случае обработки сигналов в пространстве L_2 , чувствительность к изменению верхней частоты спектра сигнала при заданных предельных значениях нормированной СКО и максимальной ошибки вычисления. Основной особенностью и отличительной чертой предлагаемого алгоритма вычисления спектра является возможность снижения частоты дискретизации в каналах обработки в два раза по сравнению с частотой В.А. Котельникова без существенного увеличения ошибки.

Проведены исследования ошибок, возникающих при спектральной обработке информации в ВПС, и получены уравнения, позволяющие определить оптимальное значение коэффициента α , минимизирующего данные ошибки. Разработаны и исследованы алгоритмы минимизации ошибки вычисления, вызванной эффектом наложения спектров при частоте дискретизации, меньшей частоты В.А. Котельникова F_k . Также проведены исследования влияния на точность определения спектра аддитивных шумов, действующих в устройствах ЦОС, и показано, что предлагаемый алгоритм позволяет существенно снизить эффект их воздействия. Синтезирован алгоритм спектральной обработки в ВПС на основе быстрого преобразования Фурье и показано, что применение обработки в ВПС позволяет снизить на 15 % СКО, обусловленную аддитивными шумами на выходе системы обработки.

Результаты исследований для сигнала с существенными высокочастотными составляющими показали, что при использовании выражения (4) для $F_d = 0.6F_k$ выигрыш по сравнению с алгоритмом вычисления спектра сигнала в пространстве L_2 составляет по критерию СКО ε -230 %, а по критерию максимальной ошибки Δ - 70 %. В случае использования вместо производной первой разности сигнала выигрыш снижается и составляет по ε -25 %, а по Δ -13 %. Для фиксированного значения СКО $\varepsilon=0.2$ возможно снижение частоты дискретизации F_d по сравнению с алгоритмом вычисления спектра сигнала в пространстве L_2 для рассмотренных алгоритмов соответственно на 37 % и 7 %; а для значения максимальной ошибки $\Delta=0.15$ уменьшение F_d составит соответственно 30 % и 18 %.

Разработаны и исследованы методы спектральной обработки эргодических случайных процессов в ВПС. Получено обобщение теоремы Винера - Хинчина на ВПС и показана возможность снижения частоты дискретизации в каналах обработки в два раза. Показано, что выражение для оценки СПМ стационарного СП в ВПС W_2^1 имеет вид

$$G_W(w) = 2C^2 \int_{-\infty}^{\infty} \left[(1-\alpha)^2 B(\tau) - 2j\alpha w(1-\alpha) B'(\tau) - \alpha^2 w^2 B''(\tau) \right] \exp(-jw\tau) d\tau, \quad (5)$$

где $B(\tau)$, $B'(\tau)$, $B''(\tau)$ - корреляционная функция сигнала, ее первая и вторая производная соответственно, и при аналоговой обработке сводится к теореме Винера - Хинчина в пространстве L_2 . При дискретной обработке СП выражение (5) преобразуется к виду

$$G_W(k) = 2C_k^2 \sum_{n=0}^{N-1} \left[(1-\alpha)^2 B(n) - 2j\alpha \frac{2\pi}{N} k(1-\alpha) B'(n) - \alpha^2 \left(\frac{2\pi}{N} k \right)^2 B''(n) \right] \times \\ \times \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} kn\right) \quad (6)$$

и отличается от соответствующего выражения для дискретной формы представления СПМ в пространстве L_2 . Доказано, что выражение (6) является робастным к изменению верхней частоты СПМ случайного процесса. Для СП с существенными высокочастотными составляющими показано, что при уменьшении частоты дискретизации до $0.5F_k$ СКО оценки СПМ в ВПС W_2^1 увеличивается на 1 %, а в пространстве L_2 на 32 %.

В ходе научных исследований доказано, что оценка СПМ (6) является несостоятельной и требует дополнительного сглаживания. Предложен алгоритм получения сглаженных оценок СПМ

$$\bar{G}_W(w) = 2C^2 \int_{-\infty}^{\infty} [(1-\alpha)\Theta_0(\tau)B(\tau) - 2jw\alpha(1-\alpha)\Theta_1(\tau)B'(\tau) - \alpha^2w^2\Theta_2(\tau)B''(\tau)] \exp(-jw\tau) d\tau, \quad (7)$$

где $\Theta_0(\tau)$, $\Theta_1(\tau)$, $\Theta_2(\tau)$ - корреляционные окна. Из условия минимизации СКО оценки СПМ $\bar{G}_W(w)$ получены оптимальные сглаживающие окна:

$$g_{0opt}(w) = A_0w^4 + B_0w^2 + C_0; \quad (8)$$

$$g_{1opt}(w) = A_1w^2 + B_1 \frac{1}{D_1w^2 + 1} + C_1; \quad (9)$$

$$g_{2opt}(w) = A_2w^2 + B_2 + \frac{C_2w^4 + D_2w^2 + E_2}{F_2w^6 + G_2w^4 + I_2w^2 + 1}. \quad (10)$$

Как показали исследования, применение алгоритмов сглаживания в ВПС W_2^1 позволяет получать более эффективные оценки СПМ стационарного СП, чем в пространстве L_2 . СКО, рассчитанная при использовании формулы (7), в случае оптимального выбора коэффициента α и нормированной ширины окон уменьшилась по сравнению с ошибкой в пространстве L_2 более чем на 10 %. Это объясняется более гибким использованием в ВПС W_2^1 спектральных окон $g_0(w)$, $g_1(w)$, $g_2(w)$ в разных диапазонах спектрального анализа по сравнению с оптимальным спектральным окном в пространстве L_2 .

Проведено исследование влияния ошибок квантования на точность вычисления СПМ и показано, что обработка стационарных СП в ВПС позволяет снизить мощность шумов квантования на выходе цифровой системы обработки при одном числе уровней квантования по сравнению с пространством L_2 . Так, при восьми уровнях квантования ошибка по критерию СКО в пространстве W_2^1 снижается на 50 %, а по критерию максимальной ошибки - более чем в два раза. Применение алгоритма (6) при обработке СП позволяет при одинаковой СКО оценки СПМ $\varepsilon = 0.25$ почти в два раза снизить число уровней квантования.

Во второй главе исследованы методы аппроксимации, интерполяции и экстраполяции сигналов в ВПС. На основании определения (2) синтезированы ортогональные в ВПС полиномы Лежандра и показано, что при представлении многочленами простейших функций вида x^n в ВПС W_2^1 наблюдается существенный, в 2...4 раза, выигрыш в точности представления по сравнению с пространством L_2 при одном и том же числе отсчетов N . При аппроксимации синусоидальных сигналов ортонормированными многочленами Лежандра для пространства W_2^1 вне зависимости от исследуемой аналитической функции имеется минимум, обеспечивающий выигрыш в 25...50 % по сравнению с многочленами в пространстве L_2 .

При аппроксимации сложной функции исследованы ошибки двух типов: по критерию минимума СКО

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} (f(n) - \hat{f}(n))^2} / E, \quad (11)$$

где E - энергия сигнала, а также по критерию минимума максимальной ошибки восстановления

$$\Delta = \max \left(|f(n) - \hat{f}(n)| \right) / \sqrt{E}. \quad (12)$$

Показано, что для этих двух критериев ошибок при $\alpha = 0.04$ имеется четко выраженный максимум. При этом выигрыш по сравнению с разложением в пространстве L_2 при N равном 50 и 10 по критерию СКО достигал 10 % и 100 % соответственно, а по критерию максимальной ошибки - 80 % и 280 %. Это объясняется тем, что ВПС более адаптировано к свойствам реальных сигналов. Большой выигрыш при уменьшении частоты дискретизации показывает робастность предложенного алгоритма получения коэффициентов разложения к некорректному заданию частоты дискретизации сигнала.

На основании синтезированных полиномов исследована возможность аппроксимации обрабатываемых сигналов в условиях воздействия аддитивного шума. Доказано, что применение обработки в ВПС позволяет достигнуть выигрыша по критерию минимума СКО относительно пространства L_2 до 70 % в зависимости от числа выборок сигнала и алгоритма аппроксимации.

