

На правах рукописи



Витязев Сергей Владимирович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ УЗКОПОЛОСНОЙ АДАПТИВНОЙ
ФИЛЬТРАЦИИ В РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Специальность: 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель: **Кошелев Виталий Иванович**,
доктор технических наук, профессор,
Рязанский государственный радиотехнический университет, заведующий кафедрой радиотехнических систем

Официальные оппоненты: **Брюханов Юрий Александрович**,
доктор технических наук, профессор,
Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, заведующий кафедрой динамики электронных систем

Джиган Виктор Иванович,
доктор технических наук,
ООО «Техкомпания Хуавэй», г. Москва,
главный научный сотрудник

Ведущая организация: **ОАО «Концерн «Автоматика»**, г. Москва

Защита состоится «15» ноября 2013 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д212.211.04 в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: **390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.**

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

Автореферат разослан «07» 10 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Овечкин Г.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Методы и алгоритмы цифровой адаптивной фильтрации являются эффективным инструментом решения многих проблем в области современных радиотехнических и телекоммуникационных систем, в значительной степени ориентированных на цифровые технологии обработки сигналов, передачи, кодирования и восстановления информации. Сюда можно отнести такие задачи, как борьба с замираниями и межсимвольной интерференцией, эхо-компенсация и шумоподавление, сжатие и закрытие речи, адаптивное формирование диаграммы направленности антенны. Теория цифровой адаптивной фильтрации начала активно развиваться начиная с 80-х годов прошлого столетия и связывается с фундаментальными работами Б. Уидроу, С. Стирнза, К.Ф.Н. Коуэна, П.М. Гранта, С. Хайкина, С. Александера. Практическое применение методов цифровой адаптивной фильтрации стало распространяться начиная с 90-х годов с появлением элементной вычислительной базы с достаточной производительностью. На сегодняшний день теория цифровой адаптивной фильтрации достаточно хорошо изучена и изложена в трудах зарубежных ученых М. Белланже, Б. Фаранга-Боружени, А. Саида, А. Пуларикиса, З. Рамандана, а также отечественных – Е.П. Чуракова, В.И. Джигана и других.

Синтез адаптивного фильтра, как правило, ведется в классе цепей с конечной импульсной характеристикой (КИХ-цепей). Такие цепи не имеют обратных связей (в рабочем режиме, по окончании обучения), а следовательно, отличаются абсолютной устойчивостью и стабильностью характеристик. Однако КИХ-фильтры имеют существенный недостаток, связанный с большими вычислительными затратами. С увеличением порядка КИХ-фильтра, который может достигать сотен и тысяч единиц, вычислительные затраты, память фильтра, требуемая разрядность представления данных значительно возрастают. Кроме того, затягивается процесс обучения, и ухудшаются качественные показатели работы адаптивного фильтра.

Необходимость значительного повышения порядка адаптивного КИХ-фильтра является следствием того, что моделируемая в процессе обучения динамическая система (например, канал радиосвязи) может иметь ярко выраженные перепады функции передачи в частотной области, которые принимают форму глубоких «замираний» или «резонансов» на определенных участках частот. Чтобы максимально близко подстроиться к таким частотным перепадам, требуется соответствующее разрешение по частоте, а это достигается только одним способом – адекватным увеличением длины импульсной характеристики адаптивного фильтра, моделирующего заданную динамическую систему. В этом случае динамическая система становится узкополосной, и возникает задача узкополосной адаптивной фильтрации, отличающаяся рядом особенностей, одной из которых являются крайне высокие вычислительные затраты на реализацию адаптивного фильтра.

Известно, что в основе современных методов построения систем цифровой частотной селекции сигналов и, в частности, узкополосных КИХ-фильтров лежит фундаментальная идея использования вторичной дискретизации (децима-

ции) и интерполяции обрабатываемого сигнала с целью многократного уменьшения вычислительных затрат и памяти данных. Многоскоростная обработка сигналов (МОС) не только получила широкое применение для обычной частотной селекции и построения банков фильтров, но и эффективно используется во всех практических приложениях, там, где возможны «принудительные» понижение и повышение частоты дискретизации. Вопросам применения МОС в телекоммуникационных и радиотехнических системах посвящено большое число работ, включая работы Р. Крошье, Л.Р. Рабинера, М. Белланже, В.В. Витязева, П.П. Вайдьянатхана, М. Веттерли, З. Светковича, Р.В. Стюарта, М. Хартенка, К. Энемана, М. Мунена, Д. Марелли, М. Фу, М.К. Чобану и др. Сочетание адаптивной и многоскоростной обработки сигналов дало новое решение традиционных проблем и стимулировало дальнейшие исследования в этой области. Большое число работ, публикуемых на сегодняшний день по данной тематике, говорит о продолжении развития теории цифровой адаптивной фильтрации и цифровой многоскоростной обработки. Особый научный интерес представляет совмещение операций многоскоростной и адаптивной обработки сигналов.

Таким образом, тема диссертационной работы, направленная на исследование и разработку эффективных методов и алгоритмов цифровой узкополосной адаптивной фильтрации на основе многоскоростной обработки, является в настоящее время актуальной в рамках обозначенной проблематики и требует дальнейшей детальной проработки.

Цель и задачи работы. Целью исследований, проводимых в рамках данной работы, является разработка методов и алгоритмов цифровой адаптивной фильтрации узкополосных процессов на основе многоскоростной обработки сигналов, направленных на уменьшение вычислительных затрат и эффективную реализацию в реальном времени.

Достижение поставленной цели включает в себя решение следующих задач:

- анализ проблемы узкополосной адаптивной фильтрации с выделением ряда наиболее характерных особенностей реализации алгоритмов;
- анализ методов построения систем фильтрации на основе многоскоростной обработки сигналов;
- разработка методов построения и алгоритмов реализации адаптивных фильтров на основе многоскоростной обработки;
- разработка методов и алгоритмов обработки сигналов в выделенном классе задач узкополосной адаптивной фильтрации с применением многоскоростной обработки;
- моделирование и исследование эффективности разработанных методов и алгоритмов узкополосной адаптивной фильтрации, их сравнительный анализ;
- исследование эффективности разработанных методов и алгоритмов узкополосной адаптивной фильтрации при их программно-аппаратной реализации на современных процессорных платформах.

Методы исследований. В ходе исследований использовались методы компьютерного моделирования, математического анализа и статистики, матричного исчисления, цифровой и адаптивной обработки сигналов, а также другие методы, которые в совокупности с проведенными экспериментами позволили получить общую картину оценки эффективности предложенных алгоритмов узкополосной адаптивной фильтрации. Моделирование проводилось на основе компьютерных сред математического моделирования. Программно-аппаратная процессорная реализация выполнялась на основе ряда наборов разработчика и отладочных модулей ведущих производителей цифровых процессоров обработки сигналов, включая фирмы Texas Instruments Inc., Analog Devices Inc. (США) и ОАО НПЦ «ЭЛВИС» (Россия).

