

На правах рукописи



Ляхов Павел Алексеевич

**МЕТОДЫ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ
СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЫЧИСЛЕНИЙ В СИСТЕМЕ ОСТАТОЧНЫХ
КЛАССОВ**

Специальность 2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем,
комплексов и компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Ставрополь, 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет» (г. Ставрополь) на кафедре математического моделирования факультета математики и компьютерных наук имени профессора Н.И. Червякова

Официальные оппоненты:

Соловьёв Роман Александрович

доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заместитель генерального директора по инновационной деятельности, ООО «Альфачип», г. Москва

Рабин Алексей Владимирович

доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», г. Санкт-Петербург

Диченко Сергей Александрович

доктор технических наук, доцент, начальник научно-исследовательского центра, Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная орденов Жукова и Октябрьской революции Краснознаменная академия защиты информации имени генерала армии С.М. Штеменко» Министерства обороны Российской Федерации, г. Краснодар

Ведущая организация:

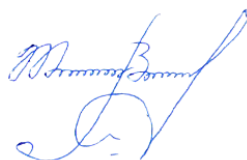
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула

Защита диссертации состоится «22» октября 2026 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.206.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» по адресу: 199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39, каб. 401, e-mail: dc@spcras.ru. Факс: (812) 328-44-50, тел: (812) 508-33-11.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе аспирантуры (каб. 402а) Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», по адресу 199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39, e-mail: dc@spcras.ru и на сайте <https://dc.spcras.ru/>.

Автореферат разослан «11» сентября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.206.01
кандидат технических наук



Абрамов Максим Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные системы цифровой обработки сигналов (ЦОС) требуют больших вычислительных затрат и ресурсов для своего функционирования. Прежде всего это связано с непрерывным улучшением характеристик многомерных сигналов, таких как изображения и видео, включая пространственный размер и цветовую глубину, и существенным повышением их количества. В совокупности это приводит к значительному возрастанию объема цифровой информации, которую нужно регистрировать, обрабатывать, хранить и передавать. В частности, ЦОС использует значительное количество времени и памяти на всех этапах обработки, что особенно критично для систем, работающих в режиме реального времени. При этом обработка сигналов должна быть не только достаточно быстрой, но и максимально качественной. Особенно актуален вопрос совершенствования систем ЦОС на основе искусственного интеллекта (ИИ). В настоящее время в мире происходит ускоренное внедрение технологических решений на основе ИИ в различные отрасли промышленности и сферы общественных отношений. Указанные тенденции обусловлены «сквозным» характером применения прикладных технологических решений и потребностью в обработке больших объемов данных. Однако на практике применение систем ИИ сопряжено с огромными вычислительными затратами как на их обучение, так и на эксплуатацию. Существующие системы ЦОС, в том числе на основе ИИ, не могут удовлетворить потребности в обработке данных, а темпы развития и совершенствования вычислительных средств и их мощности значительно уступают темпам возрастания объема цифровых одномерных и многомерных сигналов и роста вычислительной сложности методов для их обработки, что представляет собой **противоречие в практике**. Таким образом, непрерывно растущая практическая потребность в повышении скорости вычислений делает все более актуальной проблему низкой производительности систем ЦОС. Сложившаяся ситуация побуждает исследователей к активному совершенствованию уже известных и разработке принципиально новых систем обработки сигналов, отвечающих современным требованиям и готовых к применению в различных сферах практической деятельности человека.