Иногда на практике нам известны значения $t_1, t_2, \dots, t_{k-1}$ узлов интерполяции функции $f(t)$ на отрезке $[a, b]$, а для решения поставленной задачи необходимо определить значения функции $f(t)$ за пределами данного интервала, т.е. требуется экстраполировать исследуемую функцию. Проведен сравнительный анализ экстраполяции синусоидальных сигналов ортонормированными многочленами Лежандра в пространствах L_2 и W_2^1 . Показа-

но, что выигрыш в результате экстраполяции синусоидального сигнала в пространстве W_2^1 по сравнению с экстраполяцией сигнала в пространстве L_2 достигает 6...10 раз. При этом существует ярко выраженный минимум ошибки ε , т.е. существует такое α_{opt} , которое позволит добиться существенного снижения ошибки экстраполяции функции.

Проведенные исследования позволяют утверждать, что аппроксимация и экстраполяция ортонормированными многочленами Лежандра в ВПС W_2^1 позволяют снизить ошибку оценки сигнала по сравнению с аналогичными алгоритмами аппроксимации и экстраполяции в пространстве L_2 . Это объясняется сглаживающим влиянием производной при восстановлении сигнала, т.е. на выбросы восстановленного сигнала накладываются дополнительные ограничения.

На основе теоремы, доказанной В.А. Котельниковым в 1933 г., разработаны различные аналоговые системы с временным разделением каналов, а также цифровые системы передачи информации. Данная теорема является одной из основ современных цифровых систем обработки, поэтому актуальной является задача ее обобщения на ВПС. Доказано, что в ВПС данная теорема принимает вид

$$f_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f_n \int_{-w_{\max}}^{w_{\max}} \frac{1-\alpha}{1-\alpha+\alpha w^2} \exp(jw(t-n\Delta t)) dw - \sum_{n=-\infty}^{\infty} f'_n \int_{-w_{\max}}^{w_{\max}} \frac{jw\alpha}{1-\alpha+\alpha w^2} \exp(jw(t-n\Delta t)) dw, \quad (13)$$

где $w_{\max}$ - максимальная частота спектра сигнала, Δt - частота дискретизации. При $\alpha = 0$ (13) преобразуется к известному выражению для функций восстановления в пространстве L_2 . Из анализа выражения (13) следует, что при восстановлении функции $f(t)$ отсчеты f_n и f'_n необходимо пропустить через интерполирующие фильтры с коэффициентами передачи $K_c(w) = (1-\alpha)/(1-\alpha+\alpha w^2)$ и $K_{np}(w) = jw\alpha/(1-\alpha+\alpha w^2)$ соответственно. Коэффициенты передачи данных фильтров, в отличие от коэффициента передачи идеального ФНЧ, используемого в соответствии с теоремой В.А. Котельникова для восстановления функции $f(t)$, имеют монотонно спадающий характер, что упрощает их практическую реализацию. Исследована ошибка усечения функции $f(t)$ при использовании теоремы В.А. Котельникова в пространстве L_2 и в ВПС W_2^1 . Показано, что применение алгоритма (13) при частоте дискретизации $F_d = 3F_K$ позволит снизить ошибку восстановления сигнала по критерию нормированной СКО (11) и максимальной ошибки (12) соответственно в 5.3 и 1.8 раза по сравнению с алгоритмом в пространстве L_2 и в 3.5 и 1.5 раза по сравнению с

алгоритмом Хургина - Яковлева. При интерполяции применение алгоритма (13) позволит снизить ошибку усечения сигнала по критерию СКО в 3 раза по сравнению с алгоритмом на основе теоремы В.А. Котельникова и в 2 раза по сравнению с алгоритмом Хургина - Яковлева при $F_d = 2F_K$ при повышении на 15 % максимальной ошибки по сравнению с алгоритмом В.А. Котельникова.

На основании обобщения теоремы В.А. Котельникова на ВПС предложен метод снижения влияния шумов квантования на результаты ЦОС. Получено выражение для выбора оптимального значения α_{opt} , минимизирующего СКО квантования на выходе системы ЦОС. При обработке телеметрических сигналов показано, что алгоритм восстановления аналогового сигнала в ВПС при 8 уровнях квантования позволяет снизить СКО в 1.5...3 раза по сравнению с алгоритмами обработки в пространстве L_2 . При одной и той же СКО $\varepsilon = 0.01$ алгоритм ВПС требовал в два раза меньшую разрядность представления, чем алгоритм в L_2 . Для речевых сигналов разработанный алгоритм позволяет более чем в три раза снизить ошибку квантования сигнала при одинаковой разрядности представления отсчетов.

Предложен метод аппроксимации и восстановления клипированного речевого сигнала в весовом пространстве Соболева. Снижение ошибки представления речевого сигнала в ВПС по сравнению с представлением в пространстве L_2 составляет от 8 до 12 % в зависимости от частоты дискретизации. С ростом частоты дискретизации происходит снижение ошибки представления сигнала на 4...5 %, что объясняется увеличением обрабатываемой информации. При прослушивании результатов обработки можно сделать вывод, что сигнал в ВПС отличался большей разборчивостью, пропал характерный для клипированного сигнала металлический звук, при высокой частоте среза фильтра сохранились интонационные составляющие речевого сигнала и теоретически возможна идентификация говорящего. Разработан алгоритм адаптивного восстановления клипированного речевого сигнала. При прослушивании восстановленного сигнала группой экспертов отмечается повышение качества и разборчивости речи в среднем на 1 балл по пятибалльной шкале в результате существенного снижения шумовых составляющих при отсутствии неприятного металлического звучания.

В третьей главе разработаны методы и алгоритмы вейвлет-обработки информации в весовом пространстве Соболева. Проведено математическое обоснование методики получения ортогональных вейвлет-функций Добеши и биортогональных Коэна – Добеши - Фово и Чуи - Ванга в ВПС. Характерной особенностью данных вейвлет-функций является изменение их формы при переходе от уровня к уровню. При этом на

более высоком уровне разложения вейвлет-функции в ВПС становятся более гладкими, что соответствует свойствам анализируемых сигналов. Пример биортогональных вейвлет-функций Чуи-Ванга для нескольких уровней разложения при различных значениях коэффициента α , где номер функции соответствует значению $\alpha = 0.1; 0.3; 0.5; 0.7; 0.9$ соответственно, приведен на рисунке 1.

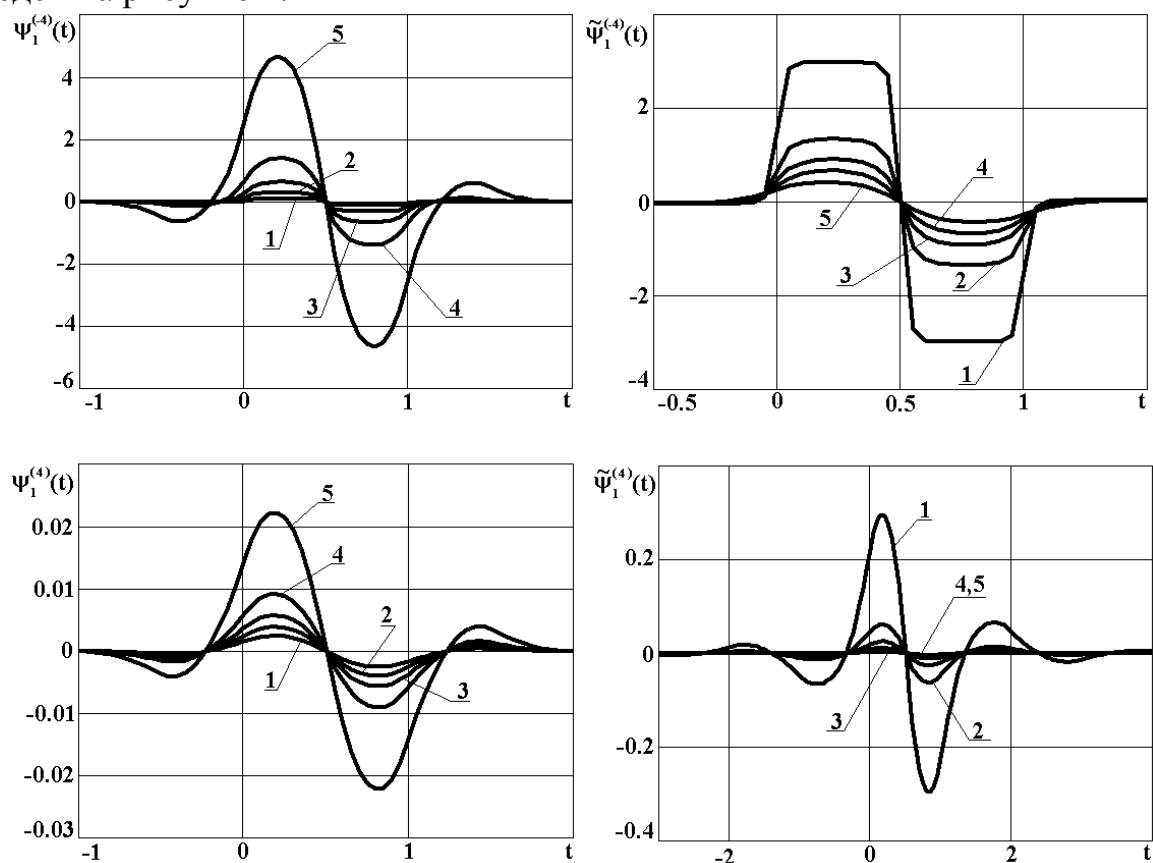


Рисунок 1 — Вид биортогональных вейвлет-функций Чуи - Ванга в ВПС для разных значений α

