

На правах рукописи



**Чуриков Дмитрий Викторович**

**МЕТОДЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ  
НА ОСНОВЕ АТОМАРНЫХ И R-ФУНКЦИЙ, ВЕЙВЛЕТОВ  
В РАДИОФИЗИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ**

Специальность: 01.04.03 – “Радиофизика”

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2016

Работа выполнена в **Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук.**

**Научный руководитель: Кравченко Виктор Филиппович**

доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Крюковский Андрей Сергеевич**

доктор физико-математических наук, профессор,  
декан факультета информационных систем  
и компьютерных технологий  
Автономной некоммерческой организации  
высшего образования «Российский новый  
университет» (АНО ВО РосНОУ)

**Самохин Александр Борисович**

доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой прикладной математики  
Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Московский технологический  
университет» (МИРЭА)

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Физический факультет

Защита состоится «23» декабря 2016 г., в 10:00, на заседании диссертационного совета Д 002.231.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН) по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и на сайте: <http://cplire.ru/rus/dissertations.html>

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2016 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук



**Потапов  
Александр Алексеевич**

## Общая характеристика работы

В последние десятилетия благодаря развитию вычислительной техники методы цифровой обработки сигналов (Уиттекер Р.Х., Котельников В.А., Шеннон К., Даджион Д., Мерсеро Р. Айфичер Э., Джервис Б.) активно развиваются в различных областях физики и техники. Они основаны на преобразованиях сигналов в цифровой форме и обладают таким полезным качеством как универсальность алгоритмов. Этим объясняется (Волосюк В.К., Гуляев Ю.В., Гусевский В.И., Зелкин Е.Г., Кравченко В.Ф., Крюковский А.С., Кутуза Б.Г., Лукин Д.С., Папулис А., Пономарев В.И., Пустовойт В.И., Самохин А.Б., Слока В.К. Хэррис Ф.Дж., Ширман Я.Д. и др.) их широкое распространение в радиоастрономии, дистанционном зондировании природных сред, моделировании прохождения в слоистых структурах, ионосфере и тропосфере, обработке многомерных сигналов, распознавании образов и др.

Для многих из этих задач требуется обработка данных в режиме реального времени. Это достигается путём увеличения вычислительных мощностей, а также путем оптимизации алгоритмов используемых методов. Здесь важным является поддержание заданной точности вычислений в условиях ограниченности исходных данных, а так же воздействию мешающих факторов. Поэтому широко применяются цифровые методы фильтрации, сжатия, спектрального оценивания, весовой обработки, восприятия информации и распознавания образов многомерных данных.

Благодаря применению новых методов в цифровой обработке сигналов активно развивается современная радиолокация. Так как радиолокационные системы (РЛС) относятся к классу радиотехнических систем извлечения информации об объектах в пространстве из принимаемого электромагнитного сигнала, то осуществляется поиск и обнаружение электромагнитного сигнала с последующим измерением его параметров, которые можно использовать для получения необходимой информации.

В основе радиолокации лежат следующие основные физические принципы: рассеяние радиоволн объектами, отличающимися своими физическими параметрами от соответствующих характеристик среды распространения, излучение радиоволн техническими системами, а также эффектом Доплера, заключающийся в изменении частоты отраженного сигнала от движущихся объектов. Одним из важных направлений радиолокации является радиовидение, целью которого является наблюдение объектов в радиодиапазоне электромагнитных волн с разрешением близким к оптическим системам. Для реализации высокого разрешения применяется метод радиолокационного синтеза апертуры (РСА), позволяющий использовать когерентные режимы работы антенны для формирования существенно улучшенной диаграммы направленности. В когерентных радиолокационных системах используется информация об изменении параметров амплитуды и фазы отраженного сигнала. Когерентный приемопередающий тракт РСА состоит из следующих блоков: формирования зондирующего сигнала, усиления, преобразования промежуточной частоты, фазовых детекторов, аналого-цифровых преобразователей.

Эффективность РЛС в основном определяется видом используемых в ней зондирующих сигналов (ЗС), выбор которых зависит от конкретных требований к системе по дальности действия, разрешающей способности, качеству обнаружения, а также точности оценивания координат и параметров целей. Высокая разрешающая способность по дальности может обеспечиваться использованием широкополосных зондирующих сиг-

налов. Важными являются мощность излучаемого сигнала, малые потери и шумы приемно-передающего тракта. Большой динамический диапазон радиолокационного изображения обеспечивается фокусировкой главного и низким уровнем боковых лепестков функции неопределенности зондирующего сигнала.

При разработке и проектировании РЛС необходимо учитывать множество их параметров с целью улучшения качества работы систем. Поэтому основу цифровой обработки многомерных сигналов должны составлять современные вычислительные методы и многопараметрические алгоритмы, позволяющие варьировать физические характеристики, а так же режимы работы РЛС в целом. К ним можно отнести кратномасштабный вейвлет-анализ (Алтайский М.В., Добеши И., Протасов В.Ю., Скопина М.А., Малла С., Новиков И.Я.), который благодаря локальным свойствам в пространственной и частотной областях обладает существенными преимуществами перед преобразованиями Фурье. Вейвлет-анализ оказывается очень эффективным при исследовании знакопеременных, разрывных и нестационарных сигналов.

Существенное улучшение обработки могут обеспечить многомерные весовые функции и вейвлеты со специальными формами опорных областей. В настоящее время в основном используются такие канонические формы как эллипс и прямоугольник в силу простоты их построения. Современные методы R-функций (функций В.Л. Рвачева) (Кравченко В.Ф., Рвачев В.Л., Рвачев В.А.) позволяют на аналитическом уровне с привлечением алгебры логики описывать объекты сложной геометрии. Это предоставляет широкие возможности в режиме реального времени учитывать пространственные особенности объектов, окружающей среды и подстилающих поверхностей.

**Актуальность темы исследования.** В связи с активным развитием современных цифровых систем обработки информации актуальным является создание новых и улучшение существующих алгоритмов цифровой обработки одномерных и многомерных сигналов в радиолокационных станциях, которые основаны на современных вычислительных методах в следующих радиофизических приложениях: радиоастрономия, дистанционное зондирование, моделирование прохождения сигналов в слоистых структурах, ионосфере и тропосфере. К ним можно отнести развитие методов весовой обработки, вейвлет-анализ, который нашел широкое применение при обнаружении кратковременных знакопеременных и сверхширокополосных процессов, а так же конструктивные возможности R-функций для описания многомерных объектов произвольной геометрии.

Такие важные характеристики современных радиолокационных станций как разрешающая способность радиолокационных изображений, точность измерения координат и скорости объектов, помехоустойчивость определяются характеристиками зондирующих сигналов, а также алгоритмами обработки радиолокационных данных. Так, высокая разрешающая способность по дальности может обеспечиваться использованием широкополосных зондирующих сигналов, а большой динамический диапазон радиолокационного изображения обеспечивается фокусировкой главного и низким уровнем боковых лепестков функции неопределенности зондирующего сигнала. Снижение уровня боковых лепестков достигается использованием согласованной фильтрации и весовой обработки. В этом случае снижение боковых лепестков основывается на сглаживании переходных процессов модуляции зондирующих сигналов при формировании и обработке. Так, использование широкополосных и сверхширокополосных зондирующих сигналов могут обеспечить высокую разрешающую способность по дальности.

**Целью диссертационной работы** является исследование, развитие и разработка методов анализа физических систем на основе теорий атомарных, R- функций, вейвлетов и WA-систем функций, построение алгоритмов обработки и моделирования процессов дистанционного зондирования и радиоастрономии с целью улучшения физических характеристик передачи, восстановления и распознавания многомерных сигналов.

**Методы исследований.** Основные методы исследования, применяемые в данной работе: теории атомарных и R- функций, метод преобразования Фурье, вычислительные методы, вейвлет-анализ, WA-системы функций.

**Научная новизна работы.**

- Впервые рассмотрено применение нового класса весовых функций (окон) Кравченко-Кайзера и Кравченко-Наттолла, основанных на теории атомарных функций к задачам обработки сигналов дистанционного зондирования. На их базе получены фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ).
- Рассмотрены частные случаи применения обобщенной теоремы отсчетов Кравченко-Котельникова для отклонения частоты дискретизации от заданной, конечного числа отсчетов, произвольной частотной полосы, а также амплитудно- и частотно-модулированных сигналов.
- Построены новые классы ортогональных и аналитических WA-систем функций (вейвлетов на основе атомарных функций), а также показано их применение для физического анализа сигналов и изображений различной физической природы. Приведены примеры обработки данных дистанционного зондирования поверхности Земли и из радиоастрономии.
- Впервые на основе атомарных функций рассмотрено непараметрическое оценивание функции плотности вероятности последовательности случайных величин.
- Впервые синтезированы двумерные весовые функции со сложной геометрией опорной области, имеющие большое значение при анализе, фильтрации и пространственно-временной обработке сигналов. Получены аналитические многомерные WA-системы функций и исследованы их физические свойства.

**Основные положения, выносимые на защиту.** Автором получены и выносятся на защиту следующие результаты:

- новые классы весовых функций для цифровой обработки радиофизических сигналов и оценки спектральной плотности временных рядов;
- синтезированы цифровые фильтры с конечной импульсной характеристикой на основе атомарных функций, улучшающие частотно-временные свойства сигналов;
- предложены и обоснованы алгоритмы построения семейств ортогональных и аналитических вейвлет-систем на основе атомарных функций для применения к задачам анализа сигналов различной физической природы;
- предложены алгоритмы построения, а также реализованы двумерные весовые функции и аналитические WA-системы функций со сложной геометрией опорной области для пространственно-временной обработки сигналов;
- предложено и обосновано обобщение функции неопределенности по времени и частоте на основе семейства атомарных функций применительно к цифровой обработке зондирующих сигналов в антенных системах.

**Личный вклад автора.** Представленные в диссертации алгоритмы, их программная реализация и проверка, а так же результаты численных экспериментов получены

автором лично. Осуществил подбор тестовых примеров и условия численного эксперимента. Принимал активное участие в постановке и обосновании цели исследования.

**Практическая значимость полученных результатов** заключается в реализации алгоритмов цифровой обработки радиолокационных сигналов и развитии теорий атомарных и R- функций в радиофизических приложениях. Разработанные методы и алгоритмы могут найти применение при решении широкого класса задач радиофизики, включая задачи обработки сигналов в РЛС с синтезированием апертуры, радиовидении, радиоастрономии, дистанционном зондировании, моделировании прохождения сигналов в слоистых структурах, ионосфере и тропосфере и др. Предложенные и обоснованные методы и алгоритмы доведены до численной реализации. Проведен физический анализ полученных результатов, показывающий определенные качественные преимущества предложенных подходов по сравнению с известными.

**Достоверность научных выводов.** Алгоритмы имеют строгое математическое обоснование. Проведен анализ и сравнение полученных результатов с известными, имеющими как точные, так и приближенные решения. Использовались известные как в российской так и зарубежной литературе методы обработки сигналов в РЛС с синтезированием апертуры.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались на следующих российских и международных конференциях, а также научных семинарах:

- Региональная научно-техническая конференция «Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении», Калуга: 2001; 2002.
- 4-я Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов», Нижний Новгород, 3-9 октября 2005.
- Российская конференция «Физика волновых процессов и радиотехнические системы», Самара, 2006.
- 6-я Международная научно-техническая конференция "Физика и технические приложения волновых процессов", Казань, 17-23 сентября 2007 (**Пленарный доклад**).
- 11-я Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн». Звенигород. Московская область, 21-26 мая 2007.
- International Conference RVK08 and MMWP08, Швеция, Векшё (Växjö), 9-13 июня 2008.
- Украинский математический конгресс. Львов, 27-29 августа 2009.
- Международная научная конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2009. Таганрог-Дивноморское, 27 июня – 1 июля 2009.
- 10th International Conference on Signal Processing Proceedings (ICSP'10), Китай, Пекин, 24 – 28 октября 2010.
- Всероссийская радиоастрономическая конференция «Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии», ВРК-2011. Санкт-Петербург, 17-21 октября 2011.
- 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ–2011. Украина, Харьков, 18-21 октября 2011.
- Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Москва: 29-31 марта 2006; 28-30 марта 2007; 26-28 марта 2008; 25-27 марта 2009; 31марта – 2 апреля 2010; 30 марта – 1 апреля 2011;
- Международный симпозиум «Progress in Electromagnetics Research Symposium», The Electromagnetics Academy. Москва: 18-21 августа 2009; 19-23 августа 2012.
- International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, Севастополь: 15-19 сентября 2008; 6-10 сентября 2010 (**Приглашенный доклад**); 17-21 сентября 2012.
- Научная сессия, посвященная Дню Радио, Москва: 2005, 2006, 16–17 мая 2007; 14 — 15 мая 2008; 19–20 мая 2010; 16-17 мая 2012 (**Пленарный доклад**).
- Международная конференция «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва: 26 - 30 октября 2009; 23-25 ноября 2015 (**Пленарный доклад**).
- Международная конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» (ARMIMP). Суздаль: 2005; 22-24 сентября 2009; 20 – 22 сентября

- 2011 (**Пленарный доклад**); 18 – 19 сентября 2012 (**Пленарный доклад**); 15-17 сентября 2014 (**Пленарный доклад**); 20-23 сентября 2015 (**Пленарный доклад**)
- Международная конференция «Дни Дифракции» (DAYS on DIFFRACTION), Санкт-Петербург: 3-6 июня 2008; 2010; 30 мая – 3 июня 2011; 28 мая – 1 июня 2012; 27 – 31 мая 2013; 3 – 6 июня 2014; 25-29 мая 2015; 27 июня – 1 июля 2016.
  - International Kharkov symposium on physics and engineering of microwaves, Milimeter and sub-milimeter waves, MSMW, Харьков: 25-30 июня 2007; 2010; 23-28 июня 2013; 20-24 июня 2016 (**Пленарный доклад**).

По теме диссертации опубликовано **120** научных работ, из которых **36** в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, **3** в иностранных журналах, включенных в **Международные системы цитирования Web of Science и Scopus**, **3** в иностранных журналах, не включённых в международные системы цитирования, **64** в трудах **Международных конференций**, **14** в трудах **Всероссийских конференций**.

**Структура диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка литературы. Основные результаты работы изложены в выводах, которые находятся в конце каждой главы, а также в заключении.

Материал диссертационной работы изложен на 188 страницах, включая 124 рисунка, 24 таблицы, и библиографию из 92 наименований.

### Краткое содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность решаемой проблемы. Сформулированы цель и задачи исследования. Определены научная новизна и теоретическая значимость полученных результатов и их достоверность, основные положения, выносимые на защиту, а так же приведены данные о структуре и объеме диссертационной работы.