Научная новизна. Научная новизна диссертационной работы в целом заключается в разработке новых методов и алгоритмов адаптивной узкополосной фильтрации, отличающихся применением в процессе обучения многоскоростной обработки сигналов с децимацией и интерполяцией как самого преобразуемого сигнала, так и импульсной характеристики адаптивного фильтра.

Новые научные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, состоят в следующем.

1. Предложены методы и алгоритмы узкополосной адаптивной фильтрации с понижением и повышением частоты дискретизации сигналов в процессе обучения.

2. Предложены методы и алгоритмы узкополосной адаптивной фильтрации с децимацией и интерполяцией импульсной характеристики.

3. Исследована эффективность адаптивной узкополосной фильтрации на основе многоскоростной обработки сигналов в решении задач прямого и обратного моделирования.

4. Исследована эффективность адаптивной узкополосной фильтрации на основе децимации и интерполяции импульсной характеристики в решении задач прямого и обратного моделирования.

5. Исследована эффективность разработанных методов и алгоритмов адаптивной узкополосной фильтрации при их реализации на цифровых сигнальных процессорах ряда современных платформ.

Практическая значимость. Предложенные методы и алгоритмы адаптивной узкополосной фильтрации и исследование их эффективности позволяют:

1) многократно (в десятки и сотни раз) понизить вычислительные затраты на реализацию узкополосных адаптивных систем за счет прореживания выходного сигнала и сигнала ошибки;

2) понизить вычислительные затраты на реализацию узкополосных адаптивных систем в десятки раз за счет прореживания импульсной характеристики фильтра;

3) сформировать методику выбора способа построения узкополосного адаптивного фильтра, наиболее эффективного для конкретных условий применения.

Кроме того, разработанные программные коды функций узкополосной адаптивной фильтрации расширяют библиотеки оптимальных типовых функций ЦОС ряда современных цифровых сигнальных процессоров.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Метод построения и алгоритмы адаптации узкополосного фильтра-дециматора на основе полифазной и параллельной структур, отличающиеся совмещением операций адаптации и децимации и обеспечивающие сокращение вычислительных затрат пропорционально коэффициенту децимации (на порядок и более).

2. Метод и алгоритмы узкополосной адаптивной фильтрации на основе многоскоростной обработки сигналов, отличающиеся совмещением операций адаптации, многоступенчатой децимации и интерполяции, приводящие к сокращению вычислительных затрат пропорционально коэффициенту децимации при сохранении высокой скорости сходимости.

3. Метод и алгоритмы узкополосной фильтрации на основе адаптивного гребенчатого фильтра, отличающиеся совмещением операций адаптации и прореживания импульсной характеристики адаптивного фильтра, обеспечивающие сокращение вычислительных затрат на порядок и более.

4. Результаты исследований эффективности применения многоскоростной обработки и гребенчатой фильтрации в задачах узкополосной адаптивной фильтрации, отражающие достижимость высоких показателей по точности и скорости сходимости алгоритмов адаптации при существенном (на порядок и более) уменьшении вычислительных затрат.

Реализация и внедрение. Результаты научных исследований использовались в госбюджетных научно-исследовательских работах РГРТУ, проводившихся по заказам Министерства образования и науки РФ:

- НИР № 5-08Г «Методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов в радиотехнике и системах телекоммуникаций»;
- НИР № 12-09Г «Модели, методы и алгоритмы формирования, обработки и распознавания изображений для систем высокоточного сопровождения объектов»;
- НИР № 3-11Г «Методы и алгоритмы адаптивной цифровой фильтрации в информационно-телекоммуникационных системах»;
- НИР № 12-12Г «Методы и алгоритмы адаптивной многоскоростной обработки сигналов в радиотехнике и системах телекоммуникаций».

Полученные результаты диссертационной работы внедрены на предприятии ОАО «Государственный Рязанский приборный завод», в рамках выполнения ряда хоздоговорных НИОКР:

- НИР № 15-07 «Разработка программно-алгоритмического обеспечения цифровой обработки траекторного сигнала и формирования радиолокационного изображения на основе процессорного модуля ЗС001»;
- НИР № 39-11 «Разработка и моделирование алгоритмов автофокусировки радиоизображений, повышающих разрешающую способность по азимуту в условиях динамических траекторных нестабильностей»;

- СЧ ОКР № 15-10 «Разработка математических зависимостей и алгоритмов формирования и обработки траекторного сигнала, повышающих разрешающую способность изделия Н-025М»,

а также в учебном процессе на кафедре телекоммуникаций и основ радиотехники при чтении лекций и при проведении цикла лабораторных работ по дисциплине «Цифровая обработка сигналов и сигнальные процессоры в СПР» для студентов, обучающихся по специальности 201402_65 – «Средства связи с подвижными объектами», по дисциплине «Обработка сигналов на ЦСП» для студентов, обучающихся по специальности 210403_65 – «Защищенные системы связи» направления «Телекоммуникации», а также в цикле дисциплин, связанных с подготовкой магистров по направлениям: 210700 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 220400 – «Управление в технических системах».

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при проектировании инфокоммуникационных систем, включая системы проводной и беспроводной передачи данных, а также радиотехнических и радиолокационных систем, главной сферой применения адаптивной фильтрации в которых является решение задачи адаптивного формирования диаграммы направленности антенны.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- 11, 16 и 17-й Международных научно-технических конференциях «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций», Рязань, 2002, 2010 и 2012 гг.;
- 11-й и 15-й Международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 2005, 2009 гг.;
- 9, 10, 11, 12, 13 и 14-й Международных научно-технических конференциях «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Москва, 2007-2012 гг.;
- Международном симпозиуме Spectral Methods and Multirate Signal Processing, Москва, 2007 г.;
- Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2010», Севастополь, 2010 г.;
- 4-й и 5-й Европейских конференциях преподавателей и научных работников в области цифровой обработки сигналов, Франция, Ницца, 2010 г., и Нидерланды, Амстердам, 2012 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 26 работ. Из них 11 статей в ведущих рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ, 14 тезисов докладов на международных конференциях и одно учебное пособие.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 183 страницах, содержит 78 рисунков и 25 таблиц. Используются ссылки на 75 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение раскрывает вопросы актуальности выбранной темы и определяет цели и задачи предстоящих исследований. Рассматриваются вопросы научной новизны и практической значимости результатов, полученных в работе.

