

На правах рукописи

**Горюшкин Руслан Сергеевич**

**АЛГОРИТМЫ УЗКОПОЛОСНОЙ АДАПТИВНОЙ  
ФИЛЬТРАЦИИ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНЫХ  
ГРЕБЕНЧАТЫХ БИХ-ФИЛЬТРОВ**

Специальность: 2.2.13.

Радиотехника, в том числе системы и устройства  
телевидения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Рязань 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»

**Научный руководитель:** **Витязев Владимир Викторович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой телекоммуникаций и основ радиотехники ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», г. Рязань

**Официальные оппоненты:** **Джиган Виктор Иванович**, доктор технических наук, доцент, профессор Института микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва

**Лесников Владислав Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры Радиоэлектронных средств ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Защита состоится «**28**» **сентября 2023 г. в 12 ч 00 мин** на заседании диссертационного совета **24.2.375.03** в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» по адресу: **390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» и на официальном сайте университета <http://www.rsreu.ru>.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.375.03  
доктор технических наук, доцент



Г.В. Овечкин

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Методы и алгоритмы адаптивной цифровой обработки сигналов (ЦОС) являются объектом пристального внимания исследователей уже более пяти десятилетий. Первые работы, посвященные адаптивным алгоритмам, были представлены в 50-е годы XX века. В 80-е годы произошёл значительный рост количества исследований и началось активное применение данных алгоритмов. В это время появилось большое количество публикаций, наиболее известные из которых принадлежат С. Стринзу, Б. Уидроу, К.Ф. Коуэну, П.М. Гранту, а также С. Хайкину. Этот рост можно объяснить появлением первых инструментов разработки и фундаментальных книг в этом направлении исследований. Начиная с 90-х годов XX века с увеличением темпов развития элементной базы ускорилось и развитие алгоритмов цифровой адаптивной фильтрации. На сегодняшний день существует большое количество трудов отечественных и зарубежных авторов, которые систематизируют накопленные ранее теоретические и практические знания. Среди авторов можно выделить работы П. Диниза, М. Белланже, А. Саида, В.И. Джигана и других.

В настоящее время интерес к цифровой адаптивной фильтрации не угасает и появляется большое количество работ, которые можно разделить на две большие части: первая из них связана с практическими приложениями алгоритмов и их реализацией на конкретных аппаратных платформах, вторая – с усовершенствованием классических методов.

Структура адаптивного фильтра может относиться к одному из двух классов цепей: с конечной импульсной характеристикой (КИХ) или с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ). Выбранный класс влияет на вычислительную сложность и скорость сходимости процесса адаптации. Адаптивные фильтры в классе КИХ-цепей реализуют нерекурсивную передаточную функцию без обратной связи. Для данных реализаций выходной сигнал является линейным скалярным произведением входного сигнала с настраиваемыми коэффициентами фильтра. Адаптивные БИХ-фильтры характеризуются наличием настраиваемых нулей и полюсов. Соответственно, в большинстве алгоритмов производится адаптация коэффициентов числителя и знаменателя. Адаптивные

БИХ-фильтры имеют ряд преимуществ перед адаптивными КИХ-фильтрами, основным из которых является сокращение вычислительной сложности. При равном количестве коэффициентов частотный отклик БИХ-фильтра точнее аппроксимирует желаемую характеристику. Следовательно, при использовании адаптивного БИХ-фильтра требуется настройка меньшего количества коэффициентов, особенно в том случае, когда эталонная модель имеет как нули, так и полюсы и/или высокий коэффициент прямоуглольности. Задачи, требующие сотен, а иногда тысяч настраиваемых коэффициентов КИХ-фильтра, могут быть решены адаптивным БИХ-фильтром значительно меньшего порядка. Примерами таких задач являются эквалайзеры для спутниковых систем и систем мобильной передачи данных, а также акустические эхоподавители и др.

Наряду с преимуществами, которые свойственны адаптивным БИХ-фильтрам, существует ряд недостатков: возможная неустойчивость адаптивного фильтра, медленная сходимость алгоритмов, наличие на поверхности ошибок локальных минимумов.