**1. В первой главе** рассмотрены методы весовой обработки радиолокационных сигналов на основе атомарных функций (АФ)

$$\text{fup}_N(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(jux) \left( \frac{\sin(u/2)}{u/2} \right)^N \prod_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(u2^{-k})}{u2^{-k}} du$$

и

$$h_a(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(jux) \prod_{k=1}^{\infty} \text{sinc} \left( \frac{\omega}{a^k} \right) du.$$

Предложены новые конструкции весовых функций Кравченко-Кайзера

$$w_{KKz} = \frac{1}{\text{fup}_N(0)} \text{fup}_N \left( \frac{2x}{N+2} \right) \times \frac{I_0(\pi a \sqrt{1-x^2})}{I_0(\pi a)},$$

а так же Кравченко-Наттолла для прямого произведения

$$w_{NK,(k,n)}(t) = w_k(t) \cdot w_{N,n}(t), \quad k=1,..,6, \quad n=1,..,6$$

и свертки

$$cw_{NK,(k,n)}(t) = \frac{1}{b} w_k(bt) \times w_{N,n}(t),$$

где  $w_N = a_0 - a_1 \cos \left( 2\pi \frac{(x+1)}{2} \right) + a_2 \cos \left( 4\pi \frac{(x+1)}{2} \right)$  — функция Наттолла,  $w_k(t)$  — атомарная функция,  $b$  — параметр для улучшения физических свойств  $cw_{NK,(k,n)}(t)$ . Дан их физический анализ и сравнение с известными весовыми функциями, показано улучшение характеристик весовой обработки, а так же предложен функционал качества.

Построены новые конструкции фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ) на основе атомарных функций. Проведен их физический анализ и сравнение с известными низкочастотными, полосовыми и гребенчатыми фильтрами.

Исследованы обобщенные ряды отсчетов на основе атомарных функций

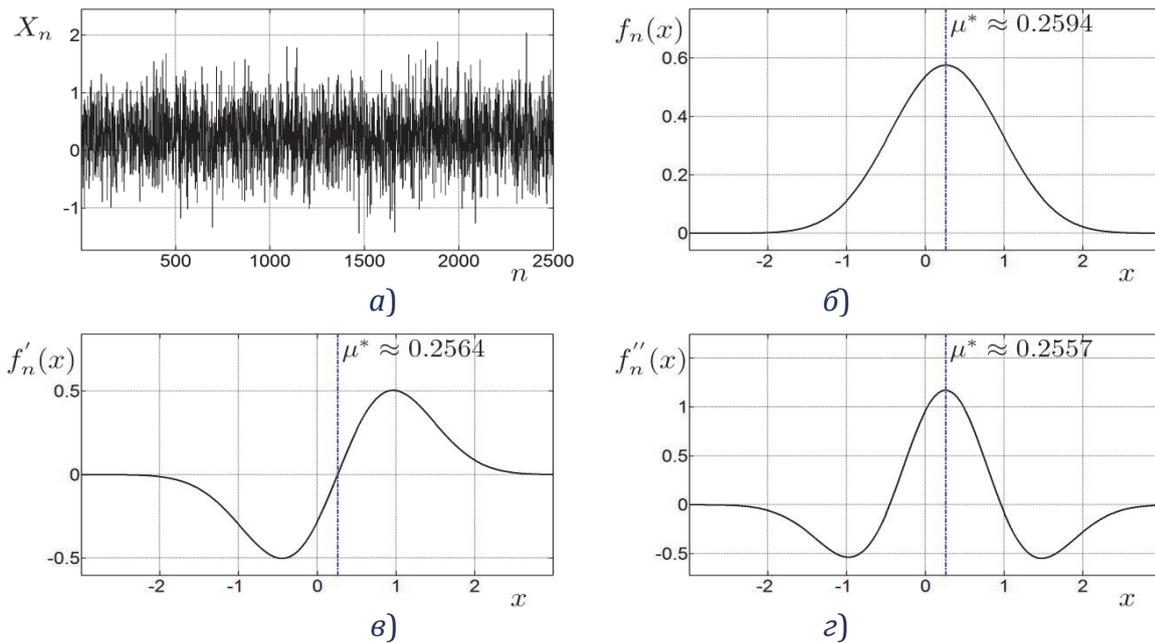
$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(k\Delta) \prod_{j=1}^M \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi}{\Delta a^{j-1}}(t - k\Delta)\right), \quad a(1+a^{-M}) > 2, \quad \Delta = \frac{\pi}{\Omega} \cdot \frac{a(1+a^{-M}) - 2}{a-1}$$

и формирование полосовых фильтров на их основе, позволяющие производить разделение частотных диапазонов, а также настраивать их более точно по сравнению с функцией Уиттекера-Котельникова-Котельникова. Рассмотрена обобщенная теорема отсчетов для случайных сигналов, а так же подробно исследованы следующие частные случаи её применения: при отклонении частоты дискретизации от теоретической  $F$ , для конечного числа отсчетов, в частотной области, для произвольной полосы частот ширины  $F$ , для амплитудно- и частотно- модулированных сигналов. Предложены соотношения для учета погрешностей обобщенной теоремы отсчетов на основе атомарных функций.

Рассмотрено непараметрическое оценивания функции плотности вероятности

$$f_n(x) = \frac{1}{nh} \sum_{j=1}^n K\left(\frac{X_j - x}{h}\right)$$

и её производных 1- и 2-го порядков последовательностей случайных величин.



**Рис. 1.** Последовательность случайных величин  $X_n$ ,  $n = 2500$  (а) и оценка  $f_n(x)$ ,  $Df_n(x)$   $D^2f_n(x)$  для  $a=2$ ,  $r=2$  (б)-(г).

Предложены допустимые весовые функции для которых интегральная среднеквадратичная ошибка оценки не может быть уменьшена одновременно для всех плотностей вероятности  $f(x)$ , т.е. достоверность оценки не зависит от конкретной реализации случайной величины. Допустимая ВФ на основе  $h_a(x)$  вычисляется так

$$K_{a,r}(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ 1 - (1 - \varphi_a^2(\omega))^{r/2} \right\} \exp(i\omega x) d\omega, \quad \text{где } \varphi_a(x) = \prod_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(x/a^k)}{x/a^k}, \quad r = 2, 4, \dots$$

Например  $K_{a,2}(x) = ch_{a,1}(x)$ ,  $K_{a,4}(x) = 2ch_{a,1}(x) - ch_{a,2}(x)$ ,  $K_{a,6}(x) = 3ch_{a,1}(x) - 3ch_{a,2}(x) + ch_{a,3}(x)$ .

Рассмотрен пример оценки функции плотности вероятности последовательности случайных величин  $X_n$  с нормальным законом распределения

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right),$$

где  $\mu = 0.25$ ,  $\sigma = 0.5$ . На рис. 1 представлены результаты оценки функции плотности распределения  $f(x)$ , а также её первых двух производных.

**2. Вторая глава** посвящена применению WA-систем функций Кравченко к различным физическим приложениям. Благодаря локальным свойствам как в пространственной, так и в частотной области, ортогональности, нулевым моментам и кратномасштабному анализу (КМА) вычислительные алгоритмы на основе вейвлетов обладают существенными преимуществами перед Фурье-преобразованиями. Поэтому большой научный и практический интерес представляет построение новых классов ортогональных, а также аналитических WA-систем функций на основе атомарных функций. Построены ортогональные WA-системы функций, порождающие кратномасштабный анализ  $\bigcup_{j \in \mathbb{Z}} V_j = L^2(\mathbb{R})$ ;  $\bigcap_{j \in \mathbb{Z}} V_j = \{0\}$ ;  $f(x) \in V_j \Leftrightarrow f(2x) \in V_{j+1}$ , а сдвиги масштабирующей функция  $\varphi(x) \in V_0$  образуют базис Рисса пространства  $V_0$ .

Ортогональные WA-системы функций на основе атомарных функций  $h_a(x)$  построены с помощью сопряженных зеркальных фильтров, с нормировкой  $\hat{m}_0(0) = \sqrt{2}$  и принадлежащих  $C^n$ . Учитывая свойства АФ  $h_a(x)$ , можно упростить вывод функции масштабирования  $\hat{m}_0(\omega)$  применив модифицированную функцию  $h_a(x)$  без дополнительных преобразований, как это делается с вейвлетами Мейера. В общем случае определяется частичная сумма разложения единицы

$$\sum_{k=-\infty}^{+\infty} h_a\left(x - \frac{2k}{a}\right) \equiv 1, \quad h_{a,M}^{sum}(\omega) = \sum_{k=-M}^M h_a\left(\omega - \frac{2k}{a}\right).$$

Получаем выражения спектров для масштабирующей и вейвлетных функций

$$\hat{\varphi}(\omega) = \frac{2}{\sqrt{a}} \sqrt{\sum_{k=-M}^M h_a\left(\frac{1}{\pi} \frac{a\omega}{2N+1} - \frac{2k}{a}\right)},$$

$$\hat{\psi}(\omega) = \exp(-i\omega) \frac{2\sqrt{2}}{a} \sqrt{\sum_{k=-M}^M h_a\left(\frac{1}{\pi} \frac{a(\omega + \pi)}{2N+1} - \frac{2k}{a}\right) \sum_{k=-M}^M h_a\left(\frac{1}{\pi} \frac{a\omega}{2N+1} - \frac{2k}{a}\right)}.$$

В табл. 1 приведены результаты вычисления констант неопределенности построенных WA-систем функций для различных значений  $a$ , а также вейвлетов Мейера, Котельникова-Шеннона на носителе  $[-8; 8]$ .

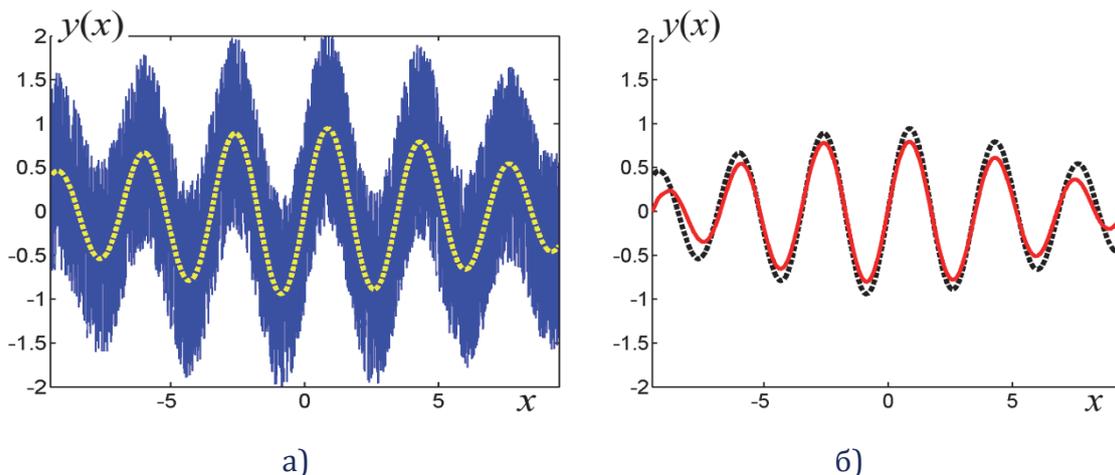
Исследовано применение ортогональных WA-системы функций в цифровой обработке сигналов и изображений для удаления шума и компрессии одномерных сигналов, а также изображений. Рассмотрен характерный пример фильтрации сильноза шумленного сигнала с помощью вейвлетов  $\{\widetilde{h}_{a,M}\}$  и Мейера. Полезный сигнал представляет собой сумму двух гармонических колебаний  $y(x) = \frac{1}{4} \sin\left(\frac{\pi x}{2}\right) + \frac{7}{10} \sin\left(\frac{3\pi x}{5}\right)$ .

На вход фильтра подается смесь полезного сигнала с шумом  $y_1(x) = y(x) + n(x)$ , причем мощность шума составляет 121 % от мощности полезного сигнала. На рис. 2 представлены входной и эталонный сигналы. Для фильтрации применялась 10 каскадная схема с мягким порогом 2.5. Результаты фильтрации приведены на рис. 2.

**Таблица. 1.** Значения констант неопределенности

Параметр $a$	Константы неопределенности		
	Вейвлет $\{\widetilde{h}_{a,M}\}$	Вейвлет Мейера	Вейвлет Котельникова-Шеннона
4	0.9270	<u>1.1459</u>	<b>1.6864</b>
5	1.0267		
6.64	<u>1.1459</u>		
10	1.3499		
$a \rightarrow \infty$	<b>1.6864</b>		

На рис. 3а показано тестовое изображение «Вертолет». Результаты его двухуровневого разложения с помощью WA-систем функций  $\{\widetilde{h}_{2,1}\}$  представлены на рис. 3б, а численные результаты сжатия с помощью WA-систем функций  $\{\widetilde{h}_{a,M}\}$  и вейвлета Мейера см. табл. 2.



**Рис. 2.** Входной (сплошная линия) и эталонный (пунктирная линия) сигналы (а), результат фильтрации для вейвлетов  $\{\widetilde{h}_{6,0}\}$  (сплошная линия) (б).



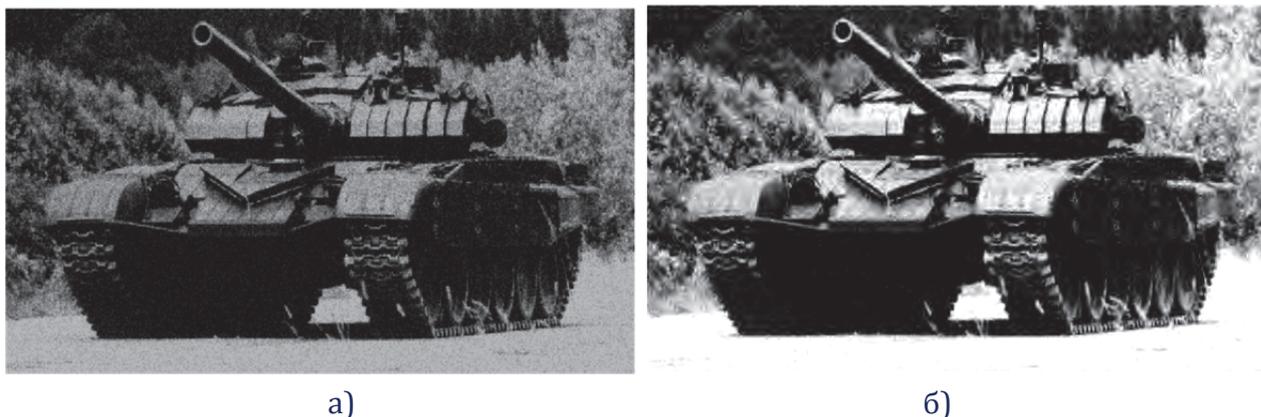
**Рис. 3.** Изображение «Вертолет» (а), двухуровневое вейвлет-разложение с помощью системы вейвлетов  $\{\widetilde{h}_{2,1}\}$  (а).

**Таблица 2.** Результаты сжатия для тестового изображения «Вертолет» (Пороговый уровень 0.03157)

Вейвлет	$A$	$M$	$N$	$\varepsilon, \%$	PSNR, дБ	Доля нулевых компонент, %
$\{\widetilde{h}_{a,M}\}$	4	0	1	<b>0.923</b>	<b>99.008</b>	<b>72.142</b>
	2	1		<b>0.910</b>	<b>99.129</b>	<b>72.080</b>
	4	0	3	1.205	96.691	<b>91.883</b>
	3	1		<b>1.212</b>	96.641	91.312
	2	2		<b>1.200</b>	96.726	91.367
	4	0	5	1.266	96.258	<b>92.424</b>
	2	1		<b>1.182</b>	<b>96.853</b>	<b>92.361</b>
Мейера	–	–	1	0.922	99.014	71.959
	–	–	3	1.178	96.888	91.571
	–	–	5	1.193	96.773	92.056

*Примечание:* жирным шрифтом выделены наилучшие результаты

На рис. 4а показано тестовое зашумленное изображение «Танк Т72» (PSNR = 75 дБ,  $\varepsilon = 16 \%$ ). Результаты его двухуровневого разложения с помощью WA-систем функций  $\{\widetilde{h}_{2,1}\}$  представлены на рис. 4б. В табл. 3 приведены численные результаты сжатия с помощью системы  $\{\widetilde{h}_{a,M}\}$  и вейвлета Мейера.