Первая глава посвящена краткому описанию и классификации задач адаптивной фильтрации с предварительным обучением. Проводится анализ известных работ, посвященных их решению с применением многоскоростной обработки сигналов. Иллюстрируется необходимость построения эффективных в вычислительном отношении систем адаптивной фильтрации узкополосных процессов. Рассматриваются известные методы построения систем на основе многоскоростной обработки сигналов, традиционно применяемые для повышения вычислительной эффективности. На основе этих методов определяются различные варианты построения узкополосных адаптивных фильтров. Предлагается ряд подходов к построению систем обработки сигнала на основе МОС в задачах прямого и обратного моделирования, а именно: прямое (рисунок 1) и обратное (рисунок 2) моделирование динамической системы с использованием адаптивного фильтра-дециматора; прямое (рисунок 3) и обратное моделирование динамической системы с использованием предварительной узкополосной фильтрации. Ставится задача исследования предложенных алгоритмов путем математического моделирования и практической реализации на процессорах обработки сигналов.

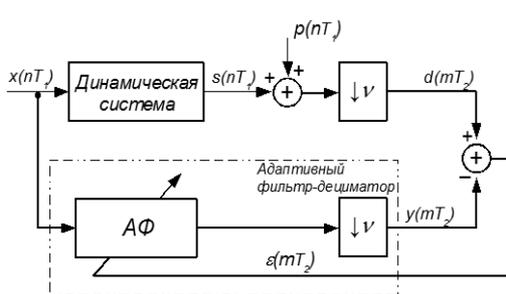


Рисунок 1 – Прямое моделирование динамической системы с использованием адаптивного фильтра-дециматора

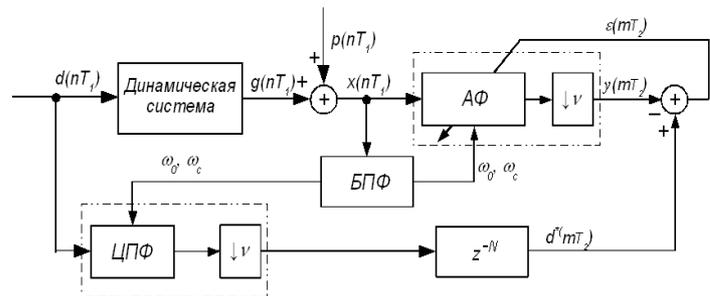


Рисунок 2 – Обратное моделирование динамической системы с использованием адаптивного фильтра-дециматора

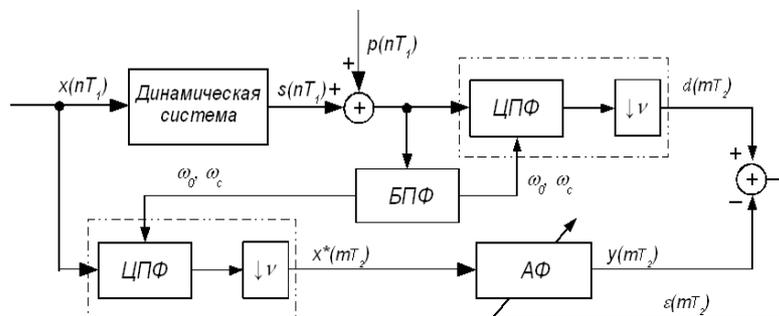


Рисунок 3 – Прямое моделирование динамической системы с использованием предварительной фильтрации-децимации

С целью поддержания высокой скорости сходимости алгоритмов адаптации и восстановления исходной высокой частоты дискретизации предлагается ряд

алгоритмов повышения частоты дискретизации с использованием фильтров-интерполяторов различной степени сложности реализации (рисунки 4 и 5).

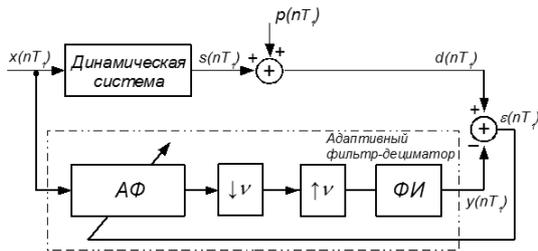


Рисунок 4 – Прямое моделирование динамической системы с использованием децимации и интерполяции сигнала на выходе адаптивного фильтра

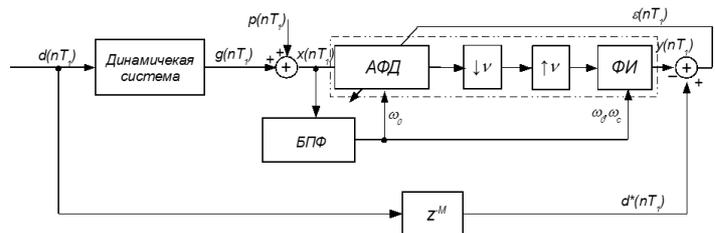


Рисунок 5 – Обратное моделирование динамической системы с использованием децимации и интерполяции сигнала на выходе адаптивного фильтра

Известно, что использование вторичной дискретизации (децимации) преобразуемого узкополосного сигнала позволяет уменьшить приведенные вычислительные затраты пропорционально коэффициенту децимации, но является источником специфического шума, связанного с неидеальностью частотных характеристик фильтра и наличием боковых лепестков в зоне его непрозрачности.

Предлагается альтернативный подход к построению адаптивных систем, в основе которого лежит идея децимации и интерполяции импульсной характеристики адаптивного узкополосного фильтра, что также потенциально позволяет уменьшить приведенные вычислительные затраты пропорционально показателю его узкополосности, но лишено всех проблем, связанных с преобразованием частоты дискретизации. При этом задача адаптации параметров всей системы сводится к обучению цифрового гребенчатого фильтра, отличающегося периодическим характером его частотной характеристики в диапазоне рабочих частот. Для селекции (подавления) боковых лепестков частотной характеристики гребенчатого фильтра в процессе его обучения дополнительно используется сглаживающий (маскирующий) фильтр (рисунки 6 и 7).