Наиболее ярко недостатки БИХ-фильтров проявляют себя при реализации устройств с высокими показателями узкополосности и прямоуглольности. В то же время стоит отметить, что в современных системах узкополосной цифровой фильтрации сигналов широкое применение нашёл подход, подразумевающий использование многоскоростной фильтрации. Такой подход может быть использован при проектировании как фильтров в классе КИХ-, так и БИХ-цепей. Многоскоростная фильтрация основана на использовании вторичной дискретизации обрабатываемого сигнала. Фундаментом для реализации многоскоростных систем являются операции децимации и интерполяции.

Исследованиям в области многоскоростной обработки сигналов посвящено большое количество работ, среди которых труды Р. Крошье, Л. Рабинера, М. Беланже, К. Ли, П. Вадьянатхана, Е. Хэнслера, П. Диниза, В.В. Витязева и др. Построение узкополосных фильтров с использованием подходов многоскоростной фильтрации позволяет значительно снизить вычислительную сложность для КИХ-фильтров, увеличить стабильность БИХ-фильтров.

Применение комбинации адаптивной и многоскоростной обработки сигналов стало предметом исследования многих учёных и позволило решить ряд практических проблем. Однако подавляющее большинство исследований посвящены фильтрам с конечной импульсной характеристикой. Учитывая все преимущества, которые предоставляют фильтры с бесконечной импульсной характеристикой, исследование комбинации адаптивной и многоскоростной обработки для данного класса фильтров является перспективным направлением исследований.

**Цели и задачи исследования.** Основной целью работы является разработка и исследование структур многоскоростной адаптивной фильтрации в цепях с бесконечной импульсной характеристикой.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач, среди которых:

- 1) анализ устойчивости цифровых гребенчатых (ЦГФ) БИХ-фильтров в условиях ограничения разрядности представления коэффициентов;
- 2) анализ существующих алгоритмов и структур построения цифровых адаптивных фильтров в классе БИХ-цепей;
- 3) анализ подходов и методов построения систем фильтрации на основе многоскоростной обработки сигналов в классе БИХ-цепей;
- 4) разработка алгоритмов для решения задачи узкополосной фильтрации в классе БИХ-цепей с использованием многоскоростной обработки сигналов;
- 5) моделирование и исследование эффективности разработанных методов и алгоритмов узкополосной адаптивной фильтрации в цепях с бесконечной импульсной характеристикой, их сравнительный анализ.

**Объект исследования** – цифровые гребенчатые фильтры и адаптивные многоскоростные системы в классе цепей с бесконечной импульсной характеристикой.

**Предмет исследования** – влияние гребенчатой структуры БИХ-фильтров на устойчивость к неточному представлению коэффициентов, на точность и скорость сходимости алгоритмов адаптации коэффициентов фильтров при решении задач узкополосной цифровой адаптивной обработки сигналов.

**Методологические и теоретические основы исследования** основаны на методах математической статистики, статистической

радиотехники и имитационного моделирования алгоритмов цифровой обработки сигналов.

### **Научная новизна исследования**

1. Проведен анализ устойчивости узкополосных гребенчатых БИХ-фильтров, показана связь устойчивости гребенчатого и базового фильтров в условиях неточного представления коэффициентов.

2. Проведён анализ существующих алгоритмов для адаптивной фильтрации в классе БИХ-цепей, а также реализованы математические модели для ряда классических алгоритмов и структур.

3. Предложены алгоритмы адаптивных многоскоростных фильтров с последовательным включением цифрового адаптивного гребенчатого (АЦГФ) и сглаживающего фильтров (СФ).

4. Исследована эффективность алгоритмов адаптивной узкополосной фильтрации в различных задачах таких как: прямое и обратное моделирование узкополосных систем, задачах предсказания, а также в задачах очистки узкополосного сигнала от широкополосного шума и очистки широкополосного сигнала от узкополосного шума.

5. Разработано программное обеспечение для персонального компьютера на языке *Python*, позволяющее исследовать и сравнивать эффективность работы как классических, так и разработанных в ходе выполнения данной работы алгоритмов.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Устойчивость гребенчатых БИХ-фильтров определяются соответствующим базовым фильтром, синтезируемом в классе БИХ-цепей.

2. Алгоритмы узкополосной адаптивной обработки сигналов на основе адаптивного гребенчатого и сглаживающего фильтров позволяют уменьшить уровень среднего квадрата ошибки (СКО) после обучения системы до 18 дБ в сравнении с известными алгоритмами.

3. Алгоритмы узкополосной адаптивной обработки сигналов на основе адаптивного гребенчатого и сглаживающего фильтров позволяют увеличить скорость сходимости адаптивных алгоритмов до 5 раз в сравнении с известными алгоритмами.