**Рис. 4.** Зашумленное изображение «Танк Т72» (а), восстановленное изображение системой  $\{\widetilde{h}_{2,1}\}$  (трешхолдинг 0.25) (б).

**Таблица 3.** Результаты сжатия для тестового изображения «Танк Т72» (Пороговый уровень 0.25)

Вейвлет	$a$	$M$	$N$	$\varepsilon, \%$	PSNR, дБ	Доля нулевых компонент, %
$\{\widetilde{h}_{a,M}\}$	3	1	1	10.200	77.479	<b>74.094</b>
	2	2		10.198	77.481	<b>74.094</b>
	4	0	3	<b>10.602</b>	<b>77.143</b>	<b>94.083</b>
	2	1		<b>10.575</b>	<b>77.165</b>	94.080
	4	0	5	<b>10.713</b>	<b>77.053</b>	<b>94.576</b>
	2	1		10.689	<b>77.072</b>	<b>94.563</b>
Мейера	–	–	1	10.190	77.487	74.092
	–	–	3	10.658	77.098	94.086
	–	–	5	10.766	77.009	94.550

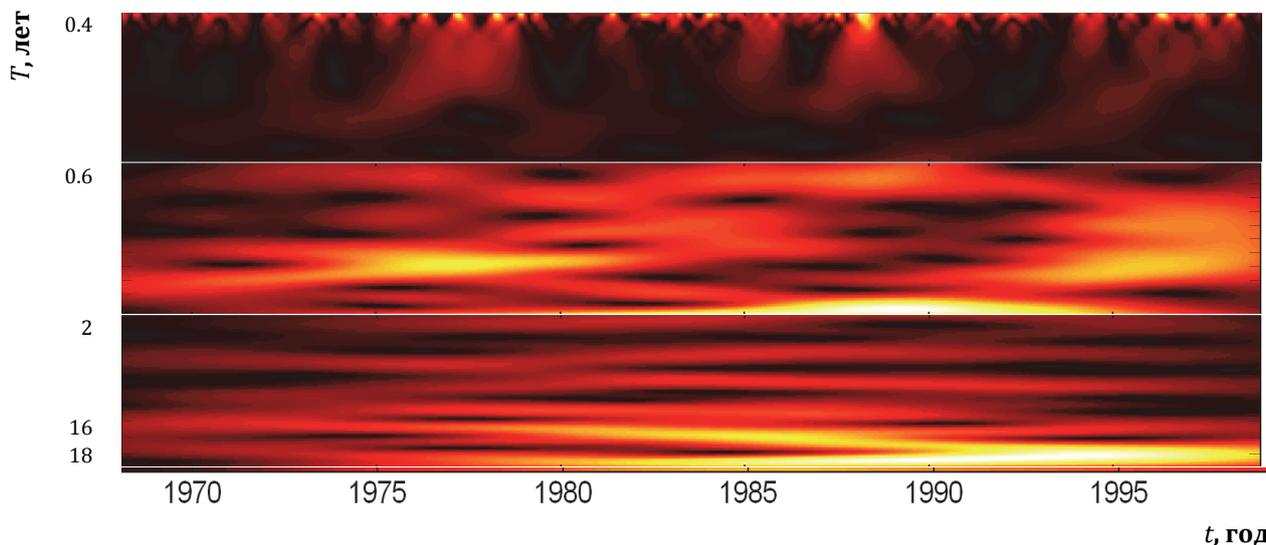
*Примечание:* жирным шрифтом выделены наилучшие результаты

Построены комплексные WA-систем функций для которых строго выполняется условие нулевого среднего

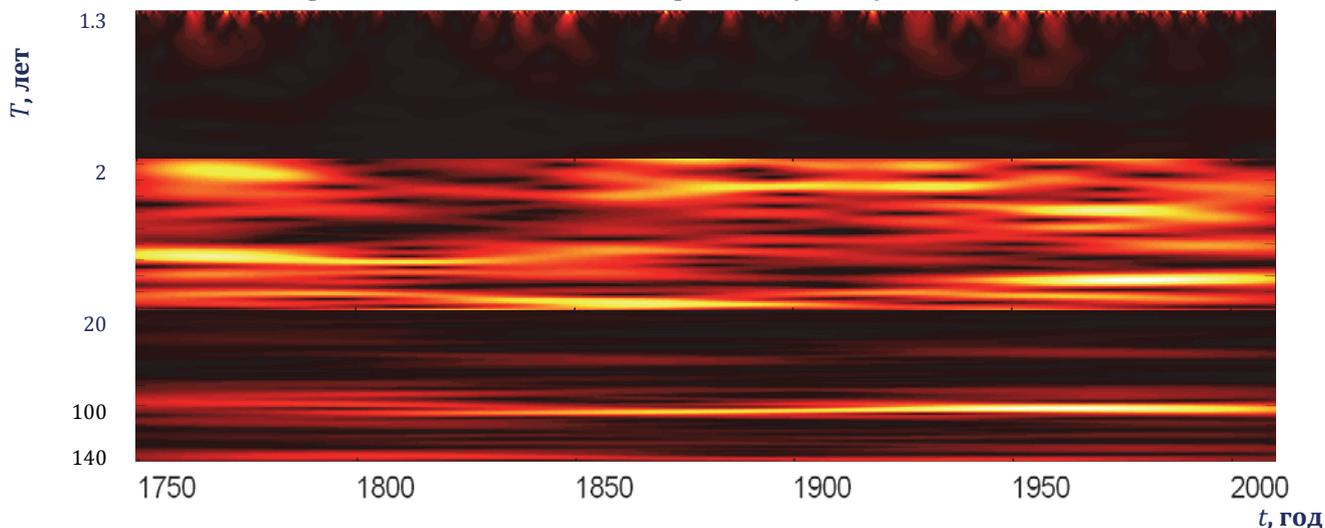
$$\psi(x) = \frac{1}{b} w(qx) \left\{ \exp(i\eta x) - \frac{1}{q} A\left(\frac{\eta}{q}\right) \right\},$$

где  $w(x)$  — атомарная функция,  $\eta$  — параметр модулирования,  $b, q$  — параметры масштабирования,  $A(\eta) = \hat{w}(\eta)$ . Для согласования параметров широкополосности вейвлет-функции и сигнала ( $\mu^\psi \approx \mu^y$ ) определим  $\eta = f_{\text{макс}}^w 2 / \mu^\psi$  или  $\eta \approx f_{\text{макс}}^w 2 / \mu^\psi$ , где  $f_{\text{макс}}^w$  — максимальная частота функции спектральной плотности  $w(x)$ . Получим  $\psi(x) = w(x) \left\{ \exp(i 2 f_{\text{макс}}^w x / \mu') - A(\eta) \right\}$ . Здесь  $\mu'$  — заданный показатель широкополосности,  $f_{\text{макс}}^w$  — максимальная частота функции спектральной плотности  $\hat{w}(\omega)$ .

Построенные аналитические вейвлеты применены к анализу временных рядов различной физической природы. Примерами такой задачи являются, например, исследование космических тел. Представлен вейвлет-анализ кривой блеска квазара 3C273 (см. рис. 5), а так же изменения солнечной активности (см. рис. 6).

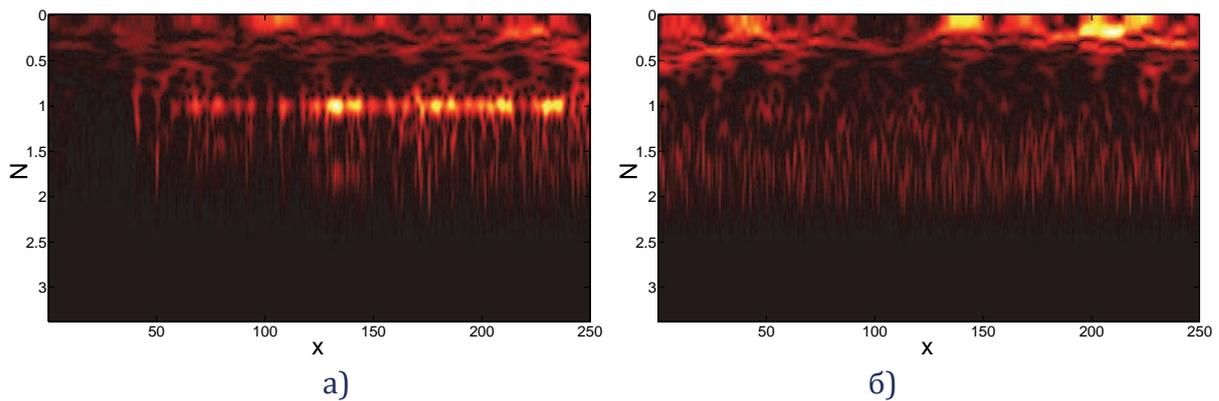


**Рис. 5.** Непрерывное вейвлет-преобразование кривой блеска с вычетом линейного тренда для диапазонов периодов  $(a, b, v)$  для  $a=2$ .



**Рис. 6.** Непрерывное вейвлет-преобразование кривой блеска с вычетом линейного тренда для диапазонов периодов  $(a, b, v)$  для  $a=2$ .

Кроме того рассмотрен вейвлет-анализ временных рядов изменения влажности и атмосферного давления в Москве за период с марта по ноябрь 2013 г. (см. рис. 7)



**Рис. 7.** Результаты частотно-временного преобразования для изменение влажности (а), атмосферного давления (б) (горизонтальная ось проградуирована в днях, вертикальная соответствует уровням декомпозиции).

**3. Третья глава** посвящена теории R-функций и синтезу многомерных цифровых фильтров со сложной геометрией опорных областей. Предложен алгоритм, а так же построены двумерные фильтры с конечной импульсной характеристикой и аналитические двумерные WA-системы функций. Рассмотрена теория R-функций и обратная задача аналитической геометрии которая позволяет на теоретико-множественном описании области  $S$  получить в аналитическом виде уравнение ее границы  $\omega(x, y) = 0$ .

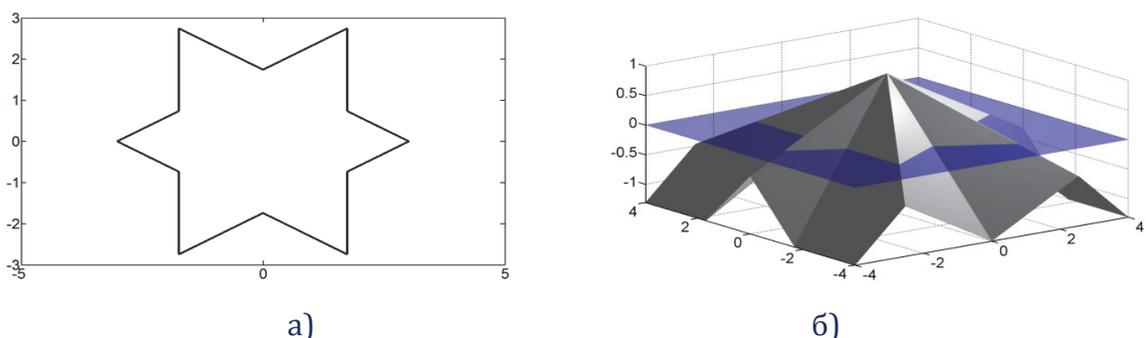
Получено описание опорных областей различной геометрии. Так, логическая формула для описания звездообразной опорной области (см. рис. 8) имеет вид

$$\omega_2(x_1, x_2) = [\omega_{21} \wedge \omega_{22} \wedge \omega_{23}] \vee [\omega_{24} \wedge \omega_{25} \wedge \omega_{26}],$$

где  $\omega_{21} = \frac{-1}{\sqrt{3}}(x_1 - \sqrt{3})$ ,  $\omega_{22} = 1 + \frac{1}{3}(x_1 + x_2\sqrt{3})$ ,  $\omega_{23} = 1 + \frac{1}{3}(x_1 - x_2\sqrt{3})$ ,

$$\omega_{24} = \frac{1}{\sqrt{3}}(x_1 + \sqrt{3}), \omega_{25} = 1 + \frac{-1}{3}(x_1 - x_2\sqrt{3}), \omega_{26} = 1 + \frac{-1}{3}(x_1 + x_2\sqrt{3}).$$

При синтезе двумерных цифровых фильтров с конечной импульсной характеристикой особое внимание уделяется их спектральным и конструктивным свойствам.



**Рис. 8.** Звездообразная опорная область (а), вид R-функции и плоскость  $y = 0$  (б).

Обычно синтезируются фильтры с круглой, прямоугольной или гексагональной формой области пропускания в частотном пространстве. Пример сложной геометрии опорной области показан на рис. 9а. Блок-схема процедуры обработки представлена на рис. 10а. Эта область может быть реализована как суперпозиция простых (см. рис. 9б) с известными ИХ каждой из них:  $h_1(f_1, f_2)$  и  $h_2(f_1, f_2)$ . В месте сопряжения спектральных

компонент необходимо учитывать их взаимное наложение (область  $\omega_E$  на рис. 9б), которое приводит к неточностям расчета требуемой ИХ и усложняет процедуру обработки (см. рис. 10б). Теория R-функций позволяет на аналитическом уровне без аппроксимаций описать геометрию сложной области пропускания фильтра.

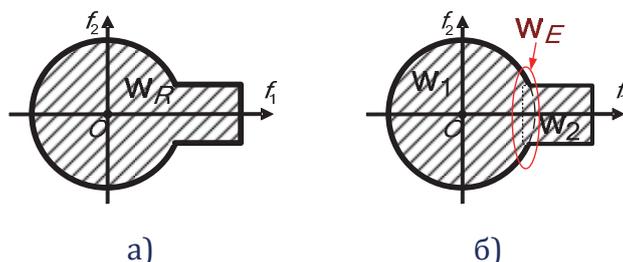


Рис. 9. Сложная геометрия (а) и её аппроксимация комбинацией двух простых (б).

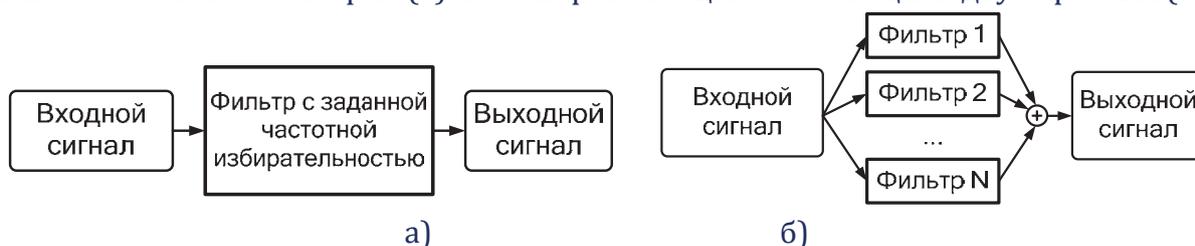


Рис. 10. Блок схемы обработка сигнала для случаев реализации желаемого фильтра со сложной геометрией опорной области (а) и аппроксимации простыми (б).