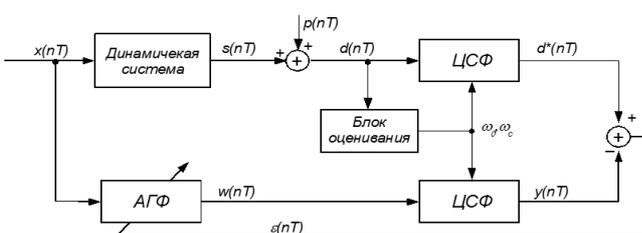


Рисунок 6 – Прямое моделирование динамической системы с использованием децимации и интерполяции импульсной характеристики адаптивного фильтра

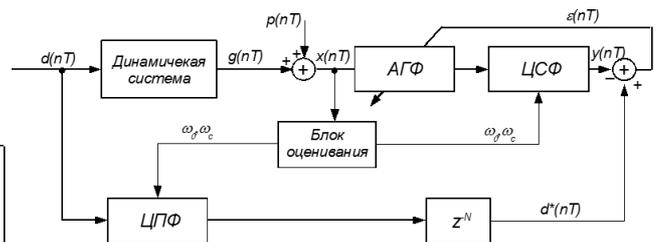


Рисунок 7 – Обратное моделирование динамической системы с использованием децимации и интерполяции импульсной характеристики адаптивного фильтра

Ставится задача исследования эффективности предложенных и известных методов и алгоритмов узкополосной адаптивной фильтрации по таким общепринятым показателям, как: скорость сходимости, точность настройки, вычислительные затраты.

Во **второй главе** рассматриваются методы и алгоритмы узкополосной адаптивной фильтрации в задачах прямого моделирования радиотехнических систем. Приводится вывод алгоритмов оптимальной винеровской фильтрации, метода наименьших квадратов (МНК) и рекурсивного метода наименьших квадратов (РНК) с учетом совмещения операций адаптации и многоскоростной обработки. Проводится исследование эффективности совмещения операций адаптации и многоскоростной обработки в задачах прямого моделирования.

Для адаптивного фильтра-дециматора N -го порядка, реализуемого в классе КИХ-цепей, вход $x(nT_1)$ и выход $y(\nu kT_1) = y(kT_2)$ связаны сверткой вида

$$y(kT_2) = \sum_{m=0}^{N-1} x[(n-m)T_1]h(mT_1) = \sum_{m=0}^{N-1} x[(\nu k-m)T_1]h(mT_1)$$

или в форме векторно-матричного представления

$$y(k) = \bar{x}^T(k)\bar{H} = \bar{H}^T \bar{x}(k), \quad \text{где } \bar{x}^T(k) = \{x(\nu k), x(\nu k-1), x(\nu k-2), \dots, x(\nu k-N+1)\},$$

$$\bar{H}^T = \{h(0), h(1), h(2), \dots, h(N-1)\}.$$

Тогда функция среднеквадратического отклонения (СКО) принимает вид

$$E\{e^2(k)\} = E\{d(k) - \bar{H}^T \bar{x}(k)\}^2,$$

где $d(k)$ – обучающий сигнал с периодом следования отсчетов $T_2 = \nu T_1$, ($n = \nu k$).

Это выражение описывает квадратичную поверхность. Следовательно, оптимальное винеровское решение достигается за один шаг, если выполняется условие

$$\frac{dE\{e^2(k)\}}{d\bar{H}^T} = -2E\{[d(k) - \bar{H}_{opt}^T \bar{x}(k)]\bar{x}^T(k)\} = 0.$$

Отсюда имеет место равенство

$$E\{d(k)\bar{x}^T(k)\} = E\{\bar{H}_{opt}^T \bar{x}(k)\bar{x}^T(k)\} \quad \text{и} \quad \bar{H}_{opt} = \bar{R}^{-1}\bar{P},$$

где $\bar{P} = E\{d(k)\bar{x}(k)\}$ — взаимная корреляция между входным $x(nT_1)$ и обучающим $d(k)$ сигналами; $\bar{R} = E\{\bar{x}(k)\bar{x}^T(k)\}$ — автокорреляционная матрица входной последовательности, принимающая вид

$$\bar{R} = E \begin{vmatrix} x^2(\nu k), x(\nu k-1), x(\nu k-2), \dots, x(\nu k)x(\nu k-N+1) \\ x(\nu k-1)x(\nu k), x^2(\nu k-1), x(\nu k-1)x(\nu k-2), \dots, x(\nu k-1)x(\nu k-N+1) \\ x(\nu k-2)x(\nu k), x(\nu k-2)x(\nu k-1), x^2(\nu k-2), \dots, x(\nu k-2)x(\nu k-N+1) \\ \dots \\ \dots \\ x(\nu k-N+1)x(\nu k), x(\nu k-N+1)x(\nu k-1), \dots, x^2(\nu k-N+1) \end{vmatrix}.$$

Корреляционная матрица \bar{R} размерностью $N \times N$ в отличие от обычного представления использует прореженные в ν раз сигнальные последовательности.

Аналогичные модификации структуры адаптивных узкополосных фильтров с учетом эффекта децимации были выполнены для алгоритмов МНК и РНК.

Обучающие кривые (рисунок 8) показывают, что введение децимации, при отсутствии шума на выходе динамической системы, позволяет достигнуть сверхвысокой потенциальной точности обучения (до 10^{-29}) при пропорциональном коэффициенту децимации ν уменьшении вычислительных затрат. При этом время установления требует приблизительно одинакового числа итераций, но

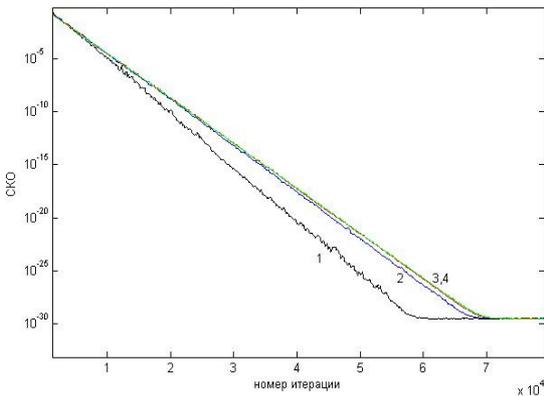


Рисунок 8 – Иллюстрация сходимости алгоритма МНК адаптивного фильтра при значениях $\nu = 1, 2, 4, 8$

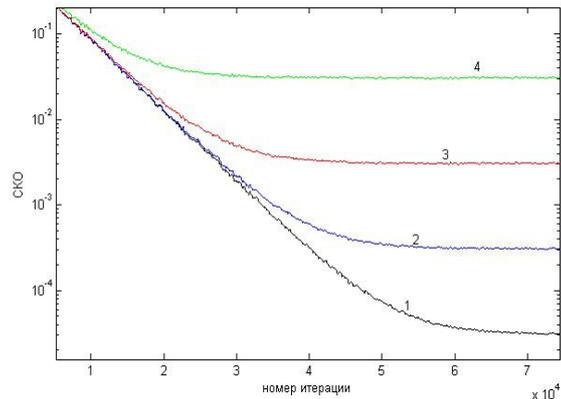


Рисунок 9 – Иллюстрация сходимости алгоритма МНК адаптивного фильтра с учетом воздействия шума при $\nu = 8$

скорость сходимости (величина, обратная постоянной времени установления) уменьшается пропорционально коэффициенту децимации ν . Введение шума на выходе динамической системы приводит к многократному уменьшению точности настройки (рисунок 9), которая уменьшается пропорционально росту дисперсии шума, что объясняется фактом передачи шума с выхода динамической системы непосредственно на выход адаптивной системы в качестве обучающего сигнала. Этот шум не коррелирован с сигналом на входе адаптивного фильтра и не может компенсироваться в процессе обучения. Некоторое уменьшение скорости сходимости по отношению к предшествующему моделированию объясняется уменьшением коэффициента μ в алгоритме МНК с целью увеличения точности обучения в условиях воздействия шума. Уменьшение времени установления в числе итераций связано с тем, что с увеличением дисперсии шума уменьшается потенциально достижимая точность настройки и процесс обучения завершается раньше.