Рассмотрен вопрос применения полученных вейвлет-функций при фильтрации телеметрических сигналов. Как следует из результатов исследований, в зависимости от значения коэффициента α и глубины разложения выигрыш в ВПС относительно аналогичных алгоритмов в пространстве L_2 может достигать 25...30 %. Наибольший выигрыш достигается при глубине разложения, равной 3. Таким образом, показано, что применение вейвлет-функций, ортогональных в ВПС, может позволить снизить шумы в телеметрическом сигнале при вейвлет-фильтрации по сравнению с аналогичными алгоритмами в пространстве L_2 при одинаковых вычислительных затратах.

Исследование применения вейвлет-функций Хаара и Добеши-2, ортогональных в ВПС, для сжатия изображений позволяет сделать следующие выводы:

- при обработке в пространстве L_2 :
 - происходит быстрое увеличение количества и размера артефактов;
 - наблюдается эффект фильтрации малоразмерных и импульсных составляющих изображения;
- при обработке в пространстве W_2^1 :
 - артефакты отсутствуют;
 - мелкие объекты искажаются, но различимы;
 - при возрастании значения коэффициента α эффект фильтрации импульсных сигналов снижается.

Сравнение результатов сжатия в ВПС и пространстве L_2 по критерию концентрации энергии в низкочастотной части спектра показало, что применение ортогональных в ВПС вейвлет-функций позволяет добиться выигрыша для реальных изображений порядка 3...8 % в зависимости от коэффициента α . Для синтезированных изображений, когда существуют резкие переходы, при большом значении α наблюдается незначительный проигрыш. Другим критерием является визуальная оценка качества восстановления изображений. В ходе эксперимента для тестируемых изображений применялось вейвлет-разложение, после чего обнулялся заданный процент коэффициентов и изображение восстанавливалось. При повышении процента обнуляемых коэффициентов увеличивающиеся при обработке в пространстве L_2 артефакты приводят к существенному визуальному ухудшению изображения вплоть до невозможности его распознавания. В то же время обработка в весовом пространстве Соболева позволяет сохранить часть мелких деталей изображения и меньше искажает контуры, что повышает его визуальное качество и распознаваемость.

В четвертой главе рассмотрены методы фильтрации сигналов в ВПС. Фильтрация представляет собой одну из самых распространенных операций, применяемых при обработке сигналов. В пространстве L_2 интеграл свертки для операции фильтрации сигналов описывается выражением:

$$f_{\text{вых}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\text{вх}}(x)h(t-x)dx = \langle f(x), h(t-x) \rangle_L, \quad (14)$$

где $f_{\text{вх}}(t)$ и $f_{\text{вых}}(t)$ - сигналы на входе и выходе фильтра соответственно, $h(t)$ - импульсная характеристика фильтра. Из выражения (14) следует, что интеграл свертки представляет собой произведение двух функций в пространстве L_2 . По аналогии в ВПС можно записать:

$$f_{\text{вых}}(t) = \langle f(x), h(t-x) \rangle_W = (1-\alpha) \int_{-\infty}^{\infty} f_{\text{вх}}(x)h(t-x)dx + \alpha \int_{-\infty}^{\infty} f'_{\text{вх}}(x)h'(t-x)dx. \quad (15)$$

Однако в реальных системах обработки не всегда есть возможность взятия производной от сигнала, поэтому, пользуясь известными математическими соотношениями, преобразуем выражение (15) к виду:

$$\begin{aligned} f_{\text{бых}}(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} h(t-x) \left((1-\alpha) f_{\text{ex}}(x) - \alpha f_{\text{ex}}''(x) \right) dx + \alpha f_{\text{ex}}'(x) h(t-x) \Big|_{x=-\infty}^{\infty} = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f_{\text{ex}}(x) \left((1-\alpha) h(t-x) - \alpha h''(t-x) \right) dx + \alpha f_{\text{ex}}(x) h'(t-x) \Big|_{x=-\infty}^{\infty}. \end{aligned} \quad (16)$$

Для реальных сигналов вторым слагаемым в правой части выражения (16) можно пренебречь. Таким образом, выражение для операции фильтрации в ВПС W_2^1 существенно отличается от аналогичного выражения в пространстве L_2 :

$$\begin{aligned} f_{\text{бых}}(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} h(t-x) \left((1-\alpha) f_{\text{ex}}(x) - \alpha f_{\text{ex}}''(x) \right) dx = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f_{\text{ex}}(x) \left((1-\alpha) h(t-x) - \alpha h''(t-x) \right) dx = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\text{ex}}(x) h_W(t-x) dx, \end{aligned} \quad (17)$$

где $h_W(t) = (1-\alpha)h(t) - \alpha h''(t)$ - импульсная характеристика фильтра в ВПС. В спектральной области выражение (17) принимает вид:

$$F_{\text{бых}}(w) = (1-\alpha + \alpha w^2) F_{\text{ex}}(w) H(w) = F_{\text{ex}}(w) H_W(w), \quad (18)$$

где $H_W(w) = (1-\alpha + \alpha w^2) H(w)$ - частотная характеристика фильтра в ВПС. Как видно из выражения (18), фильтрация в ВПС сопровождается коррекцией высокочастотной части спектра, что аналогично фильтрации с подъемом высоких частот в пространстве L_2 и является обобщением метода нерезкого маскирования. В то же время следует отметить, что в данном случае характеристики фильтров математически обоснованны, а не следуют из эмпирических заключений. На рисунке 2 приведены амплитудно-частотные характеристики для НЧ-фильтров в ВПС при разных значениях коэффициента α .

Низкочастотная (НЧ) фильтрация речевых сигналов является наиболее используемой из операций, встречающихся в цифровых системах обработки. Для оценки результатов низкочастотной фильтрации речи в соответствии с ГОСТ Р 51061-97 в ВПС W_2^1 речевой сигнал тестовой фразы пропусклся через фильтры, полученные при различном значении коэффициента α , и затем оценивался комиссией экспертов.