Построен алгоритм синтеза двухмерного цифрового КИХ фильтра.

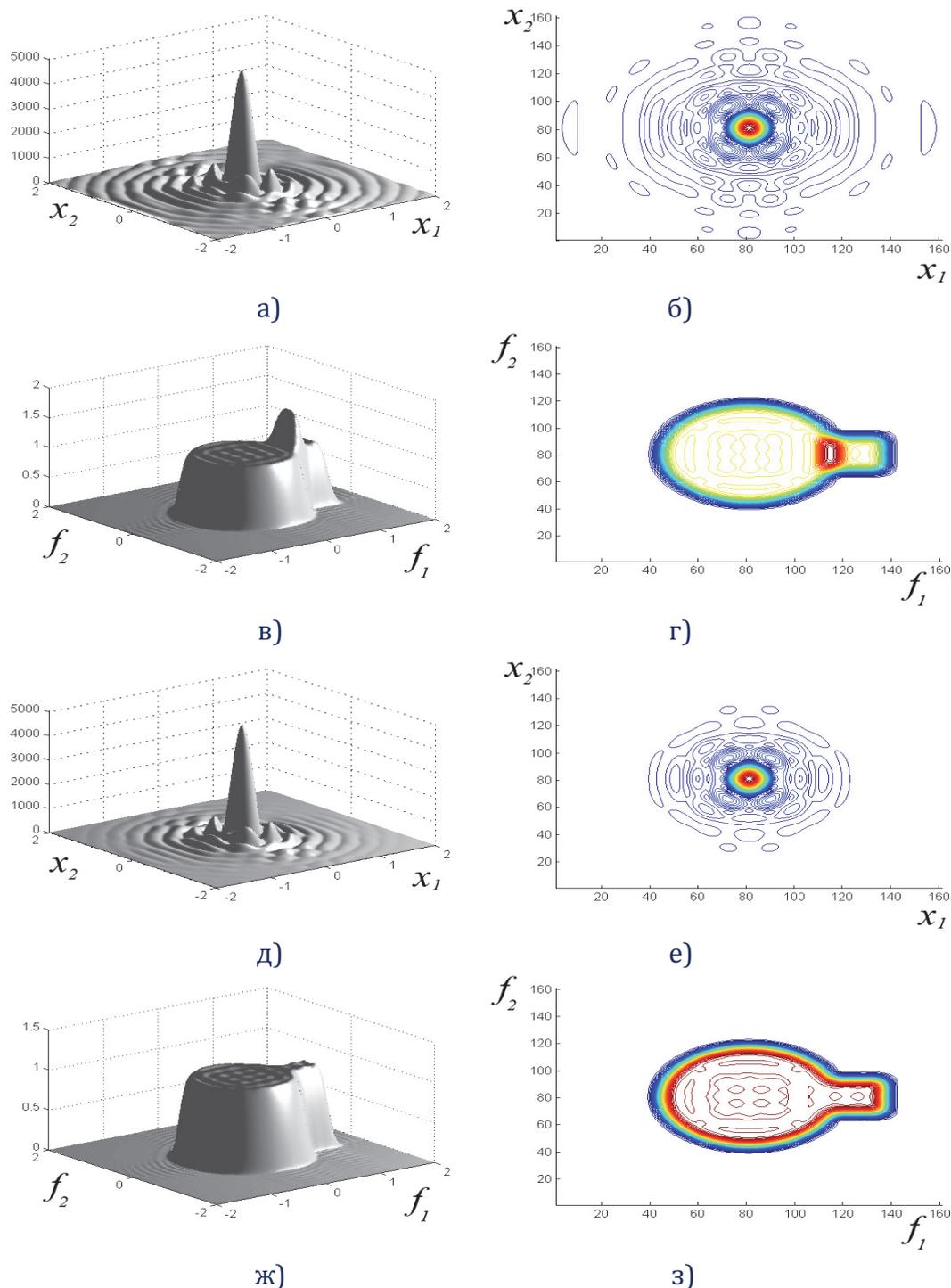
1. Задается область пропускания спектральной характеристики  $\omega(f_1, f_2)$ .
2. Определяется идеальная частотная характеристика низкочастотного фильтра.
3. Рассчитывается импульсная характеристика идеального фильтра.
4. Для улучшения сходимости коэффициенты умножаются на ВФ  $w(x_1, x_2)$ .

Для реализации фильтра с опорной областью (рис. 9а) функция  $\omega_{WF}(x_1, x_2)$  представляет собой конусоидальную поверхность, образующую окружность радиуса  $R_{WF}$  при пересечении с плоскостью  $x_1 O x_2$ . Изменяя  $R_{WF}$ , варьируем степень гладкости АЧХ синтезируемого фильтра и временную локализацию ИХ. На рис. 11а,б представлена ИХ и её линии уровней КИХ фильтра, аппроксимированного суммой двух ИХ с простыми опорными областями.

Таблица 4. Физические характеристики эталонного и синтезированных фильтров

ИХ	$R_{WF}$	$\gamma_2 / \gamma_3$	$\gamma_3$	$\gamma_4 / \gamma_3$	$\gamma_9$	$D_t$
эталон	6	0.444			—	0.806
$h_{12}(f_1, f_2)$	6	0.569	0.444	0.475	-54.37	0.724
$h_R(f_1, f_2)$	6	0.569	0.444	0.475	<b>-55.19</b>	<b>0.721</b>
эталон	8	0.444			—	0.806
$h_{12}(f_1, f_2)$	8	<b>0.522</b>	0.444	0.469	-46.01	0.752
$h_R(f_1, f_2)$	8	0.528	0.444	0.469	<b>-47.00</b>	<b>0.747</b>
эталон	10	0.444			—	0.806
$h_{12}(f_1, f_2)$	10	0.519	0.444	0.463	-39.11	0.769
$h_R(f_1, f_2)$	10	0.519	0.444	0.463	<b>-39.84</b>	<b>0.764</b>

Поведение АЧХ и её линий уровней показано на рис. 11в,г. ИХ фильтра, реализованного с помощью R-функций, приведена на рис. 11д, АЧХ и линии уровней изображены на рис. 11е,ж,з. В табл. 4 представлены средние значения физических характеристики эталонных и синтезированных фильтров для сечений плоскостями  $f_1=0$ ,  $f_2=0$ ,  $f_1=f_2$ ,  $f_1=-f_2$ . В таблице приведены следующие физические параметры: относительное изменение положения первого нуля; ширина по уровню  $-3$  дБ; относительное изменение ширины по уровню  $-6$  дБ; максимальный уровень боковых лепестков; относительное изменение константы неопределенности по времени  $D_t$  (улучшение временного разрешения).

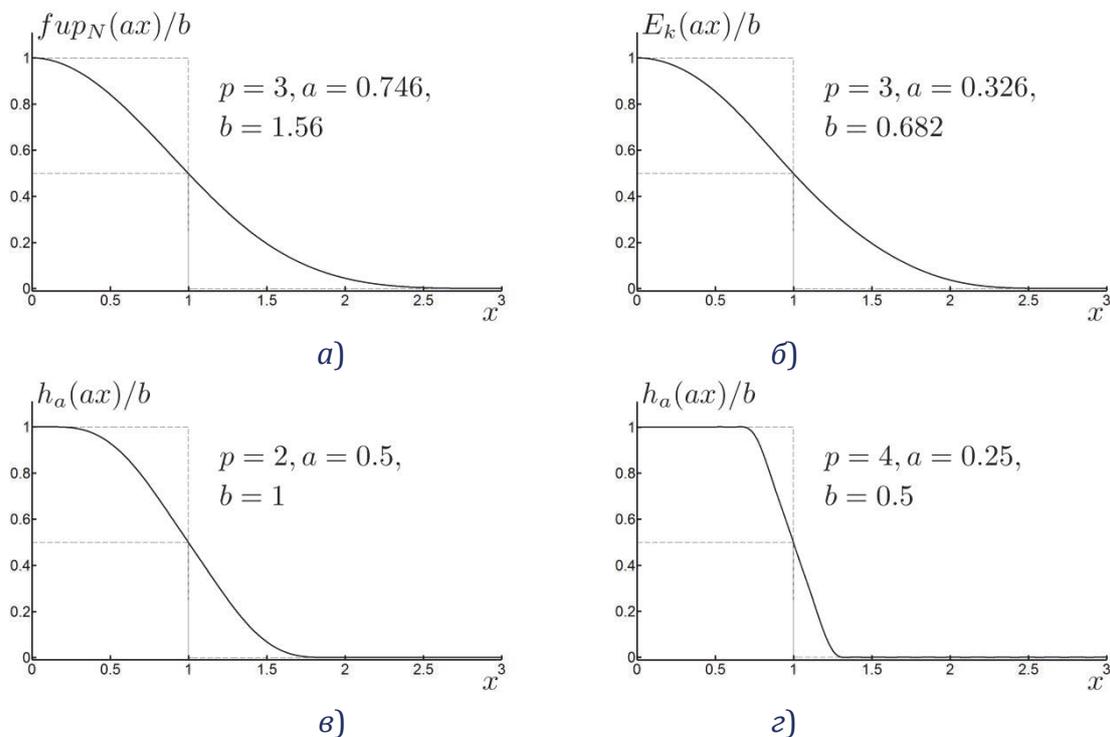


**Рис. 11.** Импульсная характеристика (а), АЧХ (в), линии уровней (б, г) составного фильтра; Импульсная характеристика (д), АЧХ (ж), линии уровней (е, з).

Алгоритмы синтеза аналитических WA-систем функций (2DWA) со сложной геометрией опорной области в пространстве частотном и временном пространствах представлены на рис. 12. Используются нормированные весовые функции  $b \cdot w(c \cdot x)$  ( $\max bw(cx) = bw(0) = 1$ ,  $bw(c) = 0.5$ ), параметры нормировки которых приведены в табл. 5. Графики нормализованных АФ  $fup_3$ ,  $\Xi_3$ ,  $h_2$ ,  $h_4$  представлены на рис. 13.



**Рис. 12.** Блок-схемы алгоритмов синтеза аналитических 2DWA со сложной геометрией опорной области в частотном (а) и временном (б) пространствах.



**Рис. 13.** Нормализованные атомарные функции  $fup_3(x)$  (а),  $\Xi_3(x)$  (б),  $h_2(x)$  (в),  $h_4(x)$  (г).

Таблица 5. Нормировка некоторых атомарных функций

АФ	$c$	$b$	$\text{supp } w(x)$	$E = \ f(x)\ _{L_2}$
$fup_3$	0.746	1.557	3.351	0.8665
$fup_4$	0.819	1.718	3.663	0.8676
$\Xi_2$	0.373	0.755	2.681	0.8517
$\Xi_3$	0.326	0.682	3.067	0.8729
$h_2$	0.500	1.000	2.000	0.8997
$h_3$	0.333	0.667	1.502	0.9401
$h_4$	0.250	0.500	1.333	0.9564

4. В четвертой главе рассматриваются методы цифровой обработки сигналов в радарх с синтезированной апертурой при боковом обзоре на основе предложенных весовых функций. Предполагаем, что ЛА перемещается с постоянной скоростью по прямолинейной траектории, которая не меняет своей высоты над поверхностью Земли (см. рис. 14). Передатчик излучает гармонический зондирующий сигнал

$$u_0(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где  $U_0$  — амплитуда,  $\omega_0$  — угловая частота,  $\varphi_0$  — начальная фаза сигнала.

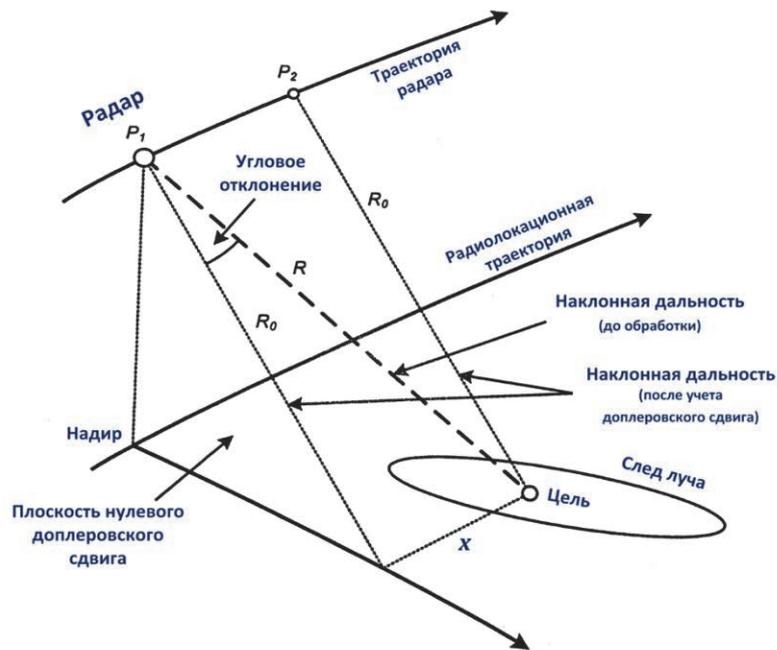


Рис. 14. Геометрия синтезирования апертуры радара.

Геометрия синтезирования апертуры с учетом формы земной поверхности

$$\frac{R_e}{\sin \theta_n} = \frac{R_e + h}{\sin \theta_i} = \frac{R_0}{\sin \beta_e}, \quad \cos \beta_e = \frac{R_e^2 + (R_e + h)^2 - R_0^2}{2R_e(R_e + h)}, \quad G = R_e \beta_e.$$

Здесь угол падения  $\theta_i$  больше угла между надиром и зондирующим лучом  $\theta_n$  на величину угла  $\beta_e$ . Для спутника это различие составляет несколько градусов. Период обращения спутника вокруг земли определяется радиусом его орбиты и составляет  $T = \sqrt{4\pi^2 R_s^3 / \mu_e}$ , где  $\mu_e = 3.9860 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$  — гравитационная постоянная Земли.

Тогда угловая скорость составит  $\omega_s = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\mu_e / R_s^3}$ , а поступательная  $V_s = R_s \omega_s = \sqrt{\mu_e / R_s}$ . Угол отклонения для прямоугольной аппроксимации можно выразить через действительный угол отклонения так

$$\theta_r = \frac{V_r}{V_g} \theta_{sq} = \frac{V_s}{V_r} \theta_{sq}, \quad \cos \theta_r = \sqrt{1 - \left( \frac{V_r \eta}{R(\eta)} \right)^2},$$

откуда  $R_0 = R(\eta) \cos \theta_r$  или  $R_0 = \sqrt{R^2(\eta) - V_r^2 \eta^2} = R(\eta) \sqrt{1 - \left( \frac{V_r \eta}{R(\eta)} \right)^2}$ .

При восстановлении радиолокационного изображения (РЛИ) возникает проблема согласования частот дискретизации входного сигнала цифровой системы обработки (ЦСО) и сигнала РЛИ. На практике удобно понижение частоты дискретизации на входе ЦСО с частоты зондирования  $f_3 = 1/T_3$  до частоты дискретизации РЛИ  $f_u$  без энергетических потерь. Использование весовой обработки повышает качество результирующего изображения.