В случае если сигнал на выходе динамической системы содержит помимо узкополосной составляющей паразитную широкополосную составляющую, как показали исследования, характер влияния широкополосной составляющей аналогичен, поскольку интервал корреляции отсчетов широкополосной составляющей меньше периода дискретизации отсчетов выходного сигнала адаптивного фильтра и компенсация широкополосной составляющей фактически невозможна.

Последующие исследования были направлены на модификацию прямой формы реализации узкополосного адаптивного фильтра-дециматора и повышение скорости сходимости за счет подключения фильтра-интерполятора, а также применения алгоритма РНК и использования предварительной обработки.

Результаты исследований эффективности метода узкополосной адаптивной фильтрации по алгоритму МНК с использованием предварительной фильтрации в задаче прямого моделирования представлены на рисунке 10.

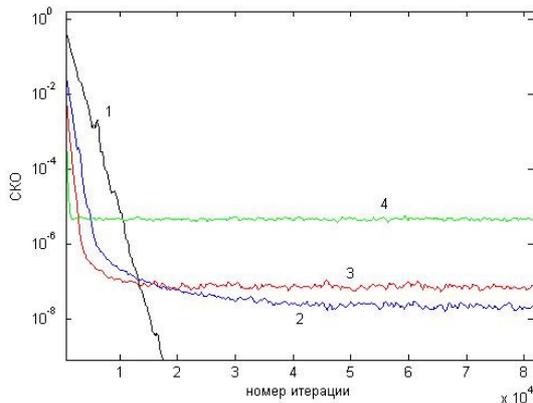


Рисунок 10 – Иллюстрация сходимости алгоритма МНК адаптивного фильтра с предварительной децимацией

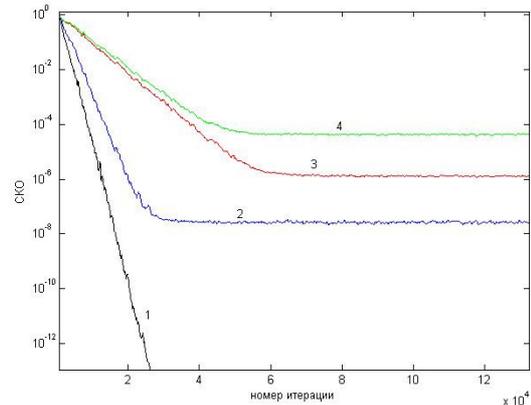


Рисунок 11 – Иллюстрации сходимости алгоритма МНК адаптивного гребенчатого фильтра

Обучающие кривые на рисунке 10 показывают, что, несмотря на введение децимации, сохраняются высокая скорость сходимости и точность настройки. Однако потенциально достижимая точность настройки существенно меньше по отношению к адаптивному фильтру-дециматору без предварительной фильтрации.

С целью исследования работоспособности и эффективности предложенного выше метода узкополосной адаптивной фильтрации на основе цифрового гребенчатого фильтра в задаче прямого моделирования был произведен вывод алгоритма МНК для адаптивного гребенчатого фильтра. На рисунке 11 представлены результаты моделирования адаптивного гребенчатого фильтра с последовательным подключением сглаживающего фильтра для усечения боковых лепестков гребенчатого фильтра. Обучающие кривые, представленные на рисунке 11, отражают:

- 1) работоспособность разработанной схемы;
- 2) высокую потенциальную точность и относительно высокую скорость сходимости при уменьшении вычислительных затрат пропорционально коэффициенту децимации импульсной характеристики.

Предметом исследований **третьей главы** диссертации являются методы и алгоритмы узкополосной адаптивной фильтрации в задачах обратного моделирования радиотехнических систем. Как и для задач прямого моделирования, последовательно рассматриваются различные схемы реализации узкополосного адаптивного фильтра с совмещением операций многоскоростной обработки.

Проводится сравнительный анализ их эффективности с позиции требуемых вычислительных затрат, скорости сходимости и точности обучения.

В отличие от прямого моделирования ставится задача выравнивания амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) динамической системы. Поэтому адаптивный фильтр подключается последовательно с динамической системой (рисунки 2, 5 и 7).

Рисунок 12 иллюстрирует работоспособность и эффективность реализации адаптивного фильтра-дециматора без предварительной фильтрации, а рисунок 13 – с предварительной полосовой фильтрацией на выходе динамической системы (без учета воздействия шума).

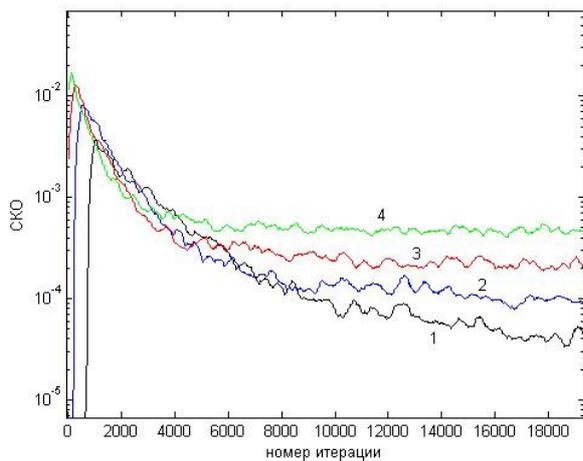


Рисунок 12 – Иллюстрация сходимости алгоритма МНК адаптивного фильтра при значениях $\nu = 1, 2, 4, 8$