4. Увеличение коэффициента децимации при адаптивной обработке узкополосных процессов приводит к увеличению

скорости и точности обучения адаптивной системы на основе гребенчатого фильтра.

**Практическая ценность исследования.** Проведённые исследования методов узкополосной фильтрации с использованием цифровых гребенчатых БИХ-фильтров позволяют сформировать алгоритмы построения устойчивых узкополосных фильтров в условиях ограниченной разрядности представления коэффициентов.

Предложенные алгоритмы построения узкополосных адаптивных БИХ-фильтров позволяют реализовать адаптивные фильтры, имеющие более высокую скорость и точность сходимости в сравнении с известными алгоритмами адаптации при незначительном увеличении вычислительной сложности.

Реализованный программно-аппаратный комплекс может быть использован для математического моделирования работы представленных в исследовании адаптивных и неадаптивных БИХ-фильтров с различными параметрами в ряде областей их применения. Основываясь на результатах моделирования, возможно принять решение о выборе параметров цифрового фильтра для решения конкретной задачи. Примерами таких задач является узкополосная фильтрация с использованием фильтров с неизменяемыми коэффициентами в условиях ограничения разрядности коэффициентов, а также адаптивная узкополосная фильтрация в задачах прямого и обратного моделирования, предсказания сигнала, очистки узкополосного сигнала от шума, а также сигнала от узкополосной помехи.

**Реализация результатов работы.** Основные теоретические и практические результаты работы внедрены в учебный процесс в Рязанском государственном радиотехническом университете им. В.Ф. Уткина в лекционных курсах «Цифровая обработка сигналов», «Цифровая обработка сигналов и сигнальные процессоры в СПР».

**Достоверность** полученных в ходе выполнения диссертационной работы научных и практических результатов определяется:

- соответствием ожидаемых теоретических результатов с результатами, полученными в ходе имитационного моделирования;
- обоснованностью выбора исходных данных при построении системы имитационного моделирования;
- апробацией полученных результатов на международных и всероссийских научно-технических конференциях.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и форумах:

- 17, 20, 22-й Международной научно-технической конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Москва, 2015, 2018 и 2020 гг.
- I Международном научно-техническом форуме «Современные технологии в науке и образовании», Рязань, 2018г.
- Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные вопросы радиотехники и электроники», Тула, 2021г.
- XXVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях (НИТ-2022)», Рязань, 2022

**Публикации.** По тематике диссертации опубликовано 11 работ. Из них 5 статей в ведущих рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ, 6 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях и форумах.

**Личный вклад автора.** Основные результаты исследований получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, соискатель внёс значительный вклад при постановке и решении задач, а также обобщении полученных результатов.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Диссертация содержит 166 страниц, включает 95 рисунков, 14 таблиц, 5 приложений. Используются ссылки на 91 источник литературы.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы основные цели и задачи работы. Рассмотрены вопросы практической ценности и области применения результатов работы, приведены сведения по апробации работы.

**В первой главе** проведён анализ методов построения узкополосных цифровых систем на основе цифровых гребенчатых БИХ-фильтров. Проанализированы структуры узкополосных систем, основой которых является цифровой гребенчатый фильтр (ЦГФ). Приведен алгоритм перехода от базового низкочастотного фильтра к гребенчатому и показана теоретическая связь чувствительности

полюсов базового и гребенчатого БИХ-фильтров при неточном представлении коэффициентов в условиях ограничения разрядности.

Переход от передаточной функции базового низкочастотного фильтра  $H^*(w^{-1})$  к передаточной функции гребенчатого фильтра  $H_{г.ф.}(z^{-1})$  производится путём подстановки в  $H^*(w^{-1})$  соотношения  $w = z^v$ .

При этом полюсы передаточной функции гребенчатого фильтра  $z_{k,l}$ ,  $l = 0, (v-1)$  связаны с полюсами передаточной функции базового низкочастотного фильтра порядка  $M_l$  следующим выражением:

$$z_{k,l} = w_k^{\frac{1}{v}} e^{j \frac{2\pi l}{v}}. \quad (1)$$

С учётом  $z_{k,l} = r_{k,l} e^{j\omega_{k,l}}$  и  $w_k = R_k e^{j\Omega_k}$ , соотношение (1) может быть представлено как совокупность выражений:

$$r_{k,l} = R_k^{1/v}; \quad \omega_{k,l} = \Omega_k/v + 2\pi l/v, \quad l = 0, (v-1),$$

где  $(r_{k,l}, \omega_{k,l})$  и  $(R_k, \Omega_k)$  – полярные координаты  $k$  полюса цифрового гребенчатого и базового фильтров, соответственно,  $l$  – порядковый номер периодической последовательности полюсов гребенчатого фильтра.