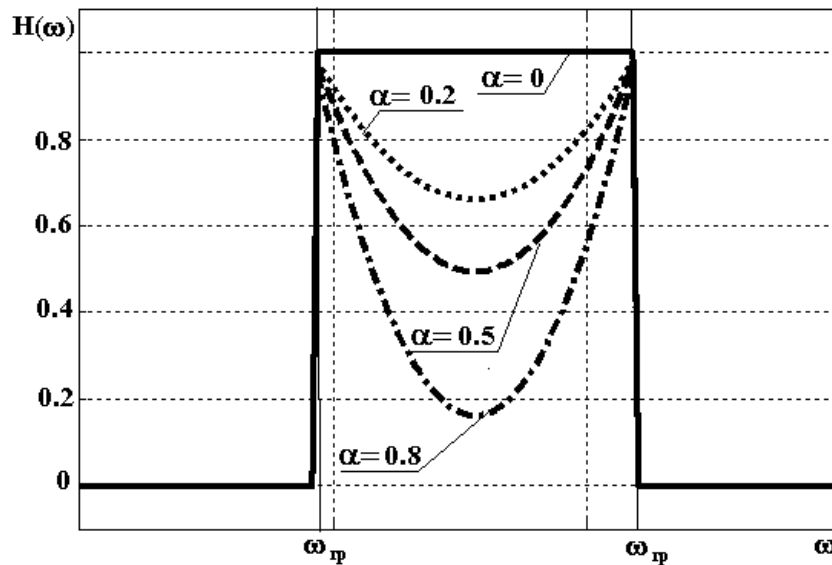


Рисунок 2 — Частотные характеристики идеального низкочастотного фильтра в пространствах L_2 и W_2^1 для разных значений α

Как показали исследования, при $\alpha = 0.5$ получено улучшение на 0.3...0.4 балла качества речи при низкой частоте среза НЧ-фильтра. При дальнейшем увеличении частоты среза (выше 4 кГц) результат фильтрации почти совпадает с результатом в пространстве L_2 . Для $\alpha = 0.9$ и низкой частоты среза (до 4 кГц) качество речевого сигнала, полученного с помощью фильтрации в пространстве W_2^1 , существенно (по разным оценкам от 0.5 до 1 балла) выше, чем при обработке в пространстве L_2 . Дальнейшее увеличение частоты среза фильтра приводит к снижению качества речи, что связано с пропаданием низкочастотных составляющих сигнала, и соответственно к субъективному ухудшению восприимчивости речи. Таким образом, проведенные исследования показали целесообразность применения фильтрации в ВПС W_2^1 для низкой частоты среза, при этом выигрыш в качестве речевого сигнала по сравнению с аналогичными алгоритмами фильтрации в пространстве L_2 может достигать 0.2...1 балла.

Исследованы алгоритмы вейвлет-фильтрации речевых сигналов в ВПС. В ходе экспериментальных исследований тестовая фраза с отношением сигнал-шум 5 дБ (использовался белый аддитивный гауссовский шум) подвергалась вейвлет-фильтрации на основе мягкого трешолдинга с помощью вейвлет-функций типа Добеши-2, а также их аналогов из ВПС. Результаты численного моделирования показывают, что при $\alpha > 0.3$ мощность шумов на выходе системы практически не зависит от параметра α . Отличие между обработкой в пространствах L_2 и W_2^1 при одном уровне разложения практически отсутствует, т.е. данной глубины разложения недостаточно для осуществления эффективной фильтрации речевых сигналов. При повышении количества уровней разложения до 5 выигрыш при обработке в ВПС постоянно увеличивался и достигал 15 %. Исследование

зависимостей для большего количества уровней разложения показало, что оптимальным числом уровней разложения является 6, дальнейшее его повышение не приводит к сколько-нибудь заметным изменениям в поведении графиков.

Рассмотрены алгоритмы НЧ-фильтрации изображений в ВПС. Результат применения низкочастотной фильтрации в пространстве L_2 к исходному изображению (рисунок 3.а) приведен на рисунке 3.б. При этом значение частоты среза было подобрано экспериментальным путем, т.е. дающим наилучший результат. Как видно из рисунка 3.б, низкочастотная фильтрация в пространстве L_2 не позволила существенно улучшить исходное изображение. На рисунках 3.в...3.е приведен результат фильтрации в ВПС W_2^1 НЧ-фильтром при значениях коэффициентов $\alpha = 0.55$, $\alpha = 0.6$, $\alpha = 0.67$, $\alpha = 0.68$.

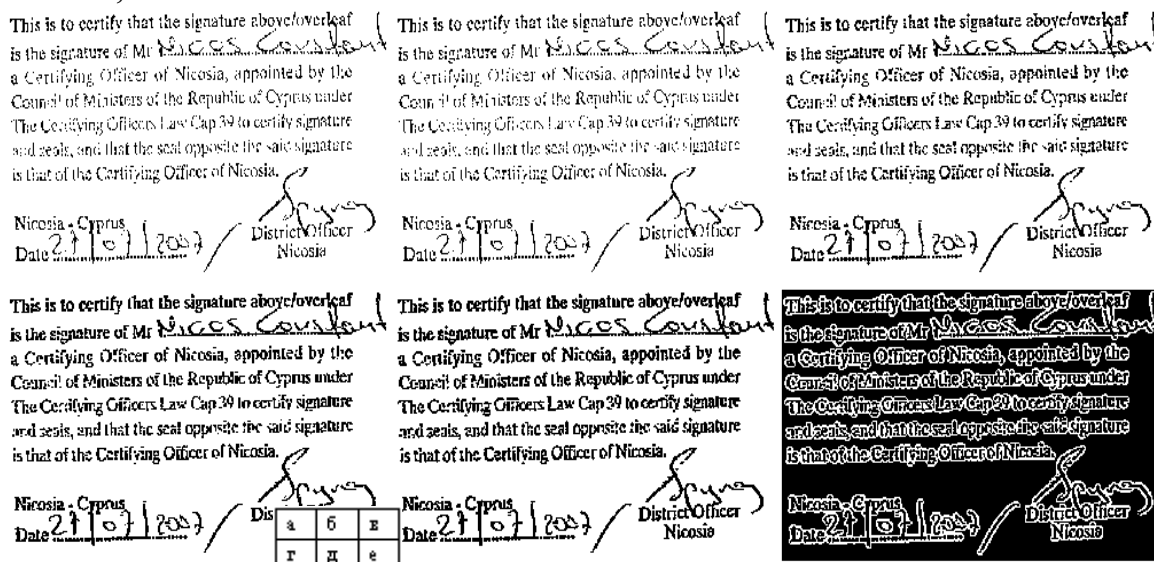


Рисунок 3

— Результат низкочастотной фильтрации изображения

Из анализа рисунков 3.в...3.е следует, что качество изображения возрастает при увеличении значения α до тех пор, пока не происходит резкая инверсия. Это является характерной особенностью фильтров лапласианов при слабом влиянии основного фона и может служить критерием для выбора оптимального значения коэффициента α при построении автоматических систем повышения качества изображения.

Проанализированы алгоритмы вейвлет-фильтрации изображений с использованием вейвлет-функций, полученных в третьей главе. Показана их эффективность для аддитивных, импульсных и мультипликативных шумов с точки зрения снижения числа получаемых артефактов и уровня шума, повышения визуального качества изображения и гибкости при подборе параметров фильтрации. При оценке качества изображения согласно ГОСТ Р 52023-2003 отмечается его повышение на 0.2...0.5 балла по сравнению с аналогичными алгоритмами в пространстве L_2 . Также стоит отме-

тить, что применение синтезированных вейвлет-функций не требует дополнительных вычислительных затрат, что позволит применить их в уже существующих системах фильтрации.

В пятой главе рассмотрены методы решения обратных задач в весовом пространстве Соболева. Предложены различные варианты подхода к данной задаче и проанализированы полученные решения.

Рассмотрена задача редукции к идеальному прибору в весовом пространстве Соболева. Предложено устойчивое решение данной задачи на основе представления сигналов в ВПС. Получено выражение для ошибки, определяемой аддитивными шумами в каналах обработки

$$\begin{aligned} \overline{\varepsilon^2(w)} = & \left(\frac{1-\alpha}{(1-\alpha+\alpha w^2)H(w)} \right)^2 G_1(w) - \left(\frac{\alpha w R}{(1-\alpha+\alpha w^2)H(w)} \right)^2 G_2(w) - \\ & - \frac{j2(1-\alpha)\alpha w R}{\left((1-\alpha+\alpha w^2)H(w) \right)^2} \overline{N_1(w)N_2(w)}, \end{aligned} \quad (19)$$

где $G_1(w)$, $G_2(w)$ - спектральная плотность мощности шумов в каналах, $H(w)$ - частотная характеристика системы обработки, R - нормирующий множитель, определяемый из условий физической реализуемости (например, из условия равенства энергий в каналах). В случае некоррелированности шумов в каналах последнее слагаемое в выражении (19) равно нулю. Получено выражение для коэффициента α , минимизирующего некоррелированные шумы на выходе системы:

$$\alpha_{opt} = \frac{G_1(\omega)}{G_1(\omega) + R^2 G_2(\omega)}. \quad (20)$$

Практические исследования предложенного алгоритма для задач восстановления изображения в оптических системах показали, что в случае использования характеристики диафрагмы в виде узкой щели при когерентном освещении интегральная ошибка $\int \overline{\varepsilon_L^2(\omega)} d\omega / \int \overline{\varepsilon_w^2(\omega)} d\omega$ в ВПС до 1.6 раза меньше, чем в пространстве L_2 , а при некогерентном освещении диафрагмы в виде узкой щели интегральная ошибка в ВПС до 7 раз меньше, чем в пространстве L_2 . Таким образом, построение системы обработки информации на основе алгоритмов в ВПС W_2^1 позволило существенно снизить влияние собственных шумов системы на результаты обработки, а также получить устойчивое решение задачи редукции к идеальному прибору.