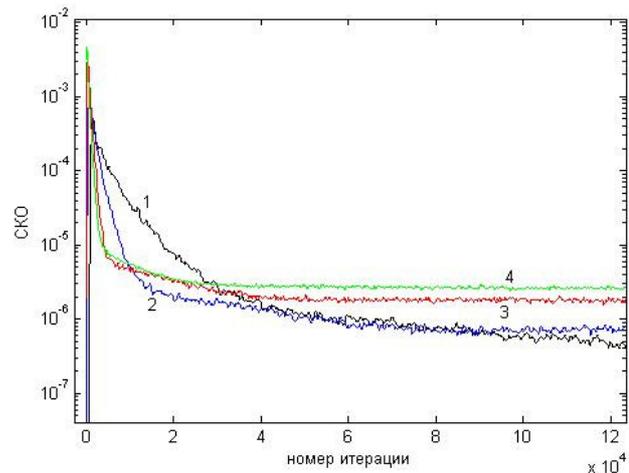


Рисунок 13 – Иллюстрация сходимости алгоритма МНК адаптивного фильтра с предварительной децимацией

Общие выводы в целом совпадают с выводами сравнительного анализа по результатам исследований второй главы применительно к задаче прямого моделирования и заключаются в следующем:

1. Все представленные схемы реализации адаптивного узкополосного фильтра с совмещением операций адаптации и многоскоростной обработки являются работоспособными, но точность и скорость сходимости несколько уменьшаются по отношению к задаче прямого моделирования.
2. Вычислительные затраты уменьшаются пропорционально коэффициенту децимации ν .
3. С увеличением коэффициента децимации уменьшаются точность настройки и скорость сходимости. Вместе с тем в условиях воздействия шумов на выходе динамической системы (или наличия широкополосной составляющей) потенциальная точность обучения недостижима и влияние дополнительного шума децимации проявляется в меньшей степени.
4. Введение предварительной фильтрации с понижением частоты дискретизации способствует повышению точности настройки и скорости сходимости, что связано с уменьшением порядка адаптивного фильтра, работающего на пониженной частоте дискретизации. Однако включение узкополосного фильтра предварительной обработки требует априорного знания

спектрального положения выделяемого узкополосного сигнала, дополнительных временных затрат, что не всегда приемлемо.

Особый интерес представляет исследование работоспособности и эффективности впервые предложенного метода узкополосной адаптивной фильтрации на основе цифрового гребенчатого фильтра. Результаты исследований представлены на рисунках 14 и 15 для адаптивного фильтра без предварительной и с предварительной обработкой, выделяющей заданную полосу частот, соответственно.

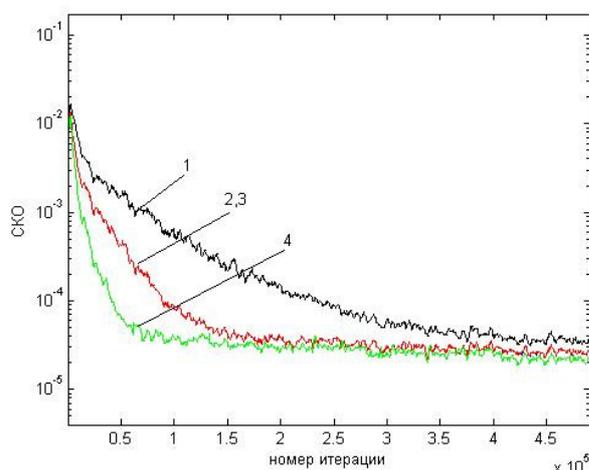


Рисунок 14 – Иллюстрация сходимости алгоритма МНК адаптивного фильтра на основе гребенчатого фильтра без предварительной обработки

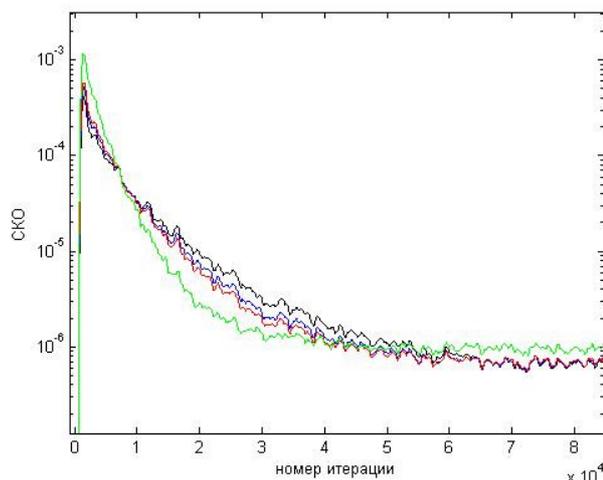


Рисунок 15 – Иллюстрации сходимости алгоритма МНК адаптивного фильтра на основе гребенчатого фильтра с предварительной обработкой

Анализ результатов исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. Алгоритм МНК, как и следовало ожидать, обеспечивает высокую точность настройки, причем независимо от коэффициента децимации импульсной характеристики адаптивного гребенчатого фильтра.
2. Алгоритм РНК отличается высокой скоростью сходимости, которая уменьшается с увеличением коэффициента децимации. При этом пропорционально уменьшается и точность настройки.
3. Во всех случаях вычислительные затраты уменьшаются пропорционально коэффициенту децимации импульсной характеристики адаптивного гребенчатого фильтра.

В **четвертой главе** проводится обзор современных платформ цифровых сигнальных процессоров (ЦСП) с целью последующей разработки для каждой платформы эффективного программного обеспечения для решения задач моделирования радиотехнических систем с использованием адаптивной многоскоростной обработки сигналов. Ставится и решается задача разработки методов и алгоритмов адаптивной обработки узкополосного траекторного сигнала.

Представлены примеры оптимальных программных кодов для ЦСП платформ TMS320C67xx (Texas Instruments, США), ADSP-TS101 (Analog Devices, США) и отечественной платформы МС-24 «Мультикор» («ЭЛВИС», Россия).

В общий список программных кодов входят:

- адаптивный фильтр-дециматор по прямой, полифазной и параллельной формам;
- адаптивный фильтр с предварительной фильтрацией-децимацией;
- адаптивный фильтр-дециматор с последующей интерполяцией;
- адаптивный цифровой гребенчатый фильтр.

Использование методики оптимального проектирования на ЦСП и оптимизация программных кодов позволили дополнительно в несколько раз уменьшить приведенные вычислительные затраты.

Результаты диссертационной работы внедрены в ОАО «ГРПЗ» при выполнении совместных НИОКР по разработке алгоритмов адаптивной обработки траекторного сигнала в задачах радиовидения, а также в учебный процесс при постановке лабораторных работ по циклам дисциплин, связанных с цифровой обработкой сигналов. Представлены испытательный и лабораторный стенды для проведения научных исследований и практических занятий по цифровой обработке радиосигналов в реальном времени.