Степень разработанности темы. Существует множество перспективных теоретических решений, способных повысить производительность систем ЦОС. В их число входят подходы, основанные на применении приближенных вычислений, учете неявной информационной избыточности, использовании блоков реализации операций с упрощенной структурой и многие другие. Однако, большинство из них используют позиционные системы счисления, унаследованные от процессоров ранних поколений, что существенно ограничивает вычислительные возможности систем на их основе. Приближение к пределу миниатюризации технологических процессов производства вычислительных средств на основе кремниевых технологий требует изменения подходов к организации вычислений, особенно для использования во встраиваемых проблемно-ориентированных процессорах. Важный вклад в развитие высокопроизводительных вычислительных систем с реконфигурируемой архитектурой, обеспечивающих адаптацию аппаратных ресурсов под специфические требования задач цифровой обработки сигналов, внесен работами В. С. Заборовского, И. А. Каляева, И. И. Левина и их научных школ. Среди различных альтернативных числовых систем, расширяющих вычислительные возможности и повышающих производительность систем цифровой обработки данных, особый интерес представляет система остаточных классов (СОК), способная обеспечить распараллеливание вычислений на арифметико-логическом уровне, что особенно эффективно при реализации модульных операций сложения, вычитания и умножения. СОК представляет собой непозиционную систему счисления, основанную на прямой сумме конечных колец, и оперирует с небольшими остатками вместо обработки чисел большой разрядности, что позволяет значительно ускорить вычисления. Как показывают исследования множества отечественных и зарубежных научных коллективов, СОК приобрела широкое распространение при реализации методов ЦОС. Успешность решений в области развития модулярных вычислений и их приложений подтверждается значительным вкладом отечественных и зарубежных исследователей, такими как И. Я. Акушский, В. М. Амербаев, А. Л. Стемповский, Н. И. Червяков, Д. И. Юдицкий, О. А. Финько, А. И. Галушкин, В. А. Торгашев, J. C. Bajard, G. Jaberipur, G. C. Cardarilli, C. H. Chang, A. S. Molahosseini, A. Hiasat, P. V. A. Mohan, H. Nakahara, B. Premkumar, B. Parhami, L. Sousa, H. T. Vergos и другие.

Исходя из данной ситуации сформулирована **цель исследования**, заключающаяся в обеспечении требуемого уровня производительности систем цифровой обработки сигналов при

сохранении требуемых показателей точности и качества восстановления данных за счет разработки научно обоснованных математических моделей, методов и программного обеспечения параллельной обработки данных на основе системы остаточных классов.

Достижение выбранной цели и успешное решение обозначенной проблемы окажут большое влияние на развитие таких направлений, как медицинская диагностика, системы компьютерного зрения, телемедицина, робототехнические комплексы, беспилотный транспорт, спутниковые системы, цифровое сельское хозяйство, многочисленные приложения искусственного интеллекта. Однако, несмотря на высокий потенциал в повышении производительности систем ЦОС, организация обработки данных в СОК накладывает множество ограничений, в том числе на вычислительный диапазон, и снижает эффективность реализации немодульных операций, что значительно усложняет возможность ее широкого практического применения для решения ряда прикладных задач ЦОС. Требуется развитие методологии применения СОК для эффективной по скорости вычислений реализации операций с организацией модулярных вычислений при обработке многомерных сигналов. Помимо этого, необходимо разработать подходы к ЦОС, основанные на комбинированном применении методов организации параллельной обработки данных в СОК и иных решений, сочетающихся с СОК и позволяющих значимо усилить ее преимущества и в значительной степени нивелировать ее недостатки. Таким образом, имеет место следующее **противоречие в науке**: несмотря на наличие развитой теории вычислений в системе остаточных классов, отсутствует методологический аппарат для создания технологии высокопроизводительной цифровой обработки сигналов с вычислениями в системе остаточных классов. Для разрешения данного противоречия обозначена **научная проблема**: необходимость разработки моделей и методов параллельной обработки данных в системе остаточных классов для создания технологии высокопроизводительной цифровой обработки сигналов.

На основании проведенного анализа определены объект и предмет исследования. **Объектом исследования** являются системы цифровой обработки сигналов. В качестве **предмета исследования** выступают методы организации параллельной обработки данных в системах цифровой обработки сигналов. Для решения обозначенной общей научной проблемы проведена ее декомпозиция на ряд частных задач.

1. Аналитический обзор современных проблем и подходов к улучшению эксплуатационных характеристик систем цифровой обработки сигналов.
2. Разработка обобщенной модели усовершенствованной цифровой обработки сигналов в системе остаточных классов.
3. Разработка архитектуры цифрового фильтра для параллельной обработки сигналов в системе остаточных классов.
4. Разработка метода высокоскоростной фильтрации цифровых изображений на основе блочной обработки данных.
5. Разработка методов и архитектур для обработки данных, представленных в системе остаточных классов, при выполнении немодульных операций.
6. Разработка метода и алгоритма вейвлет-обработки сигналов с вычислениями в системе остаточных классов.
7. Разработка технологии создания систем высокопроизводительной цифровой обработки сигналов на основе вычислений в системе остаточных классов.