В соответствии с методом Кайзера смещение  $\Delta z_k$   $k$ -того полюса цифрового фильтра относительно расчётного положения можно выразить через ошибки коэффициентов  $\Delta a_i$ ,  $i = \overline{1, M_1}$ , знаменателя  $P(z^{-1})$  передаточной функции  $H(z^{-1}) = Q(z^{-1})/P(z^{-1})$ :

$$\Delta z_k = \sum_{i=1}^{M_1} \left( \frac{\partial z_k}{\partial a_i} \right) \Delta a_i, \text{ при } k = \overline{1, M_1},$$

где

$$\frac{\partial z_k}{\partial a_i} = z_k^i / \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^{M_1} (z_k - z_m). \quad (2)$$

Параметр (2) является мерой чувствительности  $k$ -того полюса к изменению  $i$  коэффициента знаменателя.

Аналогично (2) в качестве меры чувствительности  $k$ -того полюса базового низкочастотного фильтра примем:

$$a_{k,i}^* = \frac{\partial w_k}{\partial a_i} = w_k^i / \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^{M_1} (w_k - w_m). \quad (3)$$

Тогда, с учётом (3), в качестве меры чувствительности  $(k, l)$ -полюса проектируемого гребенчатого фильтра примем показатель:

$$\beta_{k,l,i}^* = \frac{\partial z_{k,l}}{\partial a_i} = z_{k,l}^{vi} \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^{M_1} (z_{k,l}^v - z_{m,l}^v), \quad (4)$$

где  $k = \overline{1, M_1}, l = \overline{0, (v-1)}$ .

Свяжем параметры чувствительности  $k$  полюса базового низкочастотного фильтра с чувствительностью полюса гребенчатого фильтра. Для этого подставим выражение (1) в выражение (4):

$$\beta_{k,l,i}^* = a_{k,i}^*, \quad \text{для всех } l = \overline{0, (v-1)}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что модуль показателя  $\beta_{k,l,i}^*$  не зависит от порядкового номера  $l$  периодической последовательности полюсов цифрового гребенчатого фильтра и полностью определяется чувствительностью полюсов базового низкочастотного фильтра.

Далее был проведён обзор известных работ, связанных с построением адаптивных систем на основе БИХ-фильтров с настраиваемыми коэффициентами. Исследуются работы, посвященные решению проблем реализации устойчивых адаптивных фильтров, проблем сходимости целевой функции к локальному минимуму. Также рассматриваются алгоритмы, основанные на методах минимизации выходной ошибки, методах уравнения ошибок, а также алгоритм Стиглица-МакБрайда, приводится описание подходов выбора параметров адаптивных фильтров.

Существует ряд проблем, возникающих при реализации адаптивных цифровых БИХ-фильтров, которые наиболее остро проявляют себя при реализации узкополосных фильтров:

- нестабильность работы адаптивного фильтра (зависит как от структуры, так и от алгоритма адаптации, а также формата представления коэффициентов фильтра);
- недостаточная скорость и точность сходимости алгоритма;
- наличие локальных минимумов на поверхности ошибок.

Методы уравнения ошибок (equation error – EE) позволяют гарантировать сходимость целевой функции к глобальному

минимуму. Однако, в случае наличия большого уровня шума измерения, присутствует смещение в оценке эталонного сигнала. Также для данных методов не всегда гарантирована стабильная работа.

Методы минимизации выходной ошибки (output error – ОЕ) позволяют реализовать простую, с точки зрения вычислительных затрат, адаптивную систему, которая даёт относительно точное схождение целевой функции к минимуму. Однако наличие локальных минимумов часто ограничивает применение данных алгоритмов.

Алгоритм Стиглица-МакБрайда является комбинацией методов уравнивания ошибок и минимизации выходной ошибки. В случае достаточного порядка фильтры, реализованные на основе данного алгоритма, сходятся к несмещенным значениям параметров. Значительным ограничением применения данного алгоритма является случай окрашенного шума измерения.