Проблема формирования радиолокационного изображения (РЛИ) земной поверхности в реальном времени остается одной из актуальных при решении задач радиовидения. Было показано, что введение блока предварительной обработки, выполняющего функцию согласования полосы пропускания цифрового приемника траекторного сигнала с шириной его полосы частот и последующего понижения частоты дискретизации пропорционально отношению частоты повторения зондирующих импульсов к ширине полосы частот траекторного сигнала, позволяет вести формирование и обработку РЛИ при более низкой скорости потока входных данных. Как следствие, уменьшаются общие вычислительные затраты, память данных и коэффициентов, увеличивается соотношение сигнал/шум.

Вместе с тем вследствие траекторных нестабильностей, обусловленных изменением параметров движения носителя бортового радиолокационного комплекса, и различных возмущающих воздействий наблюдается уход доплеровских частот траекторного сигнала, что приводит к пропорциональному смещению его полосы частот (в случае секторного обзора) и дополнительной нелинейной трансформации частот (в случае панорамного обзора). В том и другом случае требуется введение блока адаптации, отслеживающего все изменения полосы частот траекторного сигнала и выполняющего адекватную настройку параметров цифрового приемника в реальном времени с понижением частоты дискретизации пропорционально отношению частоты повторения зондирующих импульсов к ширине полосы частот траекторного сигнала.

На рисунке 16 представлена структурная схема устройства предварительной обработки узкополосного траекторного сигнала, выполняющего адаптивную подстройку параметров цифрового приемника в реальном времени. Представляет интерес сочетание «грубой» и «точной» настроек узкополосного фильтра-дециматора (ФД). На первом этапе адаптации, когда неизвестен амплитудный спектр траекторного сигнала, можно воспользоваться «грубой» оценкой ухода доплеровских частот по максимуму мощности сигнала на выходе набора поло-

совых фильтров. Реализация блока оценивания ухода полосы частот траекторного сигнала с помощью набора обычных полосовых фильтров целесообразна и в дальнейшем, чтобы не допустить срывов слежения при «точной» настройке.

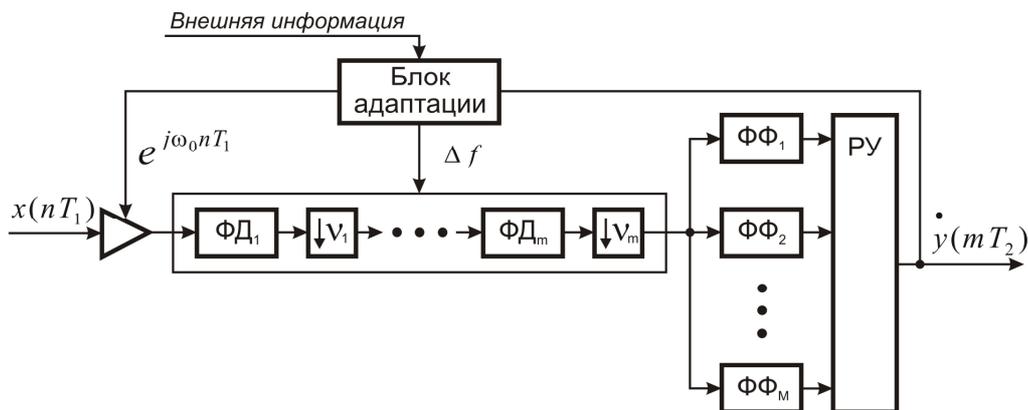


Рисунок 16 – Структурная схема устройства предварительной обработки узкополосного траекторного сигнала

На втором этапе адаптации по информации об амплитудном спектре траекторного сигнала, полученной с выхода устройства формирования РЛИ, или с помощью дополнительного БПФ-преобразования производится «точная» подстройка полосы пропускания цифрового приемника. С этой целью используется набор из M формирующих фильтров, перекрывающих диапазон частот, выделенный входным ФД. Предполагается, что АЧХ формирующих фильтров (ФФ) совпадают с амплитудным спектром принимаемого траекторного сигнала и отличаются только значением центральных частот.

Приложения содержат тексты основных программных реализаций, полученных в ходе проведенных исследований работоспособности и эффективности предложенных методов и алгоритмов.

В **заключении** сформулированы следующие основные научные положения диссертационной работы:

1. Разработаны метод построения адаптивного узкополосного фильтра и алгоритмы его реализации на основе полифазной и параллельной структур, отличающиеся совмещением операций адаптации, децимации и интерполяции (многоскоростной обработки).
2. Показано, что:
 - введение децимации позволяет достигнуть высокой потенциальной точности алгоритма МНК при уменьшении приведенных вычислительных затрат пропорционально коэффициенту децимации; однако наличие широкополосного шума на выходе динамической системы многократно уменьшает потенциально достижимую точность обучения;
 - введение интерполяции позволяет восстановить высокую скорость сходимости при некотором увеличении вычислительных затрат и снижении точности настройки, которое проявляется в меньшей степени при воздействии шума на выходе динамической системы;

- адаптивный фильтр-дециматор на основе алгоритма РНК обеспечивает высокую точность настройки при увеличении скорости сходимости на порядок по отношению к алгоритму МНК и уменьшении вычислительных затрат пропорционально коэффициенту децимации;
 - предварительная узкополосная фильтрация-децимация дает наибольший выигрыш с позиции минимизации вычислительных затрат, обеспечения высокой точности и скорости сходимости, но требует операций настройки на априорно неизвестную полосу выделяемых частот и, как следствие, дополнительных временных затрат, в частности задержки по времени.
3. Разработаны метод построения адаптивного узкополосного фильтра и алгоритмы его реализации на основе адаптивного гребенчатого фильтра, отличающиеся совмещением операций адаптации и децимации импульсной характеристики.
 4. Показано, что введение децимации импульсной характеристики адаптивного гребенчатого фильтра позволяет пропорционально уменьшить вычислительные затраты при относительно высокой скорости сходимости и точности настройки, однако характеристики процесса обучения ухудшаются с увеличением коэффициента децимации.
 5. Проведен сравнительный анализ методов и алгоритмов адаптивной узкополосной фильтрации применительно к решению задач прямого и обратного моделирования радиотехнических систем; даны рекомендации по их использованию.
 6. Разработана библиотека оптимальных программных кодов реализации алгоритмов адаптивной многоскоростной обработки сигналов на современных зарубежных платформах ЦСП TMS320C67xx (Texas Instruments, США), ADSP-TS101 (Analog Devices, США) и отечественной платформе МС-24 «Мультикор» (НПЦ «ЭЛВИС», Россия).
 7. Разработаны методы и алгоритмы адаптивной многоскоростной обработки узкополосного траекторного сигнала применительно к решению задач радиовидения в реальном времени.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в ведущих рецензируемых научных изданиях

1. Витязев С.В. Стратегия компании Analog Devices в области DSP: обзор новых средств проектирования систем цифровой обработки сигналов // Цифровая обработка сигналов. – 2001. – №1. – С. 41-49.
2. Витязев С.В., Воронков Д.В. Современные цифровые процессоры обработки сигналов в задачах радиолокации // Вопросы радиоэлектроники. – Сер. ОТ. – 2006. – Вып. 2. – С. 105-115.
3. Витязев С.В. Новые разработки DSP компаний Texas Instruments и Analog Devices в 2006 году // Цифровая обработка сигналов. – 2006. – № 4. – С. 48-53.
4. Витязев В.В., Колодыко Г.Н., Витязев С.В. Способы и алгоритмы формирования радиолокационного изображения в режиме доплеровского облучения луча // Цифровая обработка сигналов. – 2006. – № 3. – С. 31-41.
5. Витязев С.В. Новые разработки компаний Texas Instruments и Analog Devices в 2007 году // Цифровая обработка сигналов. – 2008. – № 1. – С. 64-67.