В общем случае для определения вектора состояния космического аппарата (КА) в каждый момент времени необходимы шесть независимых соотношений, связывающих составляющие вектора скорости и координаты

в этот момент с результатами измерений. Это справедливо, если все измерения абсолютно достоверны, а формулы связи точны, однако на практике эти условия соблюдения очень сложно. На полученные результаты накладываются различные случайные ошибки измерений, которые в процессе математической обработки должны быть нивелированы, а грубые – по возможности выявлены и исключены. Другой особенностью служит наличие избыточности получаемых данных, что связано с особенностями реальной работы технических средств. В ходе работы на основе обобщения теоремы В.А Котельникова обоснован алгоритм обработки результатов траекторных измерений в ВПС. Пусть нам известны отсчеты измеряемой величины и ее производной в определенные моменты времени. В частности, такой величиной могут являться скорость КА и ее изменение, местоположение КА и его скорость, угловое значение линии визирования КА и ее изменение и т.д. Точное восстановление любой из перечисленных величин позволит определить орбиту КА, т. е. выбор исследуемой величины следует проводить исходя из имеющихся в наличии средств измерений. Получено выражение для дисперсии ошибки оценки траектории КА и обоснован алгоритм оценки оптимального значения коэффициента α , минимизирующего данную ошибку:

$$\alpha_{opt} \approx \int_{-w_{max}}^{w_{max}} G_1(w)dw \bigg/ \int_{-w_{max}}^{w_{max}} G_1(w) + G_2(w)dw. \quad (21)$$

На рисунке 4 представлен результат численного моделирования системы траекторных измерений в ВПС.

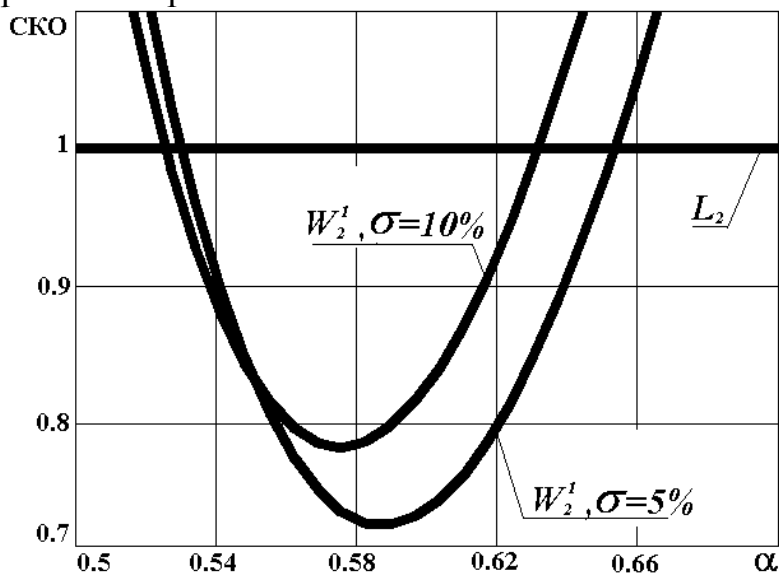


Рисунок 4 — Зависимости СКО измеренной величины от коэффициента α

В результате проведенных исследований показано, что применение обработки результатов траекторных измерений в ВПС позволит снизить среднеквадратическую ошибку на 25...30 % по сравнению с алгоритмами,

основанными на обработке сигналов в пространстве L_2 . Отличительной особенностью предложенного алгоритма является то, что значение оптимального весового коэффициента α определяется только отношением СПМ шумов в каналах измерения, т. е. такая система обработки обладает робастными свойствами по отношению к априорной информации о СПМ измеряемой величины.

В шестой главе рассмотрено практическое применение разработанных методов и алгоритмов обработки информации в весовом пространстве Соболева в условиях воздействия различных мешающих факторов.

Исследована возможность применения двухканальной системы обработки с использованием отсчетов сигнала и его производной для ослабления действия аддитивных нормальных шумов, действующих в каналах обработки. Синтезированы оптимальные по критерию минимума дисперсии шумов на выходе системы коэффициенты передачи фильтров в каналах сигнала и производной при условии идеального восстановления сигнала, позволяющем избежать искажений в случае отсутствия шума. Коэффициенты передачи этих фильтров, в случае некоррелированных шумов в каналах сигнала и производной, определяются выражениями

$$K_2(w) = \frac{-jwG_1(w)}{w^2G_1(w) + G_2(w)} \quad (22) \quad K_1(w) = \frac{G_2(w)}{w^2G_1(w) + G_2(w)}, \quad (23)$$

где $G_1(w)$, $G_2(w)$ - СПМ шумов в каналах обработки. Сравнение предложенной двухканальной системы с двухканальными системами со статистическим усреднением шумов в каналах и с одноканальной системой, использующей фильтр Винера, показало, что СКО в системах с использованием фильтра Винера быстро возрастает при отклонении формы СПМ сигнала от его априорно заданной характеристики. В то же время характеристики двухканальных систем не зависят от формы СПМ сигнала, а предложенная система обеспечивает выигрыш по СКО на выходе за счет использования амплитудно-фазовых соотношений между каналами отсчетов сигнала и его производной. Другой сравнительной характеристикой была устойчивость системы обработки к изменению формы СПМ шума. Показано, что предложенная дискретная двухканальная система обработки обеспечивает значительное снижение шумовых составляющих обрабатываемого сигнала вне зависимости от формы СПМ шума. Отличительной особенностью синтезированных фильтров является то, что форма их коэффициентов передачи определяется только отношением СПМ шумов в каналах обработки, т. е. такая система обработки информации обладает робастными свойствами по отношению к априорной информации о СПМ сигнала.

При реализации алгоритма обработки сигнала в реальном масштабе времени ($t > 0$) на основе обобщенной на ВПС теоремы В.А. Котельникова возможно построение одноканальной системы обработки. Показано, что

такая одноканальная система аналогична введению амплитудно-фазовых предискажений, что позволит значительно ослабить действие аддитивного шума.

В интересах практической реализации рассмотренных выше двухканальных систем обработки предложен переход от производной сигнала к его приращению

$$\delta f(t) = R_0 [f(t) - f(t - \tau)], \quad (24)$$

где τ - время задержки, $R_0 = \left[\int_T (f(t))^2 dt \right] / \left[\int_T (\delta f(t))^2 dt \right]$ - постоянный

множитель, обеспечивающий равенство обрабатываемых мощностей $f(t)$ и $\delta f(t)$ в обоих каналах. Показано, что близость величины приращения функции $\delta f(t)$ и ее дифференциала $df(t)$ обеспечивается выбором значения τ из условия $\tau < 1/(4F_{\max})$, где $F_{\max}$ - максимальная частота спектра сигнала, при этом $\lim_{\tau \rightarrow 0} \delta f(t) = df(t)$. Синтезированы оптимальные по критерию минимума дисперсии шума на выходе коэффициенты передачи при условии идеального восстановления сигнала

$$K_{d1}(w) = \frac{G_2(w)}{G_2(w) - 2G_1(w)R_0^2 \cos(w\tau) + 2G_1(w)R_0^2}, \quad (25)$$

$$K_{d2}(w) = \frac{R_0 G_1(w) [1 - \exp(jw\tau)]}{G_2(w) - 2G_1(w)R_0^2 \cos(w\tau) + 2G_1(w)R_0^2}. \quad (26)$$

Доказано, что предложенная двухканальная дискретная система обработки сигналов с использованием первой разности обеспечивает выигрыш до 50 % по дисперсии шума по сравнению с известными двухканальными системами и до 10 % по сравнению с одноканальными системами, использующими фильтр Винера на выходе. Предложенная система проигрывает по своим характеристикам системе с использованием производной. Однако в рассматриваемой системе устранен недостаток, присущий системам с использованием производной - существенная разница по мощности в каналах сигнала и его производной. Дополнительно рассмотрена возможность применения одноканальной системы с приращением и показана целесообразность ее использования.