**На первом этапе** происходит понижение частоты отсчетов сигнала с  $f_3$  до  $f_u$  при возможных меньших энергетических потерях и одновременном сужении ширины спектра обрабатываемого сигнала.

**На втором** для меньшего числа отсчетов цифрового сигнала на частоте дискретизации  $f_u$  формируется сигнал РЛИ.

Рассмотрена обработка сигнала разностной частоты дальномера с частотной модуляцией (ЧМ) с использованием метода весового усреднения, который позволяет существенно уменьшить влияние помех и повысить точность определения величины сдвига частоты. Определение весовой оценки частоты разностного сигнала имеет вид

$$S = \int_0^{T_a} \alpha(x) F(x) dx,$$

где  $T_a$  — интервал анализа частоты,  $\alpha(x)$  — нормированная весовая функция

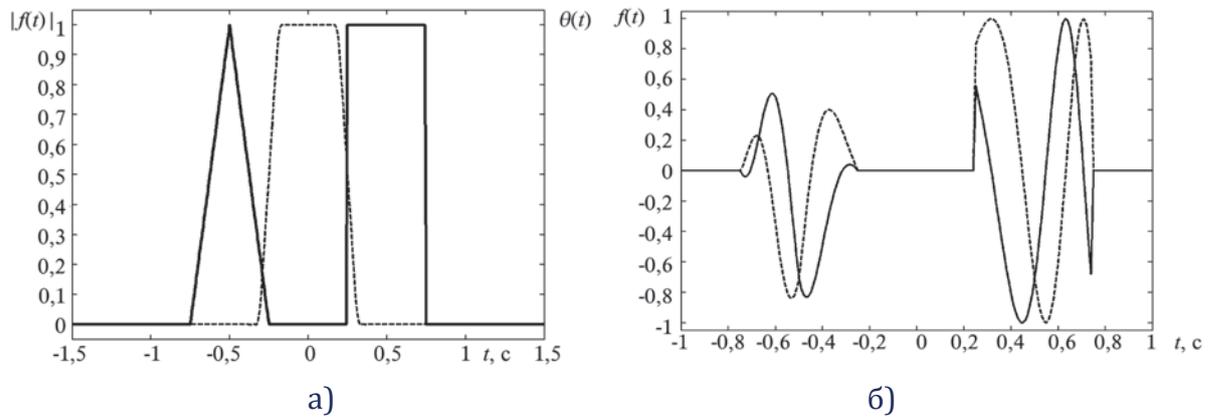
$$\int_0^{T_a} \alpha(x) dx / T_a = 1, \quad F(x) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi_p(x)}{dx} = \frac{x_3}{2\pi} \frac{d\omega(x)}{dx} = x_3 f'(x).$$

Дан анализ следующих основных погрешностей, возникающих при измерении физических величин: оценка величины отсчета по дискретизованному сигналу; отличие реального закона модуляции частоты от заданного из за нелинейности модуляционной характеристики; погрешность оценки моментов перехода через ноль разностного сигнала из за шумов; погрешность определения отсчетов ВФ.

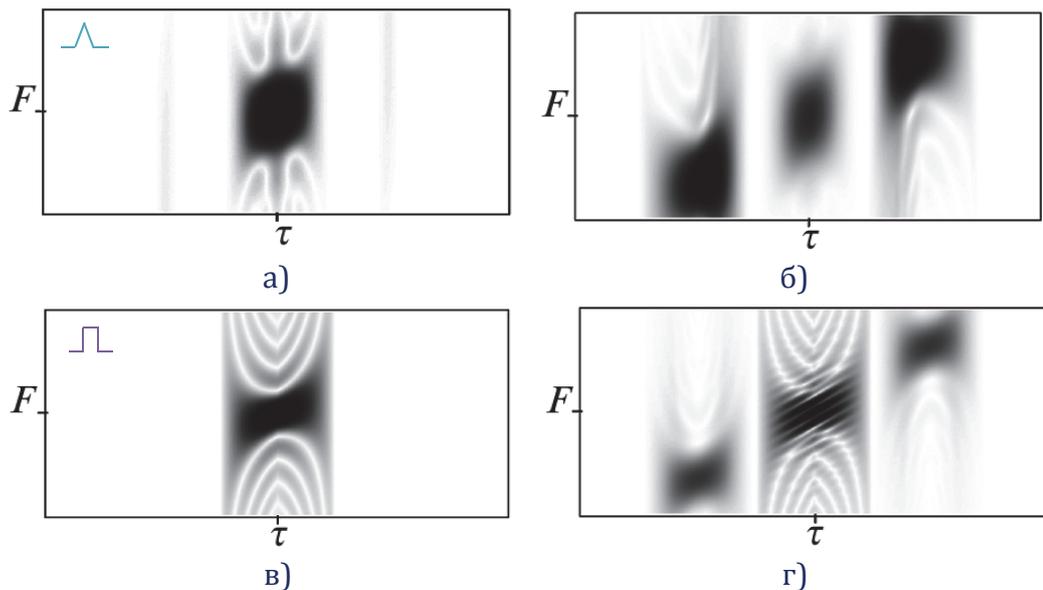
Для повышения надежности обнаружения слабых сигналов на фоне помех используются сложные ЗС. При этом они должны обеспечивать низкий уровень боковых лепестков и высокую разрешающую способность по задержке и частоте. Применение теории АФ позволяет проводить многопараметрический анализ и синтез ЗС, в частности получить обобщение ФН по времени и частоте на основе АФ

$$\chi_K(\tau, F, a) = \int_{-\infty}^{\infty} \theta(t-a) f\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \tilde{f}\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \exp(i2\pi Ft) dt.$$

Рассмотрены примеры анализа простых и сложных зондирующих сигналов как с линейной, так и нелинейной частотной модуляцией. Например, последовательность импульсов треугольной и прямоугольной форм с линейной частотной модуляцией представлена на рис. 15а. В качестве ВФ выбрана  $\theta(t)=h_4(4t)$  (см. рис. 15б). На рис. 16 представлены срезы ФНК для  $a = -0.5, -0.25, 0.5$ . В плоскости  $a = -0.5$  получаем ФН треугольного, импульса в плоскости  $a = 0.5$  прямоугольного импульсов.



**Рис. 16.** Графики временной зависимости функций  $f(t)$  (сплошная линия) и  $\theta(t) = h_4(4t)$  (пунктирная линия) (а), частотно-модулированный сигнал (б).

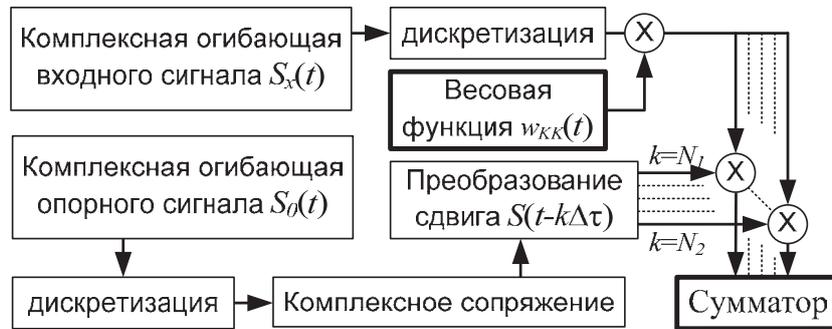


**Рис. 16.** Срезы ФН  $\chi_k(\tau, F, a)$ : а)  $a = -0.5$ ; б)  $a = -0.25$ ; в)  $a = 0.5$ ; г)  $\theta_1(t) \equiv 1$ .

Рассмотрены комбинированные методы корреляционной обработки радиолокационных сигналов, основанные на теории атомарных и WA-системах функций. Предложены алгоритмы их оптимальной обработки. Построен функционал качества, позволяющий оценить эффективность обработки РС для конкретных физических моделей.

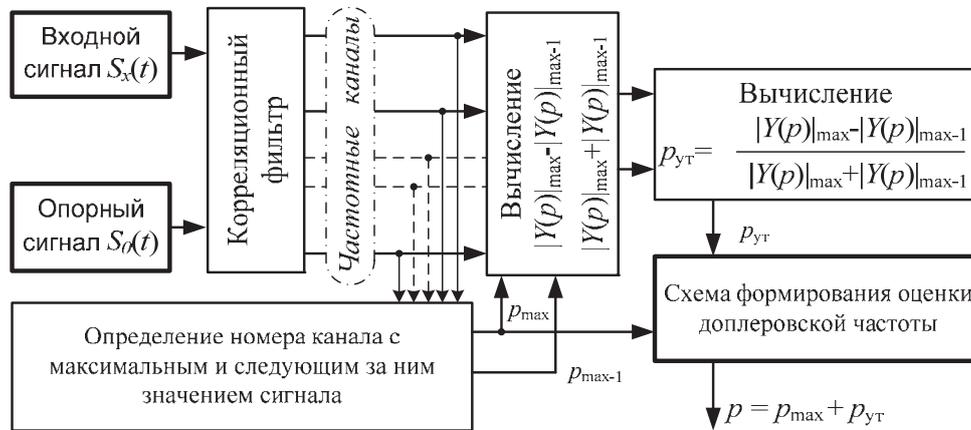
Структурная схема модифицированного алгоритма дискретной когерентной фильтрации радиолокационного сигнала приведена на рис. 17.

Блок-схема алгоритма определения доплеровской частоты с уточнением приведена на рис. 18. Когда результаты корреляционной обработки подвержены воздействию помех, стандартная схема разностного дифференцирования может стать причиной существенных ошибок.



**Рис. 17.** Структурная схема модифицированного алгоритма дискретной когерентной фильтрации радиолокационного сигнала.

Для поиска локальных максимумов проводится предварительная фильтрация. Определение максимума осуществляется по алгоритму, блок-схема которого представлена на рис. 19.



**Рис. 18.** Блок-схема определения доплеровской частоты с оценкой.

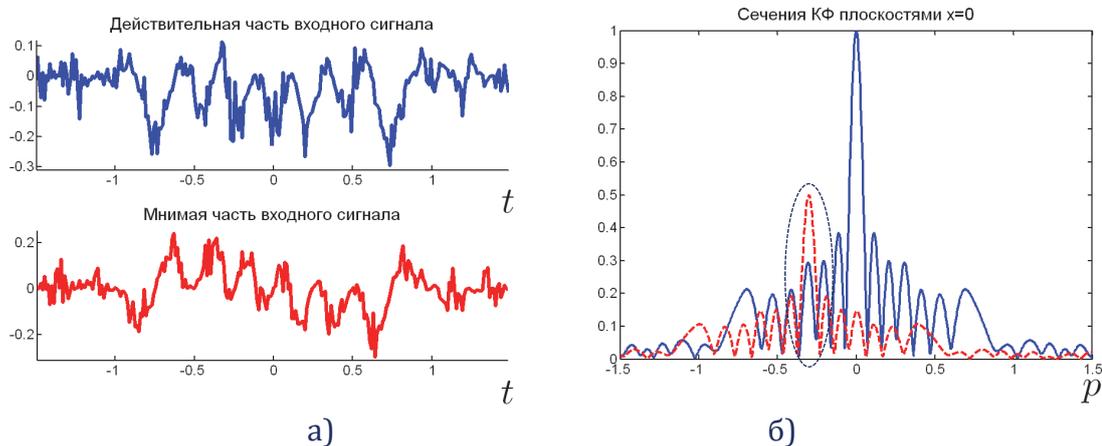


**Рис. 19.** Блок-схема поиска максимума функции.

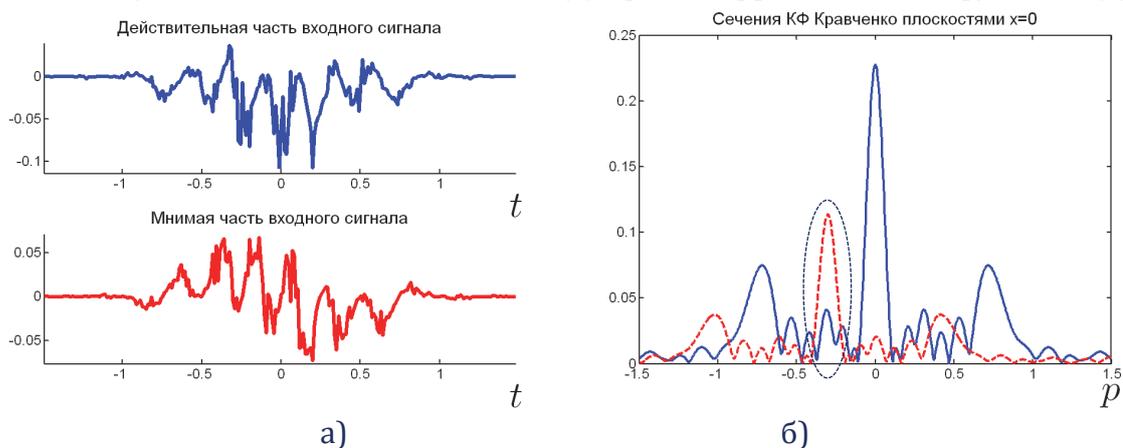
В качестве опорного сигнала выбран полином Эрмита 6-го порядка. Графики действительной и мнимой частей сигнала искаженного помехой с нормальным законом распределения (дисперсия  $D = 0.2$ ) приведены на рис. 20 а. Результат когерентной обработки входного сигнала см. рис. 20б.

Входные зашумленные сигналы с весовой обработкой и результаты их когерентной фильтрации показаны на рис. 21.

Как следует из графиков, введение весовой функции существенно улучшает результаты корреляционной обработки зашумленных РС.



**Рис. 20.** Действительная (сплошная линия) и мнимая (пунктирная линия) части зашумленного входного сигнала (а), срезы корреляционной функции (б).



**Рис. 21.** Действительная и мнимая части входного зашумленного сигнала (а) и срезы корреляционной функции плоскостью  $x=0$  (б) с весовой обработкой для  $w_1(t)$  ( $a=2, b=2, g=0.5$ ).

**В заключении** приводятся следующие основные результаты, полученные в диссертационной работе:

- новые классы весовых функций для цифровой обработки радиофизических сигналов и оценки спектральной плотности временных рядов;
- синтезированы цифровые фильтры с конечной импульсной характеристикой на основе атомарных функций, улучшающие частотно-временные свойства сигналов;
- предложены и обоснованы алгоритмы построения семейств ортогональных и аналитических вейвлет-систем на основе атомарных функций для применения к задачам анализа сигналов различной физической природы;
- предложены алгоритмы построения и реализованы двумерные весовые функции и аналитические WA-системы функций со сложной геометрией опорной области для пространственно-временной обработки сигналов;
- предложено и обосновано обобщение функции неопределенности по времени и частоте на основе семейства атомарных функций применительно к цифровой обработке зондирующих сигналов в антенных системах.

**В приложении** рассмотрен гибридный метод выделения контуров зашумленных изображений, основанный на применении атомарных функций, вейвлетов, контурных сигналов и функций В.Л. Рвачева.

Цифровые изображения, в том числе и радиолокационные, формируются из информации, поступающей от датчиков. После дискретизации и квантования составляются матрицы растровых изображений, имеющие размерность  $N \times M$ . Каждая ячейка матрицы описывает некоторую точку цифрового изображения.