**Вторая глава** посвящена исследованию устойчивости гребенчатых БИХ-фильтров, в частности в условиях ограничения разрядности представления коэффициентов, а также разработке алгоритмов узкополосной обработки сигналов на основе цифровых адаптивных гребенчатых БИХ-фильтров.

При помощи математического моделирования была подтверждена прямая связь между устойчивостью гребенчатого фильтра и соответствующего ему базового фильтра.

На рисунке 1а приведена нуль-полусная диаграмма узкополосной системы, реализованной на базе последовательного соединения ЦГФ и СФ с ограниченной разрядностью представления коэффициентов, на рисунке 1б – диаграмма соответствующего узкополосного БИХ-фильтра, реализованный по прямой форме.

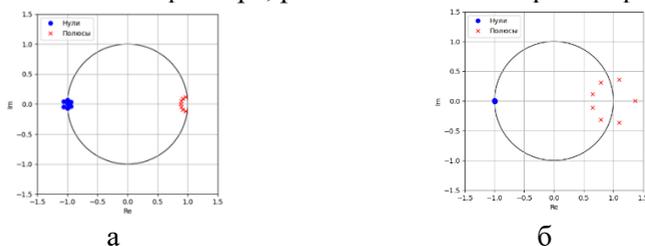


Рисунок 1 – Нуль-полусные диаграммы узкополосного ФНЧ Баттерворта с квантованными коэффициентами (а) – на основе ЦГФ, (б) – классический ФНЧ

Из рисунка 1 видно, что при одинаковой разрядности коэффициентов, система на базе ЦГФ сохраняет устойчивость в отличие от прямой формы реализации БИХ-фильтра.

Для проверки влияния неточного представления коэффициентов был реализован ряд узкополосных НЧ-фильтров и соответствующих им узкополосных систем, состоящих из последовательного соединения ЦГФ и СФ. Исследования устойчивости проводились для следующих типов фильтров: Баттерворта, эллиптический, а также Чебышева 1 и 2 рода. Разрядность коэффициентов имела следующие варианты представления: числа с плавающей точкой двойной точности, с фиксированной точкой 16 и 32 бита.

В результате проведенных теоретических и практических исследований были сделаны следующие выводы:

- 1) устойчивость гребенчатого фильтра полностью определяется устойчивостью базового низкочастотного фильтра, в том числе в условиях ограничения разрядности представления коэффициентов;
- 2) сочетание невысоких вычислительных затрат и высокой степени устойчивости устройств узкополосной фильтрации, построенных на основе последовательного соединения цифрового гребенчатого и сглаживающего БИХ-фильтров, делает привлекательным их применение при реализации задач узкополосной фильтрации, в том числе адаптивной.

Было предложено два алгоритма узкополосной обработки сигналов на основе цифровых адаптивных гребенчатых БИХ-фильтров.

Упрощенная схема реализации первого алгоритма приведена на рисунке 2. Он основан на использовании фильтра-дециматора для входного  $x(n)$  и обучающего  $d(n)$  сигналов. Настройка адаптивного фильтра производится на пониженной частоте дискретизации. Полученные после адаптации коэффициенты адаптивного фильтра используются для инициализации гребенчатого фильтра, на вход которого поступает входной узкополосный сигнал на исходной частоте дискретизации. Для устранения дополнительных полос амплитудно-частотной характеристики адаптивного цифрового гребенчатого фильтра, используется сглаживающий фильтра (СФ).

Второй алгоритм предполагает обучение адаптивного цифрового гребенчатого БИХ-фильтра. Обобщенная схема

реализации данного алгоритма приведена на рисунке 3. Особенностью данного подхода является появление дополнительных полос в процессе настройки АЦГФ. На выходе эти полосы должны быть устранены при помощи сглаживающего фильтра.

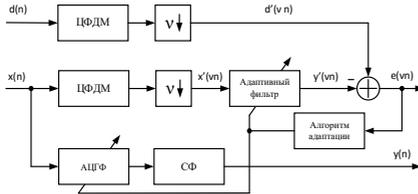


Рисунок 2 – Структура узкополосной системы на основе адаптивного и гребенчатого БИХ-фильтров

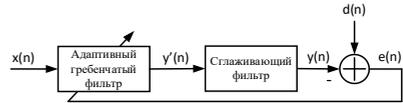


Рисунок 3 – Структура узкополосной системы на основе АЦГФ и СФ

Далее был описан переход от структуры адаптивного БИХ-фильтра к структуре адаптивного гребенчатого фильтра (АЦГФ) с бесконечной импульсной характеристикой. Пусть выходной сигнал базового адаптивного БИХ-фильтра имеет вид:

$$y(n) = - \sum_{i=1}^N \hat{a}_i y(n-i) + \sum_{i=0}^M \hat{b}_i x(n-j), \quad (6)$$

где  $[\hat{b}_i]$  и  $[\hat{a}_i]$  – адаптируемые коэффициенты усиления и обратной связи соответственно.