Одним из основных критериев при синтезе оптимальных фильтров в системах обработки при наличии аддитивных нормальных шумов является критерий минимума СКО восстановления сигнала. Рассмотрена возможность использования на выходе предложенной двухканальной системы фильтра Винера. Показано, что при использовании отсчетов сигнала и его производной коэффициенты передачи интерполирующих фильтров имеют вид

$$\widehat{K}_1(w) = K_1(w) \frac{G_f(w)}{G_f(w) + |K_1(w)|^2 G_1(w) + |K_2(w)|^2 G_2(w)}, \quad (27)$$

$$\widehat{K}_2(w) = K_2(w) \frac{G_f(w)}{G_f(w) + |K_1(w)|^2 G_1(w) + |K_2(w)|^2 G_2(w)}, \quad (28)$$

где $K_1(w)$ и $K_2(w)$ определяются выражениями (22) и (23), а при использовании вместо отсчетов производной отсчетов приращения

$$\widehat{K}_{d1}(m) = K_{d1}(m) \frac{G_f(m)}{G_f(m) + |K_{d1}(m)|^2 G_1(m) + |K_{d2}(m)|^2 G_2(m)}, \quad (29)$$

$$\widehat{K}_{d2}(m) = K_{d2}(m) \frac{G_f(m)}{G_f(m) + |K_{d1}(m)|^2 G_1(m) + |K_{d2}(m)|^2 G_2(m)}, \quad (30)$$

где $K_{d1}(w)$ и $K_{d2}(w)$ определяются (25) и (26), $G_f(m)$ - априорно заданная СПМ сигнала. Проведенный анализ показал, что применение предложенной двухканальной системы обработки с использованием производной позволяет существенно снизить СКО восстановления сигнала. Система с использованием приращения проигрывает по своим характеристикам системе с использованием производной, но значительно выигрывает у существующих систем, использующих фильтр Винера. Так, например, при отношении шум-сигнал, равном 0.5, и одинаковой мощности в каналах сигнала и приращения снижение СКО составляет 35 %.

Проведен синтез оптимальных по критерию минимума СКО коэффициентов передачи интерполирующих фильтров для случаев коррелированных, некоррелированных и идентичных шумов. При идентичных шумах $G_{n1}(w) = G_{n2}(w) = G_n(w)$, когда коэффициенты передачи описываются выражениями

$$K_{1dis}(w) = \frac{G_f(w)}{G_f(w) - R_0^2 w^2 G_f(w) + G_n(w)}, \quad (31)$$

$$K_{2dis}(w) = \frac{jw G_f(w)}{G_f(w) - R_0^2 w^2 G_f(w) + G_n(w)}. \quad (32)$$

осуществлено сравнение синтезированной системы с существующей системой на основе фильтра Винера. Показано, что в случае идентичных шумов применение двухканальной системы обработки с выровненными мощностями в каналах позволяет снизить СКО восстановления более чем в три раза по сравнению с известными оптимальными одноканальными системами.

Рассмотрена задача сегментации речевых сигналов на основе синтезированных вейвлет-функций, ортогональных в ВПС. Обоснованы алгоритмы сегментации и показано, что в ВПС вероятность правильного обнаружения границы фоном повысилась на 20...25 %, вероятность определе-

ния ложных границ снизилась на 10...15 %, а суммарная оценка при обработке в ВПС снизилась на 15...20 % в зависимости от обрабатываемого слова по сравнению с аналогичными алгоритмами в пространстве L_2 .

В заключении приведены основные научные и практические результаты работы.

1. Разработаны методы дискретной спектральной обработки детерминированных сигналов в весовом пространстве Соболева W_2^1 . Доказана меньшая чувствительность к изменению верхней частоты спектра сигнала и возможность снижения вычислительных затрат в цифровых устройствах за счет распараллеливания операций по сравнению с алгоритмами дискретной спектральной обработки в пространстве L_2 . Доказана возможность снижения частоты дискретизации в каналах сигнала и производной в два раза без увеличения ошибок наложения. Показано, что при $F_d < F_K$ определение спектра по критерию СКО в ВПС W_2^1 точнее на (30...230) %, а максимальная ошибка на (13...70) % меньше, чем в пространстве L_2 .

2. Обоснованы методы оценки СПМ СП в весовом пространстве Соболева W_2^1 . Разработаны методы определения оптимального значения весового коэффициента α , позволяющие минимизировать ошибку вычисления спектра в ВПС W_2^1 . Доказано, что данные методы имеют меньшую чувствительность к изменению частоты дискретизации СП при значительно меньшей СКО оценивания СПМ по сравнению с аналогичными алгоритмами в пространстве L_2 в случае $F_d < F_K$ и позволяют снизить в два раза частоту дискретизации в каналах сигнала и производной. Синтезированы весовые функции и разработаны алгоритмы сглаживания оценок СПМ в пространстве W_2^1 . При использовании весовой обработки выигрыш по критерию СКО за счет более гибкого использования весовых окон в пространстве Соболева W_2^1 по сравнению с пространством L_2 достигал 10 %.

3. Разработаны методы обобщенного спектрального представления сигналов на основе многочленов Лежандра в весовом пространстве Соболева W_2^1 . Показано, что при одинаковом числе спектральных отсчетов предложенный алгоритм позволяет снизить ошибку восстановления сигнала по сравнению с аналогичным алгоритмом в пространстве L_2 . Показано, что обобщенная спектральная обработка в ВПС W_2^1 дает возможность повысить точность восстановления сигналов без увеличения числа спектральных отсчетов. Выигрыш по критерию СКО при одинаковом числе ба-

зисных функций составил, в зависимости от частоты дискретизации сигнала, до 10...100 %, а по критерию максимальной ошибки 80...280 %.

4. Разработан метод аппроксимации сигналов, позволяющий достигнуть выигрыша по критерию СКО относительно пространства L_2 до 70 % в зависимости от числа выборок сигнала. Предложен метод экстраполяции сигналов, обеспечивающий выигрыш в пространстве W_2^1 по сравнению с экстраполяцией сигнала в пространстве L_2 .

5. Сформулирована обобщенная теорема В.А. Котельникова в весовом пространстве Соболева W_2^1 . Показано, что применение данной теоремы позволяет снизить ошибку усечения сигнала по критерию нормированной СКО и максимальной ошибки соответственно в 5.3 и 1.8 раза по сравнению с алгоритмом на основе теоремы В.А. Котельникова в пространстве L_2 и в 3.5 и 1.5 раза по сравнению с алгоритмом Хургина - Яковлева.

6. Предложен метод обработки клипированного речевого сигнала в ВПС. Снижение ошибки представления сигнала в ВПС по сравнению с представлением в пространстве L_2 составляет от 8 до 12 % в зависимости от частоты дискретизации. С ростом частоты дискретизации происходит снижение ошибки представления сигнала на 4...5 %, что объясняется увеличением обрабатываемой информации. При прослушивании результатов обработки можно сделать вывод, что сигнал в весовом пространстве Соболева отличается большей разборчивостью, пропадает характерный для клипированного сигнала металлический звук, при высокой частоте среза фильтра сохраняются интонационные составляющие речевого сигнала и теоретически возможно идентификация говорящего.

7. Разработан метод повышения качества клипированного сигнала с использованием информации о его производной. При прослушивании восстановленного сигнала группой экспертов отмечаются повышение качества и разборчивости речи в среднем на 1 балл по пятибалльной шкале, существенное снижение шумовых составляющих, отсутствие неприятного металлического звучания.

8. Разработаны методы расчета ортогональных и биортогональных в весовом пространстве Соболева W_2^1 вейвлет-функций с заданной степенью гладкости. Исследованы методы сжатия изображений на основе разработанных вейвлет-функций. Применение ортогональных в ВПС вейвлет-функций первого порядка позволило повысить качество изображения по сравнению с аналогичными вейвлет-функциями, ортогональными в пространстве L_2 . Исследования показали, что применение ортогональных в

ВПС вейвлет-функций позволяет добиться выигрыша по концентрации энергии в низкочастотной области для реалистичных изображений порядка 3...8 % в зависимости от коэффициента α . Для синтезированных изображений, представленных картинкой «chess», когда существуют резкие переходы, при большом значении α наблюдается незначительный проигрыш. Исследование применения ортогональных в ВПС вейвлет-функций первого порядка позволило сделать вывод, что во многих случаях это приводит к возможности повышения степени сжатия изображения по сравнению с аналогичными алгоритмами в пространстве L_2 с обеспечением более высокого визуального качества.