Для подавления помехи используются подробно рассмотренные в первой главе КИХ-фильтры. В результате получаем сглаженную версию дискретной функции яркости  $p^*(k)$  исходного изображения. Её значения внутри интервалов сегментации будут приближаться к эталонным, а значительная часть шума, имеющая высокочастотный характер, будет подавлена. Для атомарной функции границы сегментов будут соответствовать точкам перегиба  $p^*(k)$ . В силу гладкости АФ, эту точку можно найти, вычислив первую разностную производную  $p^*(k)$  и определив локальный максимум ее модуля. Идеальная функция яркости является кусочно-гладкой. Тогда, зная границу сегмента и его центральное значение, можно доопределить результирующую функцию яркости  $s^*(n)$  на краях сегментов. Таким образом, производится глубокая фильтрация и восстановление областей изображения, близких к контуру.

В качестве примера рассмотрим изображение «Крест с областью» (см. рис. 22а). Помехой является двумерный случайный процесс, плотность распределения которого описывается нормальным законом ( $m_x = 0, \sigma_x = 1$ ). Диапазон изменения значений яркости полезного изображения:  $[0.25; 0.75]$ . Зашумленное изображение представлено на рис. 22б. Результат фильтрации тестового изображения приведен на рис. 22в.

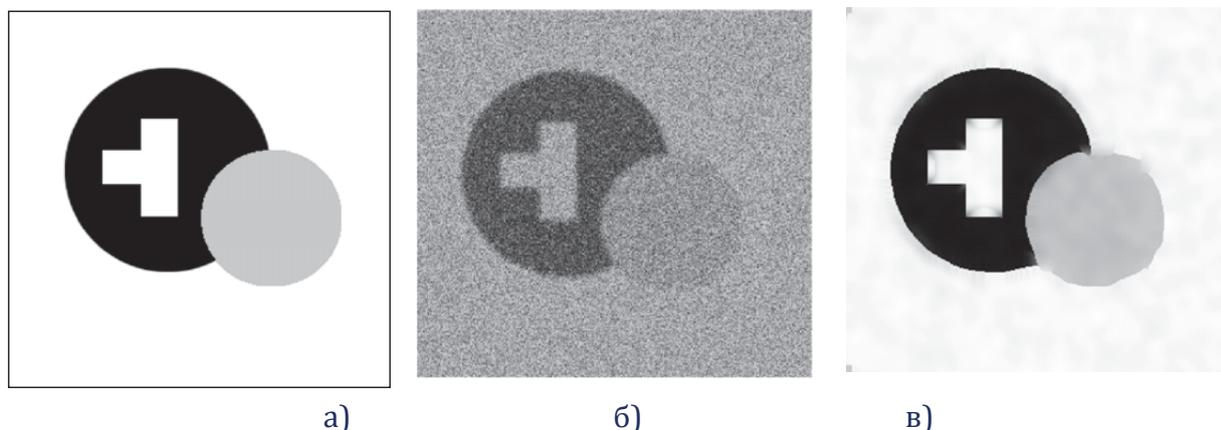


Рис. 22. Эталонное (а), зашумленное (б) и отфильтрованное (в) изображения.



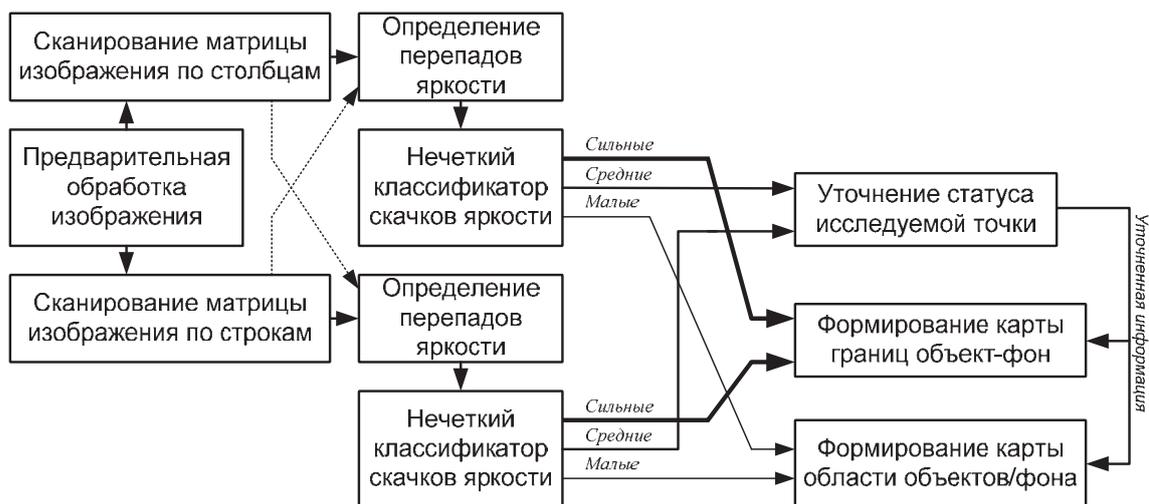
Рис. 23. Структурная схема обнаружителя границы изображения.

Выделение контуров является одной из подзадач сегментации, цель которой заключается в разбиения изображения на части со сходными свойствами, например, с близкими значениями яркости («лес», «поле», «водоем» и др.). Основные этапы работы обнаружителя границы приведены на структурной схеме (рис. 23).

Применение теории нечетких множеств повышает точность классификации точек изображения в условиях помех и неоднородности фона. В случаях, когда не удастся однозначно отнести точку к объекту/фону или границе фон-объект нечеткое правило

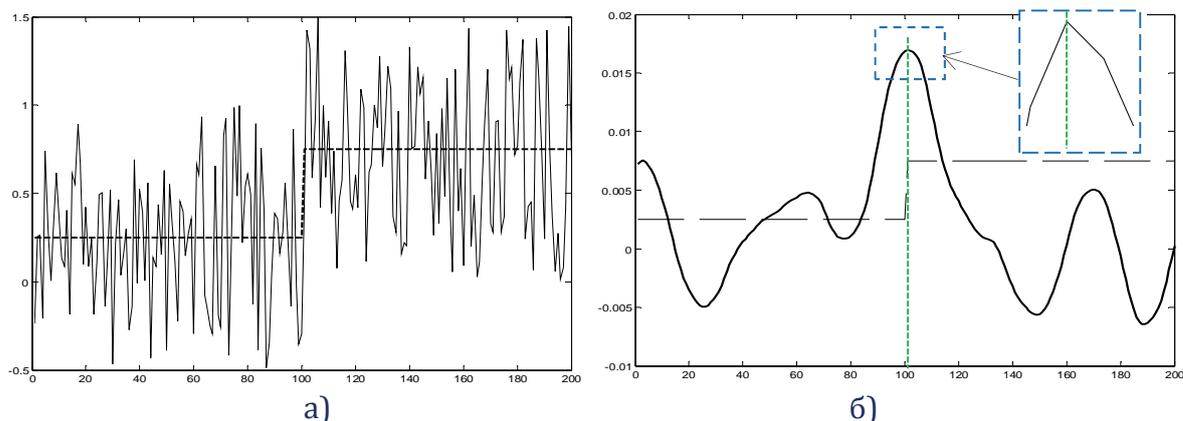
позволяет сделать локальные уточнения. На рис. 24 приведена блок-схема, описывающая процесс выделения и классификации контуров изображения с привлечением нечеткой логики. На основании полученных данных о скачке яркости, накапливаемой информации о шумовом воздействии и других мешающих факторах нечеткий классификатор присваивает точке изображения вероятность принадлежности её к области границы фон-объект.

Затем, сопоставляя полученные данные, происходит приведение к четкому выводу и объединение точек контуров. На заключительном этапе изображение сегментируется в соответствии с информацией о контурах и фрагментах изображения.



**Рис. 24.** Блок-схема, описывающая процесс выделения и классификации контуров изображения.

Зашумленный эталонный сигнал изображен на рис. 25а, а результат согласованной фильтрации скачка яркости на рис. 25б. После поиска локальных экстремумов формируется контурное изображение, заданное матрицей. В этой матрице точкам контура исходной сцены соответствуют отличные от нуля значения. Областям фона и объектов соответствуют нулевые элементы матрицы.



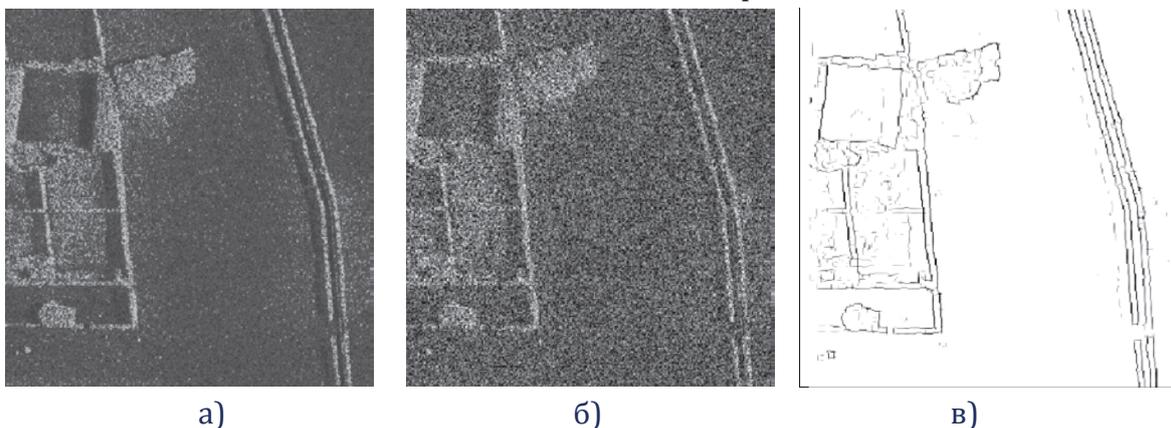
**Рис. 25.** Зашумленный эталонный сигнал (а) и результат согласованной фильтрации скачка яркости (б) (пунктирная линия – уменьшенная копия эталонного сигнала).

В качестве шумового воздействия используется двумерный случайный процесс, плотность распределения которого описывается нормальным законом распределения с параметрами  $m_x = 0$ , а среднеквадратическим отклонением  $\sigma_x$  выбираемым таким

образом, чтобы отношение энергии полезного сигнала и помехи было порядка нескольких децибел. Результаты выделения контуров тестового радиолокационного изображения «дорога» приведен на рис. 26.

Кодирование контура – это этап получения дискретного сигнала, описывающего границы оцифрованного изображения. Рассмотрены алгоритмы получения упорядоченных контурных сигналов: «в системе отсчета с началом в центре тяжести», а так же «минимальное дерево».

Дана классификация контурных сигналов, а так же предложен метод автоматизированного аналитического описания сложного геометрического объекта.



**Рис. 26.** Выделения контуров зашумленного тестового изображения «дорога». Исходное (а) и зашумленное (б) изображения, результат выделение контура (в).

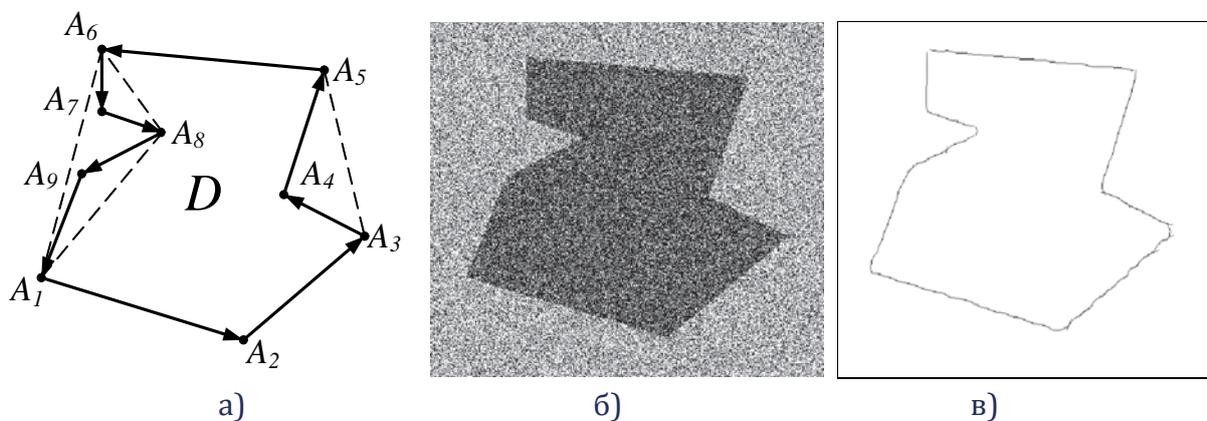
Описание чертежа для многоугольной области строится на основе уравнение прямой

$$f_i^0 \equiv \frac{1}{l_i} [-x(y_{i+1} - y_i) + y(x_{i+1} - x_i) - x_{i+1}y_i + x_iy_{i+1}] = 0,$$

где  $l_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$ . Для произвольного многоугольника  $A_1, A_2, \dots, A_9$ , представленного на рис. 27а можно записать

$$F(x, y) \equiv S_3(f_1) \wedge S_3(f_2) \wedge (S_3(f_3) \vee S_3(f_4)) \wedge S_3(f_5) \wedge ((S_3(f_6) \vee S_3(f_7)) \wedge (S_3(f_8) \vee S_3(f_9))),$$

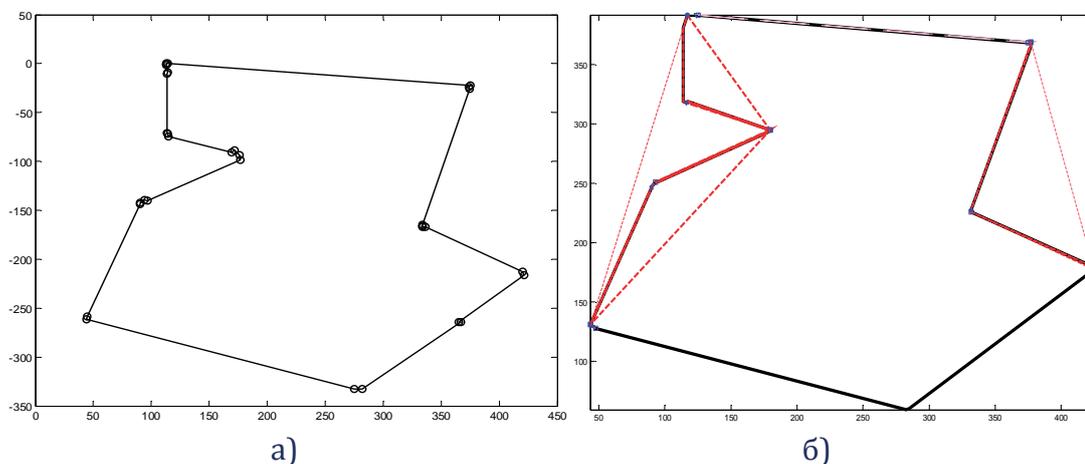
где  $S_3(*)$  — логическая функция,  $\wedge, \vee$  — операторы дизъюнкции и конъюнкции.



**Рис. 27.** Многоугольник  $A_1, A_2, \dots, A_9$  (а), его зашумленное изображение (б), результат выделения контура (в).