6. Витязев В.В., Зайцев А.А., Витязев С.В. Многоскоростная обработка сигналов: ретроспектива и современное состояние. Часть 1 // Цифровая обработка сигналов. – 2008. – № 1. – С. 12-21.
7. Витязев В.В., Зайцев А.А., Витязев С.В. Многоскоростная обработка сигналов: ретроспектива и современное состояние. Часть 2 // Цифровая обработка сигналов. – 2008. – № 3. – С. 2-9.
8. Витязев С.В. Адаптивный гребенчатый фильтр на процессорах «Мультикор» // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. Вып. 3. - 2008. – С. 121-126.
9. Андреев Н.А., Витязев В.В., Витязев С.В. Методы и алгоритмы адаптивной многоскоростной обработки траекторного сигнала в задачах радиовидения // Цифровая обработка сигналов. – 2010. – № 1. – С. 38-44.
10. Витязев С.В., Лихобабин Е.А. Библиотека функций адаптивной фильтрации для процессоров «Мультикор»: адаптивный цифровой гребенчатый фильтр // Вопросы радиоэлектроники. Сер. общетехническая (ОТ). – 2011. – Вып. 1. – С. 89-99.
11. Андросов В.В., Витязев В.В., Витязев С.В., Шершнев Е.Д. Алгоритмы автофокусировки радиоизображений в условиях динамичных траекторных нестабильностей // Цифровая обработка сигналов. – 2012. – № 1. – С. 64-70.

Материалы международных конференций, учебные пособия

1. Витязев С.В., Воронков Д.В., Андреев Н.А. Анализ эффективности программной реализации типовых операций обработки радиолокационных сигналов на цифровых сигнальных процессорах // Радиолокация, навигация, связь: тезисы междунар. науч.-техн. конф. – Воронеж. – 2005. – С. 302.
2. Колодыко Г.Н., Витязев С.В. Моделирование и исследование эффективности формирования радиолокационного изображения в режиме доплеровского облучения луча // Цифровая обработка сигналов и ее применение: труды междунар. науч.-техн. конф. – Вып.: IX-1. – М., 2007. – С. 258-260.
3. Витязев С.В., Якунин С.А. Применение многоскоростной обработки сигнала для построения доплеровского фильтра обнаружения движущихся объектов в задачах радиовидения // Цифровая обработка сигналов и ее применение: труды междунар. науч.-техн. конф. – Вып.: X-1. – М., 2008. – С. 156-158.
4. Витязев С.В. Адаптивная цифровая фильтрация узкополосных процессов // Цифровая обработка сигналов и ее применение: труды междунар. науч.-техн. конф. – Вып.: X-1. – М., 2008. – С. 159-161.
5. Витязев В.В., Витязев С.В. Цифровые процессоры обработки сигналов TMS320C67x компании Texas Instruments: учеб. пособие. Рязань: РГРТУ, 2008. – 140 с.
6. Андреев Н.А., Витязев В.В., Витязев С.В. Алгоритмы адаптации к уходу доплеровских частот узкополосного траекторного сигнала // Цифровая обработка сигналов и ее применение: труды междунар. науч.-техн. конф. – Вып.: XI-1. – М., 2009. – С. 111-113.
7. Витязев С.В. Адаптивный гребенчатый фильтр и его применение для фильтрации узкополосных процессов // Радиолокация, навигация, связь: труды междунар. науч.-техн. конф. – Том 1. – Воронеж, 2009. – С. 300-306.
8. Андреев Н.А., Витязев В.В., Витязев С.В. Алгоритмы адаптивной многоскоростной обработки широкополосного траекторного сигнала // Цифровая обработка сигналов и ее применение: труды междунар. науч.-техн. конф. – Вып.: XII-1. – М., 2010. – С. 171-174.
9. Витязев С.В., Скичко Д.Ю. Отладочный стенд системы генерации модели траекторного сигнала и формирования радиолокационного изображения // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2010: труды докл. междунар. молодежн. науч.-техн. конф. – Севастополь, 2010. – С. 340.
10. Vityazev S.V. Radar Imaging System Implementation for educational and research purposes on the EVM DM6437 boards // 4-th European DSP Education and Research Conference Proceedings. - Texas Instruments. - 2010. P. 10-15.

11. Витязев С.В. Программная реализация цифрового фильтра-дециматора на цифровых сигнальных процессорах TigerSHARC ADSP-TS101 // Цифровая обработка сигналов и ее применение: труды междунар. науч.-техн. конф. – Вып.: XII-2. – М., 2010. – С. 259-261.
12. Витязев С.В. Исследование проблемы узкополосной адаптивной фильтрации // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: тезисы докл. междунар. науч.-техн. конф. – Рязань: РГРТУ, 2010. – С. 44.
13. Андросов В.В., Витязев В.В., Витязев С.В., Шершнева Е.Д. Алгоритмы автофокусировки радиоизображений в условиях динамических траекторных нестабильностей // Цифровая обработка сигналов и ее применение: труды междунар. науч.-техн. конф. – Том 1. – М., 2012. – С. 114-118.
14. Vityazev S.V. Test bench for signal processing modules examination and efficiency rating // 5-th European DSP Education and Research Conference Proceedings. – Texas Instruments. – 2012. – P. 213-216.
15. Андросов В.В., Витязев С.В. Моделирование алгоритмов автофокусировки и синтеза радиои изображений в режиме «доплеровского облучения луча» // Цифровая обработка сигналов и ее применение: труды 15-й междунар. науч.-техн. конф. – Том 2. – М., 2013. – С. 252-256.

Витязев Сергей Владимирович

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ УЗКОПОЛОСНОЙ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Специальность: 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 27.09.13. Формат бумаги 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ 5618.

Отпечатано в ООО «Информационные технологии».
390035, г. Рязань, ул. Островского, д.21/1.