9. Предложены алгоритмы фильтрации телеметрических сигналов на основе вейвлет-функций, ортогональных в весовом пространстве Соболева. Как показали исследования, в зависимости от значения коэффициента α и глубины разложения выигрыш в ВПС может достигать 10...15 %. Проанализирована возможность применения НЧ фильтрации РС в ВПС, при этом выигрыш в качестве фильтрованного РС по сравнению с аналогичными алгоритмами фильтрации в пространстве L_2 может достигать 0.2...1 балла. Показана целесообразность применения ортогональных в ВПС W_2^1 вейвлет-функций для фильтрации РС, что позволило на 10...15 % повысить эффективность процедуры фильтрации с точки зрения минимизации аддитивных шумов.

10. Показана эффективность вейвлет-фильтрации в ВПС для подавления аддитивных, импульсных и мультипликативных шумов на изображении с точки зрения снижения числа получаемых артефактов и уровня шума, повышения визуального качества изображения, повышения гибкости при подборе параметров фильтрации. При оценке качества изображения согласно ГОСТ Р 52023-2003 отмечается его повышение на 0.2...0.5 балла по сравнению с аналогичными алгоритмами в пространстве L_2 .

11. Получены, при условии идеального восстановления функции на выходе двухканальной системы, использующей отсчеты сигнала и его производной, коэффициенты передачи фильтров, обеспечивающих минимум дисперсии шума на выходе. Отличительной особенностью данных фильтров является то, что форма их коэффициентов передачи определяется только отношением СПМ шумов в каналах обработки, т. е. такая система передачи информации обладает робастными свойствами по отношению к неточности задания априорной информации о СПМ шума. Основным недостатком предложенной двухканальной системы обработки является то, что динамический диапазон производной существенно больше, чем дина-

мический диапазон сигнала. Также проанализирована возможность одноканальной обработки сигнала с использованием информации о его производной.

12. Разработаны методы дискретной обработки с использованием отсчетов сигнала и его приращения в системах обработки информации при условии идеального восстановления сигнала на выходе системы. Определены коэффициенты передачи фильтров, обеспечивающие минимум дисперсии шума на выходе такой системы. Показано, что предложенная двухканальная дискретная система обработки сигналов с использованием первой разности обеспечивает выигрыш до 50 % по дисперсии $\sigma_{ш}^2$, в зависимости от ширины эффективной полосы СПМ шума, по сравнению с известными двухканальными системами и до 10 % по сравнению с одноканальными системами, использующими фильтр Винера на выходе. Двухканальная система с использованием отсчетов приращения проигрывает по своим характеристикам двухканальной системе с использованием отсчетов производной. Однако в такой системе устранен основной недостаток, присущий системам с использованием производной - существенная разница по мощности в каналах сигнала и его производной.

13. Проведен синтез оптимальных по критерию минимума СКО фильтров для двухканальных систем обработки информации при использовании отсчетов сигнала и его изменения. Рассмотрена задача определения оптимальных по критерию минимума СКО фильтров при условии идеального восстановления сигнала на выходе сумматора каналов сигнала и его изменения. Показано, что применение дискретных двухканальных систем обработки отсчетов сигнала и его производной обеспечивает выигрыш по критерию минимума СКО на 35 % при условии идеального восстановления сигнала на выходе сумматора и более чем в три раза без идеального восстановления по сравнению с одноканальными оптимальными системами.

14. Рассмотрена задача редукции к идеальному прибору в ВПС и показано, что при некогерентном освещении диафрагмы в виде узкой щели интегральная ошибка в ВПС в 7 раз меньше, чем в пространстве L_2 . Построение системы обработки сигналов на основе алгоритмов в ВПС W_2^1 позволяет существенно снизить влияние собственных шумов системы на результаты обработки, а также получить устойчивое решение задачи редукции к идеальному прибору. За счет обработки в ВПС W_2^1 для промоделированных систем снижение ошибки, вызванной собственными искажениями системы регистрации, составило 1.5...7 раз.

15. Обоснованы методы обработки в ВПС сигналов траекторных измерений параметров движения КА и показано, что они позволят снизить среднеквадратическую ошибку на 25...30 % по сравнению с алгоритмами, основанными на обработке сигналов в пространстве L_2 . Отличительной особенностью предложенного алгоритма является то, что значение оптимального весового коэффициента α определяется только отношением СПМ шумов в каналах измерения, т. е. такая система обработки обладает робастными свойствами по отношению к априорной информации о СПМ измеряемой величины.

16. Предложены методы сегментации речевого сигнала на основе вейвлет-функций, ортогональных в ВПС, и показано, что применение данных функций позволяет повысить точность сегментации при соответствующем выборе параметра α и начального уровня разложения. В частности, удалось добиться снижения суммарной оценки на 15...20 % по сравнению с аналогичными алгоритмами в пространстве L_2 .

Анализ приведенных выше результатов позволяет сделать вывод о теоретическом обобщении и решении в рамках работы крупной научно-технической проблемы, состоящей в разработке методов и алгоритмов обработки информации в весовом пространстве Соболева в интересах повышения качества функционирования и помехоустойчивости СОИ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монография

1. Кириллов С.Н., Бузыканов С.Н., Дмитриев В.Т., Лоцманов А.А., Степанов М.В. Практические аспекты применения алгоритмов цифровой фильтрации и обработки сигналов в радиотехнических системах. Часть 1. Перспективные методы цифровой фильтрации в радиотехнических системах / под ред. С.Н. Кириллова. Рязань: РГРТУ, 2009. ISBN 978-5-7722-0317-0. 272 с.

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК

2. Бузыканов С.Н., Кириллов С.Н. Алгоритм оконной обработки при спектральном анализе сигналов в модифицированном пространстве Соболева // Вестник РГРТА. Вып. 8. 2001. С. 117-118.
3. Kirillov S. N., Buzykanov S. N. Algorithm for discrete spectral signal analysis in the modified Sobolev space // Optoelectronics Instrumentation and Data Processing. 2003, PART 1. P. 73-78.

4. Бузыкканов С.Н., Кириллов С.Н. Двухканальная система передачи и обработки сигналов в пространстве Соболева // Вестник РГРТА. Вып. 10. 2002. С. 6-8.
5. Бузыкканов С.Н., Кириллов С.Н. Оценка спектральной плотности мощности сигналов в модифицированном пространстве Соболева// Радиоэлектроника, 2002. Т.45. №12. С.46-51. (Известия высших учебных заведений)
6. Бузыкканов С.Н., Кириллов С.Н. Алгоритм дискретного спектрального анализа сигналов в модифицированном пространстве Соболева. // Автометрия. 2003. №1. С.88-94.
7. Kirillov S. N., Buzykanov S. N. Estimation of spectral density of signal power in Sobolev modified space // Radioelectronics and Communications Systems. 2003. Vol.45 №12. P. 32-35.
8. Бузыкканов С.Н. Представление сигналов на основе обобщенных полиномов Лежандра. // Вестник РГРТА. Вып. 11. 2003. С. 110-112.
9. Бузыкканов С.Н., Кириллов С.Н., Алгоритм восстановления аналогового сигнала в модифицированном пространстве Соболева // Автометрия. 2005. №2. С.75-80.
10. Бузыкканов С.Н., Кириллов С.Н. Вычисление спектра сигналов в модифицированном пространстве Соболева на основе быстрого преобразования Фурье // Автометрия. 2006. №4. С.48-56.
11. Buzykanov S. N., Kirillov S. N. Algorithm for analog signal restoration in the modified Sobolev space// Optoelectronics Instrumentation and Data Processing. 2005. ISSN 8756-6990. PART 2. P. 67-71.
12. Buzykanov S. N., Kirillov S. N. Signal spectrum estimation in the modified Sobolev space via fast Fourier transform // Optoelectronics Instrumentation and Data Processing. 2006. ISSN 8756-6990. PART 4. P 41-48.
13. Бузыкканов С.Н. Задача редукции к идеальному прибору в модифицированном пространстве Соболева // Вестник РГРТУ. Вып. 29. 2009. С. 110-113.
14. Бузыкканов С.Н. Алгоритм обработки результатов траекторных измерений в весовом пространстве Соболева // Вестник РГРТУ. Вып. 32. 2010. С. 38-43.
15. Бузыкканов С.Н. Вейвлет-обработка изображений в весовом пространстве Соболева // Вестник РГРТУ. Вып. 34. 2010. С. 12-19.
16. Бузыкканов С.Н. Алгоритм восстановления сканированного текста в весовом пространстве Соболева // Вестник РГРТУ. Вып. 35. 2011. С. 120-123.
17. Бузыкканов С.Н. Модифицированный алгоритм вычисления спектра сигнала в весовом пространстве Соболева // Вестник РГРТУ. вып. 36. 2011. С. 10-13.