Символы операций дизъюнкции и конъюнкции чередуются при переходе слева направо через каждую скобку. Исходный многоугольник дополняется до выпуклого

многоугольника необходимым количеством отрезков. Рассмотрим пример автоматического построения уравнения чертежа зашумленного изображения (см. рис. 27б). В качестве аддитивного шумового воздействия выбран гауссовский случайный процесс (амплитуда шума в 1.5 раза превышает амплитуду полезного сигнала). Результат выделения контура изображен на рис. 27в. Сформированный комплексный контурный сигнал фильтруется и минимизируется (см. рис. 28а) и составляется логическая формула. Вспомогательные области обозначены на рис. 28б.



**Рис. 28.** Минимизированный контур (опорные точки отмечены кружком) (а), вспомогательные области (б).

## Список научных публикации по теме диссертации

### I. Статьи в научных журналах

#### I.1. Статьи в журналах из перечня ВАК РФ

1. Чуриков Д.В. Атомарные функции и комбинированный алгоритм фильтрации изображений в условиях помехи высокой интенсивности // Радиотехника. 2004. № 9. С.69-71.
2. Степанов С.Е., Чуриков Д.В. Дифференцирование дискретных сигналов на основе оптимизированного алгоритма вейвлет-преобразований // Электромагнитные волны и электронные системы. 2004. Т. 9. № 8. С. 50-54.
3. Кравченко В.Ф., Федоров И.Б., Чуриков Д.В. Функции В.Л. Рвачёва и атомарные функции в задачах описания сложных контурных объектов и цифровой обработке изображений // Электромагнитные волны и электронные системы. 2005. Т.10. №7. С.70-80.
4. Кравченко В.Ф., Пустовойт В.И., Чуриков Д.В. Цифровая обработка нелинейных сигналов на основе преобразований Кравченко-Котельникова-Вигнера // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 8. С. 67-71.
5. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Аналитические вейвлеты Кравченко-Котельникова и Кравченко-Левитана в цифровой обработке сверхширокополосных сигналов // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 8. С. 3-33.
6. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В., Юрин А.В. Аналитическое описание локусов сложной формы R-операциями и атомарными функциями. Цифровая обработка сигналов и изображений // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. №3. С. 6-37.
7. Чуриков Д.В. Сегментация и фильтрация радиолокационных изображений на основе нечетких отношений и атомарных функций // Нелинейный мир. №5. 2007. С. 265-266.
8. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Атомарные функции  $h_a(x)$  и новые ортогональные вейвлеты на их основе // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 6. С. 67-88.
9. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Цифровая обработка и спектральное оценивание сверхширокополосных сигналов атомарными функциями и вейвлетами // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 8. С. 39-46.
10. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Новые алгоритмы пространственно-временной цифровой обработки сигналов в антенных системах // Антенны. 2008. Вып. 4 (131). С.47-54.
11. Чуриков Д.В. Новые конструкции спектральных функций Кравченко-Чебышева-Лежандра // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. Т. 14. № 4. С. 36-44.

12. Кравченко В.Ф., Кравченко О.В., Сафин А.Р., Чуриков Д.В. Новый класс вероятностных весовых функций в цифровой обработке сигналов и изображений // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. Т.14. №9. С. 31-44.
13. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Синтез двумерных цифровых фильтров с нестандартной геометрией опорной области // Успехи современной радиоэлектроники. 2009. №5. С. 3-12.
14. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Конструкции ортогональных вейвлетов на основе атомарных функций  $h_a(x)$  // Нелинейный мир. №3. 2009. С. 172-174.
15. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Семейство атомарных функций и вейвлетов в корреляционной обработке радиолокационных сигналов // Успехи современной радиоэлектроники. 2009. №9. С. 7-17.
16. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Анализ временных рядов комплексными WA-системами функций Кравченко // Электромагнитные волны и электронные системы. 2010. Т. 15. № 7. С. 3-17.
17. Кравченко В.Ф., Пустовойт В.И., Чуриков Д.В. Применение комплексных WA-систем функций Кравченко к обработке временных рядов // ДАН РАН. 2011. Т. 436. № 5. С. 615-622.
18. Кравченко В.Ф., Пустовойт В.И., Чуриков Д.В. Аналитические двумерные WA-системы функций Кравченко-Рвачева и их физические свойства // ДАН РАН. 2011, Т. 439. № 3. С. 336-341.
19. Кравченко В.Ф., Пустовойт В.И., Чуриков Д.В. Атомарные функции и непараметрические оценки плотности вероятности // ДАН РАН. 2011, Т. 440. № 2. С. 182-186.
20. Кравченко В.Ф., Пустовойт В.И., Чуриков Д.В. Применение семейства атомарных функций к задачам непараметрической оценки плотности вероятности // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т. 16. № 8. С. 44-52.
21. Кравченко В.Ф., Пустовойт В.И., Чуриков Д.В. Аналитические двумерные WA-системы функций Кравченко-Рвачева в задачах цифровой обработки сигналов и изображений. Обзор // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т. 16. № 9. С. 7-32.
22. Кравченко В.Ф., Кравченко О.В., Пустовойт В.И., Чуриков Д.В. Атомарные функции и WA-системы функций в современных проблемах радиофизики и техники. Обзор // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т. 16. № 10. С. 38-53.
23. Кравченко В.Ф., Кравченко О.В., Пустовойт В.И., Чуриков Д.В. Атомарные функции в современных проблемах радиофизики. Обзор // Физические основы приборостроения. 2011. Т.1.№1. С. 3-48.
24. Чуриков Д.В. Комплексные WA-системы функций Кравченко в обработке временных рядов // Нелинейный мир. 2011. Т.9. №1. С.31-32.
25. Чуриков Д.В. Атомарная функция  $h_a(x)$  в задаче непараметрической оценки функции плотности вероятности // Нелинейный мир. 2012. №2. Т. 10. С. 108-109.
26. Кравченко В.Ф., Пустовойт В.И., Чуриков Д.В. Цифровая обработка сигналов на основе обобщенных теорем отсчетов Кравченко-Котельникова-Левитана // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. № 9. С. 1039-1048.
27. Кравченко В.Ф., Пустовойт В.И., Чуриков Д.В. WA-системы функций Кравченко-Рвачева и их модификации в анализе сверхширокополосных сигналов // ДАН РАН. 2013. Т. 449. №5. С. 530-534.
28. Чуриков Д.В. Интегральные непараметрические оценки плотности вероятности на основе атомарных функций // Нелинейный мир. 2013. Т. 11. № 2. С. 128-131.
29. Кравченко В.Ф., Пустовойт В.И., Чуриков Д.В. Новый класс весовых и WA-систем функций Кравченко-Кайзера // ДАН РАН. 2014. Т. 456. № 3. С. 295-298.
30. Кравченко В. Ф., Кравченко О. В., Пустовойт В. И., Чуриков Д. В. Применение семейств атомарных, WA-систем и R-функций в современных проблемах радиофизики. Часть I // Радиотехника и электроника, 2014. Т. 59. № 10. С. 949-978.
31. Данилычев М.В., Кравченко В.Ф., Кутуза Б.Г., Чуриков Д.В. Спутниковые СВЧ радиометрические комплексы дистанционного зондирования Земли. Современное состояние и тенденции развития // Физические основы приборостроения. 2014. Т. 3. № 1 (10). С. 3-25
32. Кравченко В.Ф., Кравченко О.В., Луценко В.И., Луценко И.В., Чуриков Д.В. Восстановление информационных параметров природных сред с использованием атомарных и WA-систем функций. Обзор. Часть I. Применение теории полумарковских полей и финитных функций для описания нестационарных процессов // Физические основы приборостроения. 2014. Т. 3. № 2 (11). С. 3-17.
33. Кравченко В. Ф., Кравченко О. В., Пустовойт В. И., Чуриков Д. В., Юрин А.В. Применение семейств атомарных, WA-систем и R-функций в современных проблемах радиофизики. Часть II // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60. № 2. С. 109-148.
34. Кравченко В.Ф., Кравченко О.В., Коновалов Я.Ю., Пустовойт В.И., Чуриков Д.В. Применение семейств атомарных, WA-систем и R-функций в современных проблемах радиофизики. Часть III // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60. № 7. С. 663-694.
35. Кравченко В. Ф., Кравченко О. В., Пустовойт В. И., Чуриков Д. В., Юрин А.В. Применение семейств атомарных, WA-систем и R-функций в современных проблемах радиофизики. Часть IV // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60. № 11. С. 1113-1152.
36. Кравченко В. Ф., Кравченко О. В., Чуриков Д. В., Атомарные функции в задачах фильтрации и цифровой обработки сигналов // Физические основы приборостроения. 2015. Т. 4. № 2 (15). С. 5-53.

## ***I.II. Статьи в иностранных журналах, включенных в международные системы цитирования Web of Science и Scopus***

37. Kravchenko V.F., Churikov D.V. A New Class of Orthogonal Kravchenko WA-system functions  $\{\overline{h_a(t)}\}$  // Telecommunications and Radio Engineering. Vol. 68. No. 8. P. 649-666. 2009.
38. Kravchenko V.F., Churikov D.V., and Yurin A.V. Analytical Description of Complex Shape Locus with the Help of R-Operations and Atomic Functions. The Digital Signal and Image Processing // Telecommunications and Radio Engineering. 2011. Vol. 70. No. 4. P. 283 – 323.
39. Kravchenko V.F., Churikov D.V. Analytical Kravchenko-Kotelnikov and Kravchenko-Levitan Wavelets in the Digital UWB Signal Processing // Telecommunications and Radio Engineering. 2011. Vol. 70. No. 9. P. 759-786.

## ***I.III. Статьи в иностранных журналах, не включенных в международные системы цитирования***

40. Kravchenko V. F., Churikov D. V. Kravchenko Atomic Transforms in Digital Signal Processing // Journal of Measurement Science and Instrumentation. 2012. Vol.3. No.3. P. 228-234.
41. Kravchenko V. F., Churikov D. V. New WA-System of Kravchenko Functions in Digital Signal Processing // Journal of Measurement Science and Instrumentation. 2012. Vol.3. No.4. P. 345-351.
42. Kravchenko V. F., and Churikov D. V. Kravchenko probability weight functions in problems of radar signals correlation processing // Journal of Measurement Science and Instrumentation. 2013. Vol.4. No.3. P. 231-237.

## **II. Материалы в трудах научных конференции**

### ***II.I. Публикации в трудах международных конференций***

43. Чуриков Д.В. Применение R-функций в задаче анализа и распознавания изображений // Нижний Новгород: IV Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов», 3-9 октября. 2005. С. 104-105.
44. Чуриков Д.В., Кравченко О.В. Цифровая обработка картографической информации R-функциями, атомарными функциями и вейвлетами // Труды Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Москва. 2006. С. 440-442.
45. Кравченко В.Ф., Пустовойт В.И., Чуриков Д.В. Преобразования Кравченко-Котельникова-Вигнера в цифровой обработке нелинейных сигналов // Труды 5-й Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». Самара. 2006. С. 50-55.
46. Churikov D.V. Construction of 2D Filters for Digital Signal and Image Processing on Basis of the Kravchenko Weight Functions and R-operations in Millimeter Range //VI International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, MSMW'07 Symposium Proceedings. Vol. 2.Kharkov, June 25-30. 2007. P.935-937.
47. Чуриков Д.В. Цифровая обработка сигналов и изображений R-функциями и атомарными функциями // Труды Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение, Москва. 2007. С. 329-331.
48. Гуляев Ю.В., Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Новый класс вейвлет-модулированных окон Кравченко-Котельникова и Кравченко-Левитана в цифровой обработке сверхширокополосных сигналов // Труды 2-й Международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации». Суздаль. 2007.
49. Кравченко В.Ф., Пустовойт В.И., Чуриков Д.В. Цифровая обработка нелинейных сигналов на основе преобразования Кравченко-Котельникова-Вигнера // Труды 2-й Международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации». Суздаль. 2007.
50. Churikov D.V. Construction 2D Filters for Digital Signal and Image Processing on Basis of the Kravchenko Weight Functions and R-Operations in Millimeter Range // Proceedings of 2007 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, Session H: R-functions, Atomic Functions, Wavelets, Fractals (3 p.)
51. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Синтез функции неопределенности радиолокационных сигналов на основе семейства атомарных функций // Труды Международной конференции «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. 2007. Москва.
52. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Спектральный анализ и синтез радиолокационных сигналов на основе преобразований Кравченко-Котельникова-Вигнера и Кравченко-Левитана-Вигнера // Труды Международной конференции «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Москва. 2007.
53. Кравченко В.Ф., Пустовойт В.И., Чуриков Д.В. Преобразования Кравченко-Котельникова-Вигнера в цифровой обработке нелинейных сигналов // Труды Международной конференции «Физика волновых процессов и радиотехнические системы». 2007. Т. 10. №3. С. 50-55.
54. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Построение новых вейвлетов Кравченко на основе атомарной функции  $h_a(t)$  // Труды 10-й международной конференции и выставки Цифровая обработка сигналов и её применение, Москва. 2008. С.153-156.