Для удобства определим:  $\hat{\theta}$  и  $X(n)$  – векторы совокупности коэффициентов и совокупности данных соответственно, которые могут быть определены следующим образом:

$$\hat{\theta} = [\hat{a}_1 \dots \hat{a}_N \hat{b}_0 \dots \hat{b}_M]^T \quad (7)$$

$$X(n) = [y(n-1) \dots y(n-N) x(n) \dots x(n-M)]^T \quad (8)$$

Перепишем уравнение (6), подставив в него (7) и (8):

$$y(n) = \hat{\theta}^T(n)X(n).$$

При переходе к структуре АЦГФ с бесконечной импульсной характеристикой выражение (6) примет вид:

$$y(n) = \sum_{r=0}^{M_1=M/v} \hat{b}_r x[(n-vr)] - \sum_{k=1}^{N_1=N/v} \hat{a}_k y[(n-vk)],$$

где  $\hat{b}_r$ ,  $\hat{a}_k$  – адаптируемые коэффициенты усиления и обратной связи соответственно адаптивного базового НЧ-фильтра с бесконечной

импульсной характеристикой, а  $v$  – коэффициент децимации. При этом выражение (10) примет вид:

$$X(n) = [y(n - v)..y(n - vN) x(n)..x(n - vM)]^T.$$

В завершении данной главы приведены особенности реализации сглаживающего фильтра.

В **третьей главе** приведено описание задач адаптивной цифровой фильтрации в классе цепей с бесконечной импульсной характеристикой. Проведён обзор задач, решаемых с использованием адаптивной фильтрации. После этого произведён анализ основных подходов адаптивной фильтрации в задачах прямого и обратного моделирования узкополосных систем, задачах предсказания, выравнивания канала, а также задачах очистки узкополосного сигнала от широкополосного шума и широкополосного сигнала от узкополосной помехи. Для решения задач применяются как известные алгоритмы адаптации, так и предложенные автором модифицированные методы и алгоритмы на основе гребенчатых адаптивных фильтров, проводится их сравнение.

Предлагается ряд структур для решения задач адаптивной цифровой узкополосной фильтрации с использованием адаптивных гребенчатых БИХ-фильтров. На рисунке 4 представлена структура для решения задачи прямого моделирования неизвестной узкополосной системы на основе алгоритма, использующего подход обработки сигнала на пониженной частоте дискретизации с последующей настройкой гребенчатого БИХ-фильтра.

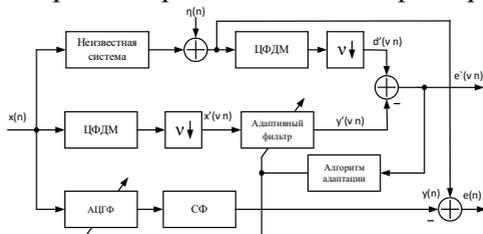


Рисунок 4 – Схема для решения задачи прямого моделирования с использованием децимации входного сигнала и АЦГФ

Результаты исследования алгоритмов LMS (Least mean square) и RLS (Recursive least squares) в задаче прямого моделирования приведены на рисунках 5 – 8. Обучающие кривые LMS OE/EE и RLS OE/EE представлены для классических алгоритмов, в свою очередь кривые LMS OE/EE и RLS OE/EE с

указанием коэффициента прореживания  $\nu$  – для алгоритмов, реализованных на основе гребенчатых фильтров.