18. Бузыканов С.Н. Алгоритм снижения шумов квантования сигнала в весовом пространстве Соболева // Вестник РГРТУ. Вып. 37. 2011. С. 100-103.
19. Бузыканов С.Н., Петрунин А.В. Сегментация речевых сигналов на основе вейвлет-преобразований в весовом пространстве Соболева // Вестник РГРТУ. Вып. 38. 2011. С. 16-19.
20. Бузыканов С.Н. Алгоритм повышения качества речевого сигнала при низкочастотной фильтрации в низкоскоростных системах передачи // Вестник РГРТУ. Вып. 39. 2012. Ч.1. С. 113-116. ISSN 1995-4565.
21. Кириллов С.Н., Бузыканов С.Н. Многокритериальный синтез реализуемых сигналов и устройств обработки с учетом мешающих факторов в радиотехнических системах // Радиотехника. №3. 2012. С.11-17.
22. Кириллов С.Н., Бузыканов С.Н. Методы многокритериального синтеза алгоритмов цифровой обработки сигналов// Цифровая обработка сигналов. 2012. №1. С.3 – 7.

Патент

23. Бузыканов С.Н. Система наведения антенны мобильной станции спутниковой связи на геостационарный спутник // Патент на полезную модель RU№49982 от 22.06.2005. Автор: Бузыканов Сергей Николаевич. Заявка №2005119403. Зарегистрировано 10 декабря 2005 г.

Статьи в научно-технических журналах и сборниках научных трудов

24. Кириллов С.Н., Макаров Д.А., Бузыканов С.Н. Регуляризация решений задачи синтеза фильтра, робастного к искажению спектра сигнала// Радиоэлектронные системы и устройства: межвуз. сб. науч. тр./ Рязань: РГРТА, 1999. С.12 -14.
25. Кириллов С.Н., Бузыканов С.Н. Помехоустойчивые системы обработки сигналов в модифицированном пространстве Соболева// Методы и устройства обработки сигналов в радиотехнических системах: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 2. ISBN 5-7722-0232-4/ Рязань: РГРТА, 2003. С.104 - 106.
26. Бузыканов С.Н. Применение магниторезистивных датчиков в системах навигации // Chip News Инженерная микроэлектроника. 2004. №5. С.60-62.
27. Бузыканов С.Н. Датчик наклона на основе твердотельного акселерометра // Современная электроника. 2004. №2. С.42-45.
28. Бузыканов С.Н. Технология передачи телеметрической информации с пониженным уровнем шумов квантования // Информационные технологии: межвуз. сб. науч. тр./ Рязань: РГРТУ, 2011. С.55 - 58. ISBN 978-5-7722-0301-9

29. Ватутин В.М., Снегирев В.М., Поляков А.В., Гвоздяков Ю.А., Тимошина Н.Е., Полтавец Ю.И., Бузыканов С.Н., Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т. Анализ устойчивости известных алгоритмов помехоустойчивого кодирования и методов модуляции к действию естественных и преднамеренных помех радиопередачи управления и передачи информации // Труды II Всероссийской научно-технической конференции "Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий", посвященной 100-летию со дня рождения М.С. Рязанского, 2-4 июня 2009./ под ред. Ю.М. Урличича, А.А. Романова. М.: Радиотехника, 2010. 272 с. С.113-114.
30. Бузыканов С.Н., Кириллов С.Н., Генералов П.В., Попов С.В. Алгоритмы помехоустойчивой обработки результатов измерений в ракетно-космических информационных системах // Труды III Всероссийской научно-технической конференции "Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий", 1-3 июня 2010./ под ред. Ю.М. Урличича, А.А. Романова. М.: Радиотехника, 2011. 624 с. С.191-197.

Доклады на международных и всероссийских конференциях: опубликовано 36 тезисов докладов. Основные тезисы по теме диссертации

31. Бузыканов С.Н., Макаров Д.А. Синтез робастного фильтра на основе модифицированной процедуры Тихонова // Международная молодежная научно-техническая конференция "XXV Гагаринские чтения": Тез. докл. - М.: РГТУ-МАТИ, 1999. Т.1. С.474-475.
32. Бузыканов С.Н., Кириллов С.Н. Алгоритмы цифровой обработки сигналов в модифицированном пространстве Соболева // 3-я международная конференция и выставка "Цифровая обработка сигналов и ее применение": тез. докладов. Москва, 2000. Т.3. С.167-168.
33. Бузыканов С.Н., Кириллов С.Н. Алгоритмы восстановления аналогового сигнала с дополнительным использованием отсчетов производной // 5-я международная конференция и выставка "Цифровая обработка сигналов и ее применение": тез. докладов. Москва, 2003. Т.1. С.26.
34. Кириллов С.Н., Бузыканов С.Н., Дмитриев В.Т., Бахурин С.А. Практические аспекты реализации алгоритмов обработки при дискретизации с использованием отсчетов функции и ее производной/ Международная конференция "В.А. Котельников и его роль в развитии радиоэлектроники": сб. тр. М., 2003. С.24 – 25.
35. Круглов А.В., Ватутин В.М., Генералов П.В., Гвоздяков Ю.А., Кириллов С.Н., Бузыканов С.Н., Дмитриев В.Т. Современные программно-аппаратные алгоритмы обработки информации для сверхмалых космических аппаратов // VII научно-практическая конференция "Микротех-

- нологии в авиации и космонавтике": материалы конференции. Москва, 2009. С.50-52.
- 36.Бузыканов С.Н., Дмитриев В.Т., Виноградова М.Е., Картавенко Я.О. Цифровые алгоритмы подавления акустических помех и шумов в канале связи на основе динамических характеристик сигнала //Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение. Выпуск XIII-1. Доклады 13-й Международной конференции "Цифровая обработка сигналов и ее применение". Москва, 2011. Т.1. С.175-177. ISSN 978-5-905278-01-3.
- 37.Кириллов С.Н., Косткин И.В., Бузыканов С.Н., Круглов А.В., Полтавец Ю.И. Алгоритм сжатия цифровых изображений при обработке в весовом пространстве Соболева с оптимальным отбрасыванием вейвлет коэффициентов // IV Всероссийская научно-техническая конференция "Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий": тез. докладов. М.: Радиотехника, 2011. С.150. ISBN 978-5-88070-296-1.
- 38.Бузыканов С.Н. Алгоритм компенсации шумов системы регистрации в оптических системах наблюдения //IV Всероссийская научно-техническая конференция "Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий": тез. докладов. М.: Радиотехника, 2011. С.175-176. ISBN 978-5-88070-296-1.
- 39.Бузыканов С.Н. Перспективная технология снижения шумов при обработке сигналов в весовом пространстве Соболева в средствах передачи информации // Материалы IX международной научно-технической конференции "Перспективные технологии в средствах передачи информации ПТСПИ-2011": тез. докладов. Владимир: ВлГУ, 2011. Т.1. С.157-158. ISBN 978-5-905527-02-9.
- 40.Buzykanov S.N. Enhancement of poor resolution text images in the weighted Sobolev space // The 19th International Conference on Systems, Signals and Image Processing, IWSSIP 2012. Vienna, Austria, 2012.

Методические издания: 4 учебно-методических пособия

Соискатель



С.Н. Бузыканов

Бузыканов Сергей Николаевич

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА
ВЕСОВОГО ПРОСТРАНСТВА СОБОЛЕВА,
ПОВЫШАЮЩИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано в печать _____._____.13 Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага офисная. Печать трафаретная. Усл.печ.л. 2,0

Тираж 100 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