55. Kravchenko V.F., Churikov D.V. A new Class of Orthogonal Kravchenko Wavelets // Proceedings of International Conference RVK08 and MMWP08, Växjö, Sweden, June 9-13. 2008. P.39-43.
56. Kravchenko V.F., Churikov D.V. Kravchenko-Kotelnikov-Wigner Distributions in Radio Physical Applications. Proc. Int. conference "DAYS on DIFFRACTION", St.Petersburg, Russia, June 3-6. 2008. P. 87-88.
57. Kravchenko V.F., Churikov D.V. Spectral Estimation and Digital UWB Signal Processing by Atomic Functions and Wavelets // The Fourth International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 15-19 September. 2008, Sevastopol, Ukraine. 2008.
58. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Синтез двумерных весовых функций (окон) на основе атомарных и R-функций в радиолокации // Труды Международной конференции «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН. Москва. 2008.
59. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Теория R-функций в пространственно-временной обработке сигналов и изображений // Украинский математический конгресс. Львов. 2009. (<http://www.imath.kiev.ua/~congress2009/>)
60. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Атомарные и R- функции в синтезе двумерных цифровых КИХ фильтров со сложной частотной избирательностью // Труды 11-й международной конференции и выставки Цифровая обработка сигналов и её применение, Москва. 25-27 марта 2009. 2009. С. 141-144.
61. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Обобщенная теорема Кравченко-Котельникова в задачах корреляционной обработки информации // Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2009. 27 июня – 1 июля, Таганрог-Дивноморское, Из-во ТТИ ЮФУ. 2009. С. 431-433.
62. Kravchenko V.F., Churikov D.V. The Theory of Spectral Estimation of Signals and Generalized Kravchenko-Kotel'nikov-Levitan Theorems. Proc. Progress in Electromagnetics Research Symposium, August 18-21. 2009, Moscow, RUSSIA, The Electromagnetics Academy. 2009. P. 241-244.
63. Churikov D. V. Application of the Theory of R-functions to the Analysis and Synthesis of Multidimensional Signals. Proc. Progress in Electromagnetics Research Symposium, August 18-21. 2009, Moscow, RUSSIA, The Electromagnetics Academy. 2009. P. 245-248.
64. Churikov D.V. Construction of New Kravchenko-Kotel'nikov-Chebyshev-Legendre Spectral Kernels and Their Application in Digital Multidimensional Signals Processing // Proc. Progress in Electromagnetics Research Symposium, August 18-21. 2009, Moscow, RUSSIA, The Electromagnetics Academy. 2009. P. 251-254.
65. Кравченко В.Ф., Кравченко О.В., Сафин А.Р., Чуриков Д.В. Применение новых вероятностных весовых функций в цифровой обработке сигналов // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С.Попова. Серия: Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации. Выпуск III. 3 Международная конференция, 22-24 сентября 2009. Суздаль, Россия. С. 9-17.
66. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Спектральная оценка двумерных сигналов на основе ядер обобщенного ряда Кравченко-Котельникова. Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. Серия: Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации. Выпуск III. 3 Международная конференция, 22-24 сентября 2009. Суздаль, Россия. С. 214-216.
67. Кравченко В.Ф., Чуриков Д. В. Новые методы корреляционной обработки радиолокационных сигналов семейством атомарных функций. Пленарный доклад. Труды 3 международной конференции «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, 26 - 30 октября 2009. Т. 1, Москва. С. 3-16. (в электронном: с. 974-989)
68. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Цифровая обработка широкополосных сигналов атомарными функциями в антенной технике // Труды 3 международной конференции «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, 26 - 30 октября 2009. Т. 2, Москва. С. 198-201. (в электронном: с. 916-921)
69. Kravchenko V., Meana H.P., Ponomarev V., Churikov D. Spectral Estimation of Digital Signals by the Orthogonal Kravchenko Wavelets  $\{\widehat{h}_a(t)\}$  // Progress in Pattern Recognition, Image Analysis, Computer Vision, and Applications. Edited by Eduardo Bayro-Corrochano, Jan-Olof Eklundh. Proc. of 14<sup>th</sup> Iberoamerican Conference on Pattern Recognition, CIARP2009, Guadalajara, Jalisco, Mexico, November 15-18. Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 2009. P. 989-996.
70. Kravchenko V.F., Churikov D.V. New constructions of Kravchenko-Kotel'nikov-Chebyshev-Legendre spectral kernels in time-and-frequency distributions // Prog. Int. conference "DAYS on DIFFRACTION", St. Petersburg, Russia. 2009.
71. Kravchenko V.F., Churikov D.V. Digital Signal and Image Processing on Basis of Orthogonal Kravchenko Wavelets  $\{\widehat{h}_a(t)\}$  // Prog. Int. Conference "DAYS on DIFFRACTION", St. Petersburg, Russia. 2009.
72. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Модифицированные спектральные ядра Наги в цифровой обработке сигналов // Труды 12-й Международной конференции и выставки Цифровая обработка сигналов и её применение, Москва. 2010. Т. 1. С. 145-148.
73. Kravchenko V.F., Churikov D.V. Radial Atomic Functions in Digital Signal Processing // Proc. Int. Conference "DAYS on DIFFRACTION", St. Petersburg, Russia, June 8-11. 2010. P. 99-101.

74. Kravchenko V.F., Churikov D.V. New Analytical WA-Systems of Kravchenko Functions // Proc. Int. Conference "DAYS on DIFFRACTION", St. Petersburg, Russia, June 8-11. 2010. P. 93-98.
75. Churikov D.V. Analytical Kravchenko Wavelets in the Digital UWB Signal Processing // Proceedings of 2010 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, Session H: R-functions, Atomic Functions, Wavelets, Fractals, H-8.
76. Churikov D.V. Atomic Functions in Problems of Interference UWB Signal Receiving // Proceedings of 2010 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, Session H: R-functions, Atomic Functions, Wavelets, Fractals, H-9.
77. Kravchenko V. F., Churikov D. V. Modified Nagy Kernels in Digital UWB Signal Processing // Proc. of 2010 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, Session H: R-functions, Atomic Functions, Wavelets, Fractals, H-10. (3 p.)
78. Kravchenko V.F., Churikov D.V. New Kravchenko Transforms and Digital UWB Signal Processing // Proc. Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 6-10 September. 2010, Sevastopol, Ukraine. 2010. P. 54-58.
79. Kravchenko V.F., Churikov D.V. Atomic Distributions in SAR Problems // Proc. Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 6-10 September. 2010, Sevastopol, Ukraine. 2010. P. 59-61.
80. Churikov D.V. New Analytical Kravchenko wavelets in Spectral Estimation of UWB Signals // Proc. Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 6-10 September. 2010, Sevastopol, Ukraine. 2010. P. 59-61.
81. Kravchenko V.F., Churikov D.V. Correlation Radar Signal Processing on Basis of Probability Kravchenko Weight Functions, Proceedings of IEEE 10th International Conference on Signal Processing Proceedings (ICSP'10), October 24 – 28. 2010, Taiyangdao, Hotel Beijing, China. P. 1906-1909.
82. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Непараметрические оценки плотности вероятности и её производных на основе семейства атомарных функций // Труды 13-й международной конференции Цифровая обработка сигналов и её применение, Москва. 2011. Т. 1. С.163-165.
83. Kravchenko V.F., Churikov D.V. Atomic functions in nonparametric estimations of probability density functions and their derivatives // Proc. Int. conference "DAYS on DIFFRACTION", St.Petersburg, Russia, 30 May – 3 June. 2011. P. 75-77.
84. Kravchenko V.F., Churikov D.V. Two-dimensional analytical Kravchenko-Rvachev wavelets in digital signal and image processing // Proc. Int. conference "DAYS on DIFFRACTION", St.Petersburg, Russia, 30 May – 3 June. 2011. P. 78-82.
85. Kravchenko V.F., Churikov D.V. New constructions of complex orthogonal Kravchenko wavelets // Prog. of Int. Conference "DAYS on DIFFRACTION", St.Petersburg, Russia, 30 May – 3 June. 2011. P. 65-66.
86. Кравченко В.Ф., Пустовойт В.И., Чуриков Д.В. Атомарные функции и вейвлеты в современных проблемах радиопроизводства. Пленарный доклад // Труды 4-ой Международная конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации». 20 – 22 сентября 2011. Суздаль, Россия. 2011. С. 6-12. (ISBN 978-5-905278-04-4)
87. Волосяк В.К., Кравченко В.Ф., Кравченко О.В., Павликов В.В., Чуриков Д.В. Атомарные функции и методы спектральной теории сигналов в современных проблемах радиопроизводства // Труды 4-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ–2011. 18-21 октября, Харьков, Украина. С.61-66.
88. Kravchenko V. F., Churikov D. V., Ponomaryov V. I., and Perez-Meana H. M. Digital 2D and 3D Images Processing by Means of Atomic and WA-Systems of Function Families. Пленарный доклад // Труды 5-ой Международная конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации». 18 – 19 сентября 2011 г., Суздаль, Россия. 2012. С. 3-8.
89. Kravchenko V.F., Churikov D.V. The Generalized Kravchenko-Kotelnikov Sampling Theorem in problems of digital filters synthesis // Proc. Int. conference "DAYS on DIFFRACTION", St.Petersburg, Russia, May 28 – June 1, 2012.
90. Kravchenko V.F., Churikov D.V. Integrated nonparametric estimations of probability density of stochastic processes by atomic functions // Proc. Int. conference "DAYS on DIFFRACTION", St.Petersburg, Russia, May 28 – June 1, 2012. P. 152-157.
91. Kravchenko V.F., Churikov D.V. New constructions of digital filters synthesis on base of generalized Kravchenko-Kotelnikov sampling theorem // Proc. Int. conference "DAYS on DIFFRACTION", St.Petersburg, Russia, May 28 – June 1, 2012. P. 158-163.
92. Kravchenko V.F., Churikov D.V., Ponomaryov V.I., and Perez-Meana H.M. Wa-Systems of Functions in Reconstruction and Visualization of 2D and 3D Images // Proc. Progress in Electromagnetics Research Symposium, August 19-23, 2012, Moscow, Russia, The Electromagnetics Academy, 2012. P. 40-44.
93. Kravchenko V. F., Kononov Ya. Yu., and Churikov D. V. Nonparametric Estimations of Probability Density Functions Based on The Family of Atomic Functions  $ch_{a,n}(x)$  in Problems of Digital Signal Processing // Proc. Progress in Electromagnetics Research Symposium, August 19-23, 2012, Moscow, Russia, The Electromagnetics Academy, 2012. P. 45-49.
94. Kravchenko O.V., Churikov D. V. Wavelet Approximation of Discontinuous Solutions in EHD Model of Charged Jet Flow // Proc. Progress in Electromagnetics Research Symposium, August 19-23, 2012, Moscow, RUSSIA. The Electromagnetics Academy. 2012. P. 1236.

95. Kravchenko V.F., Pustovoi V.I., and Churikov D.V. Application of Generalized Kravchenko-Kotelnikov-Levitan Sampling Theorems for Signal Filtration // Proc. Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 17-21 September, 2012, Sevastopol, Ukraine, 2012. P. 220-222. (<http://uwbusis.org.ua/>)
96. Kravchenko V.F., Churikov D.V. The New Modified Kernels and Weight Functions in the Generalized Kravchenko-Kotelnikov Sampling Theorem // Proc. Int. conference "DAYS on DIFFRACTION", St.Petersburg, Russia, May 27 – 31, 2013.
97. Кравченко В.Ф., Кравченко О.В., Пустовойт В.И., Чуриков Д.В. Обобщенные теоремы отсчетов Кравченко-Котельникова-Стренга-Фикса в физических приложениях. Обзор. Пленарный доклад // 6-я Международная конференция "Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации". 2013. С. 16-23.
98. Данилычев М.В., Кравченко В.Ф., Кутуза Б.Г., Чуриков Д.В. Современное состояние и тенденции развития в спутниковой СВЧ радиометрии. Пленарный доклад // Труды 7-й Международной конференции "Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации". М.: Изд-во НТЦ УП РАН, 2014. С. 21-28.
99. Kravchenko, V.F., Kravchenko, O.V., Churikov, D.V. Analytic Kravchenko-Kaiser Wavelets and their Physical Properties // Proc. Int. conference "DAYS on DIFFRACTION", St. Petersburg, Russia, June 3-6, 2014. P. 168.
100. Коновалов Я.Ю., Кравченко В.Ф., Кравченко О.В., Чуриков Д.В. Новое семейство ортогональных вейвлетов на основе атомарных функций  $ch_{a,n}$ . Пленарный доклад // Труды 8-й Международной конференции "Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации". М.: Изд-во НТЦ УП РАН, 2015. С. 8-12.
101. Churikov D.V., Konovalov Ya.Yu., Kravchenko O.V., Kravchenko V.F. Implementation of modified Sinc-collocation method to linear two-point boundary value Problem // Proc. Int. conference "DAYS on DIFFRACTION", St. Petersburg, Russia, 25-29 May, 2015. P. 37-38.
102. Kravchenko V.F., Kravchenko O.V., Churikov D.V. Construction of filter systems with reference areas of complex geometry in the frequency and time spaces on the basis of R-functions theory // Prog. Int. conference "DAYS on DIFFRACTION", St. Petersburg, Russia, 25-29 May, 2015. P. 70-71.
103. Kravchenko V.F., Kravchenko O.V., Churikov D.V. FIR-filters on basis of atomic functions in problems of boundary value problems of diffraction and signal processing // Prog. Int. conference "DAYS on DIFFRACTION", St.Petersburg, Russia, 25-29 May, 2015. P. 71-72.
104. Kravchenko V.F., Kravchenko O.V., Konovalov Y.Y., Churikov D.V. Generalization of Kravchenko wavelets based on the family of atomic functions  $ch_{a,n}$  // Proceedings of Int. conference "DAYS on DIFFRACTION 2015", St.Petersburg, Russia, 25-29 May, 2015. P. 180-184.
105. Churikov D.V., Volosyuk V.K., Kravchenko V.F., Kravchenko O. V., Pavlikov V.V., and Pustovoi V.I. Atomic Functions Theory: 45 Years Behind Dedicated to the Pioneer of Atomic Functions Theory V. L. Rvachev // Proc. Int. Conf. 9<sup>th</sup> International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves MSMW'2016. Inv-9.
106. Kravchenko O.V., Kravchenko V.F., Churikov D.V. Application of  $ch_{\{a,n\}}$  atomic basis to numerical simulation of wave propagation problem // Prog. Int. Conf. DAYS on DIFFRACTION 2016.

## **II. Публикации в трудах Всероссийских конференций**

107. Чуриков Д.В. Региональная научно-техническая конференция «Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении», Калуга. 2001. С. 43.
108. Чуриков Д.В. Региональная научно-техническая конференция «Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении», Калуга. 2002. С. 5.
109. Чуриков Д.В. Применение атомарных функций и R-функций к задаче выделения сложных контурных сигналов из зашумленных изображений // Труды 60-й научной сессии, посвященной Дню радио. 2005. С.236-238.
110. Чуриков Д.В. Алгоритм описания объектов сложной формы в геоинформационных системах на основе теории R-функций // Труды 61-й научной сессии, посвященной Дню радио. 2006. С.46-48.
111. Чуриков Д.В. Контурный анализ изображений на основе семейства вейвлетов Кравченко-Рвачева // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2006. Самара. С. 35.
112. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Преобразование Кравченко-Вигнера и обобщенные ряды Котельникова на основе атомарных функций в нелинейной цифровой обработке сигналов // XI Всероссийский школа-семинар «Физика и применение микроволн». Звенигород. Московская область, 21-26 мая 2007. Часть 6. С. 48-51.
113. Чуриков Д.В. Построение двумерных фильтров на основе весовых функций Кравченко и R-операций // Труды 62-й Научной сессии, посвященной Дню Радио, Москва. 2007. С. 293-295.
114. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Пространственно-временное преобразование радиолокационных сигналов на основе ортогональных вейвлетов Кравченко // Труды 63-й Научной сессии, посвященной Дню Радио, Москва. 2008. С. 58-60.
115. Чуриков Д.В. Цифровая обработка сигналов при передаче информации спектральными ядрами Наги // Труды 65-й Научной сессии, посвященной Дню радио, Москва. 2010. С. 145-148.

116. Кравченко В.Ф., Кравченко О.В., Пустовойт В.И., Чуриков Д.В. Атомарные функции и спектральная теория сигналов в современных проблемах физики и техники. Пленарный доклад // Труды Всероссийская радиоастрономическая конференция «Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии», ВРК-2011. 17-21 октября 2011. Санкт Петербург. 2011.
117. Кравченко В.Ф., Кравченко О.В., Пустовойт В.И., Чуриков Д.В. Применение теории R-функций, атомарных и WA-систем функций в информационных технологиях. Обзор. Пленарный доклад // Труды 67-й Научной сессии, посвященной Дню Радио 16-17 мая 2012, Москва, 2012. С. III-VIII.
118. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Атомарных функции и интегральные непараметрические оценки плотности вероятности случайных процессов // Труды 67-й Научной сессии, посвященной Дню Радио 16-17 мая 2012, Москва, 2012. С. 83-86.
119. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Обобщенная теорема отсчетов Кравченко-Котельникова в задачах синтеза цифровых фильтров // Труды 67-й Научной сессии, посвященной Дню Радио 16-17 мая 2012, Москва, 2012. С. 86-90.
120. Кравченко В.Ф., Кравченко О.В., Пустовойт В.И., Чуриков Д.В. Новые методы цифровой обработки сигналов семейством атомарных функций. Пленарный доклад // 9-я Всероссийская конференция с иностранным участием «Радиолокация и радиосвязь». 23-25 ноября 2015.