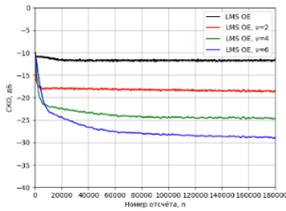


Рисунок 5 – Обучающие кривые алгоритма LMS OE

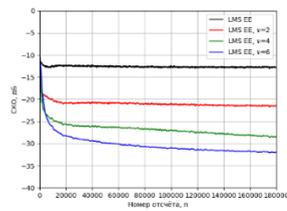


Рисунок 6 – Обучающие кривые алгоритма LMS EE

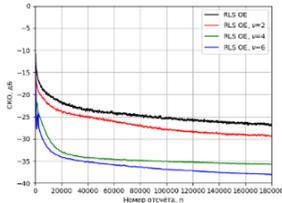


Рисунок 7 – Обучающие кривые алгоритма RLS OE

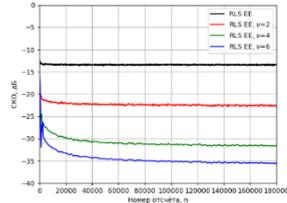


Рисунок 8 – Обучающие кривые алгоритма RLS EE

Обобщённая схема решения задачи прямого моделирования неизвестной узкополосной системы, основанная на перестраиваемом гребенчатом БИХ-фильтре приведена на рисунке 9.

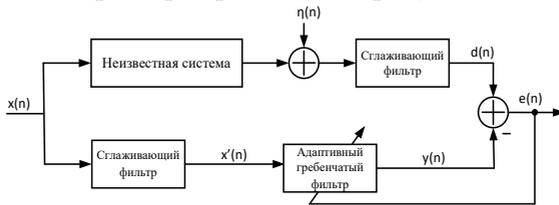


Рисунок 9 – Схема для решения задачи прямого моделирования с использованием адаптивного гребенчатого фильтра

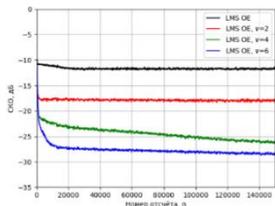


Рисунок 10 – Обучающие кривые алгоритма АЦГФ LMS OE

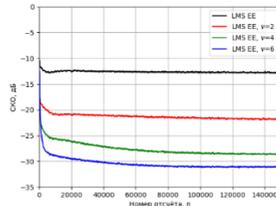


Рисунок 11 – Обучающие кривые алгоритма АЦГФ LMS EE

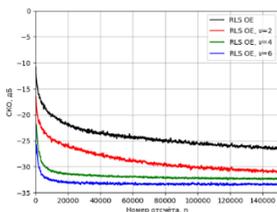


Рисунок 12 – Обучающие кривые алгоритма АЦФ RLS OE

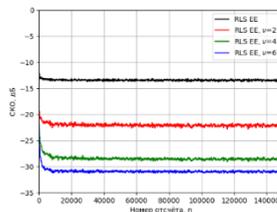


Рисунок 13 – Обучающие кривые алгоритма АЦФ RLS EE

Обучающие кривые, приведённые на рисунках 5-8 и 10-13 показывают, что скорость и точность сходимости предложенных алгоритмов превосходят известные стандартные алгоритмы LMS и RLS. Скорость обучения возрастает до 5 раз, а установившееся значение СКО после обучения уменьшается на величину до 18 дБ.

В диссертации также приведены обобщённые схемы для решения задачи обратного моделирования, задач предсказания сигнала и очистки узкополосного сигнала от широкополосной помехи, а также выравнивания канала. Также проведено имитационное моделирование, построены графики и сделаны выводы по каждому из приведённых алгоритмов.

Проведённое имитационное моделирование показало, что использование многоскоростных адаптивных систем на основе БИХ-фильтров во всех представленных задачах узкополосной адаптивной фильтрации значительно увеличивает точность и скорость сходимости алгоритмов адаптации.

**Четвёртая глава** посвящена описанию реализации разработанной среды математического моделирования и реализации алгоритмов на основе цифрового адаптивного гребенчатого БИХ-фильтра. Описаны преимущества реализации модели на основе инструментов с открытым исходным кодом. Для удобства переносимости между различными платформами, среда моделирования и её окружение были помещены в виртуальный контейнер с использованием Docker.

Приведены рекомендации для реализации алгоритмов, основанных на математике с фиксированной точкой. Математика с фиксированной точкой широко применяется на различных устройствах, таких как программируемые интегральные схемы (ПЛИС), цифровые сигнальные процессоры (ЦСП), графические процессоры (ГП), микроконтроллеры (МК).

Описан подход к реализации алгоритма гребенчатой адаптивной фильтрации на ПЛИС с использованием высокоуровневого синтеза логических схем (HLS).

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы, сделаны выводы.

**В приложениях** приведены исходные тексты компьютерных программ, разработанной среды моделирования, а также копия акта об использовании материалов диссертации.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе выполнения диссертационной работы автором были получены следующие научно-технические результаты:

- 1) проведено исследование устойчивости гребенчатых фильтров в условиях ограничения разрядности представления коэффициентов фильтра, показано, что устойчивость гребенчатого фильтра полностью определена устойчивостью базового низкочастотного фильтра;
- 2) разработаны алгоритмы реализации узкополосных адаптивных фильтров на основе гребенчатого БИХ-фильтра;
- 3) показано, что использование адаптивных гребенчатых БИХ-фильтров позволяет увеличить точность и скорость сходимости известных алгоритмов при решении различных задач узкополосной адаптивной фильтрации;
- 4) разработан программно-аппаратный комплекс для исследования гребенчатых адаптивных и неадаптивных фильтров при решении ряда задач узкополосной фильтрации.

## **СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в ведущих рецензируемых научных изданиях**

1. Витязев В.В., Горюшкин Р.С. Анализ шумов квантования многоскоростных структур узкополосных КИХ-фильтров // Цифровая обработка сигналов. 2015. № 4. С. 35-40.
2. Витязев В.В., Горюшкин Р.С. Анализ устойчивости двухкаскадной реализации узкополосного цифрового фильтра в классе БИХ-цепей // Цифровая обработка сигналов. 2017. № 4. С. 40-45.
3. Vladimir V. Vityazev, Ruslan S. Goriushkin. Analyzing the Two-Stage Structure of Narrowband IIR Filters. Zhurnal Radioelektroniki - Journal of Radio Electronics. 2019. No. 5. DOI 10.30898/1684-1719.2019.5.7.
4. Витязев В.В., Горюшкин Р.С. Анализ применения адаптивных гребенчатый БИХ-фильтров в задаче выделения узкополосного

сигнала на фоне широкополосного шума // Цифровая обработка сигналов. 2021. № 2. С. 42-47.

5. Горюшкин Р.С. Решение задачи прямого моделирования узкополосных систем с использованием адаптивных гребенчатых БИХ-фильтров // Цифровая обработка сигналов. 2021. № 3. С. 54-57.

### **Материалы научно-технических конференций**

1. Витязев В.В., Горюшкин Р.С. Исследование устойчивости цифровых гребенчатых фильтров // Цифровая обработка сигналов и её применение DSPA 2015: Труды 17-й Международной науч.-техн. конф. М., 2015. Т.1. С. 135-138.

2. Витязев В.В., Горюшкин Р.С. Анализ устойчивости цифровых узкополосных БИХ-фильтров, реализованных по двухкаскадной структуре // Цифровая обработка сигналов и её применение DSPA 2018: Труды 20-й Международной науч.-техн. конф. М., 2018. Т. 1. С. 184-189.

3. Горюшкин Р.С., Реализация цифрового БИХ-фильтра на ПЛИС средствами языка Python // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2018 [текст]: сб. тр. междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.3./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2018. – 164 с.,; ил.

4. Витязев В.В., Горюшкин Р.С. Исследование адаптивного гребенчатого БИХ-фильтра // Цифровая обработка сигналов и её применение DSPA 2020: Труды 22-й Международной науч.-техн. конф. М., 2020. С. 89-92.

5. Горюшкин Р.С., Исследование адаптивных гребенчатых БИХ-фильтров в задаче очистки узкополосных сигналов от широкополосного шума // Актуальные вопросы радиотехники и электроники: Труды Всероссийской научно-технической конференции. Тула, 19-20 мая 2021 г. / под общей ред. Е.А. Макарецкого. Тула: Изд-во ТулГУ, 2021. С. 121-126.

6. Горюшкин Р. С., Исследование адаптивного гребенчатого БИХ-фильтра в задаче прямого моделирования узкополосных систем // XXVII всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях (НИТ 2022)», Рязань, 2022. С. 130-131.

**Горюшкин Руслан Сергеевич**

**АЛГОРИТМЫ УЗКОПОЛОСНОЙ  
АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ НА ОСНОВЕ  
АДАПТИВНЫХ ГРЕБЕНЧАТЫХ БИХ-  
ФИЛЬТРОВ**

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Подписано в печать . Формат бумаги 60×84 1/16.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет

имени В.Ф. Уткина.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1