Методологию исследования составляет системный подход к проектированию и анализу вычислительных систем, принципы математического моделирования процессов цифровой обработки сигналов, а также фундаментальные положения теории чисел, теории алгоритмов, высшей алгебры и теории модулярной арифметики. Концептуальной базой работы служит парадигма распараллеливания вычислений на арифметико-логическом уровне с использованием системы остаточных классов для преодоления структурных ограничений традиционных позиционных архитектур и повышения производительности систем цифровой обработки сигналов.

Методы исследования включают в себя использование математического аппарата теории чисел, теории алгоритмов, теории модулярной арифметики, высшей алгебры, системного анализа, математического моделирования, программного моделирования в среде MATLAB с задействованием модулей Signal Processing Toolbox, Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox, Deep Learning Toolbox, Wavelet Toolbox, системах автоматизированного проектирования (САПР) Xilinx ISE, Xilinx Vivado Design Suite, Yosys, OpenLane и Synopsys

Design Compiler, программном обеспечении для просмотра, анализа и обработки медицинских изображений Weasis Medical Viewer, OnDemand3D Dental, Planmeca Romexis Viewer, eFilm Lite.

Научную новизну составляют следующие основные научные результаты, расширяющие существующий базис теории и практики цифровой обработки сигналов.

1. Разработана обобщенная модель усовершенствованной цифровой обработки сигналов в системе остаточных классов, отличающаяся от известных системным объединением параллельной модулярной арифметики, блочной обработки данных, методов выполнения немодульных операций на основе дробных величин и масштабированием коэффициентов фильтров, обеспечивающая комплексное повышение производительности систем цифровой обработки сигналов.

2. Разработана архитектура цифрового фильтра, отличающаяся от известных параллельной обработкой сигналов в системе остаточных классов с модулями специального вида на упрощенных вычислительных элементах компонент обобщенной модели, обеспечивающая распределенную обработку данных.

3. Предложен метод высокоскоростной вейвлет-фильтрации сигналов, отличающийся от известных блочной обработкой данных с уменьшением количества используемых умножений, обеспечивающий ресурсоэффективную реализацию многоуровневых преобразований.

4. Разработаны методы и архитектуры для реализации немодульных операций в системе остаточных классов, отличающиеся от известных использованием аппарата дробных величин для непосредственного вычисления позиционных характеристик без полного восстановления двоичного кода, обеспечивающие существенное снижение вычислительной сложности по сравнению с известными аналогами.

5. Разработаны метод и алгоритм дискретного вейвлет-преобразования многомерных сигналов, отличающиеся от известных использованием масштабированных коэффициентов и параллельной обработкой в системе остаточных классов, обеспечивающие комплексную реализацию обобщенной модели для задач обработки изображений.

6. Разработана технология создания программно-аппаратных систем цифровой обработки сигналов в системе остаточных классов, отличающаяся от известных использованием комплекса специализированных программных средств для автоматизации преобразования математического описания в аппаратную реализацию, обеспечивающая улучшение технических характеристик разрабатываемых систем.

Практическая и теоретическая значимость. Работа носит теоретический характер. Полученные результаты позволяют создавать программно-аппаратные системы высокопроизводительной цифровой обработки сигналов на основе вычислений в системе остаточных классов. Разработанные в рамках обобщенной модели методы и архитектуры способствуют уменьшению вычислительной сложности цифровой обработки сигналов. Разработанные с использованием оригинальной технологии программные продукты и аппаратные решения, зарегистрированные в соответствующем порядке, способствуют улучшению эксплуатационных характеристик систем цифровой обработки сигналов. Практическая и теоретическая значимость полученных результатов и вклад диссертанта в развитие соответствующей отрасли знаний подтверждаются цитированием опубликованных результатов в международных научных изданиях: 836 ссылок в Web of Science (h -index=13), 1250 ссылок в Scopus (h -index=17).

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Обобщенная модель усовершенствованной цифровой обработки сигналов в системе остаточных классов, обеспечивающая повышение производительности за счет системного объединения параллельной модулярной арифметики, блочной обработки данных, методов выполнения немодульных операций на основе дробных величин и масштабирования коэффициентов фильтров.

2. Архитектура цифрового фильтра в системе остаточных классов с модулями специального вида, реализующая ключевой вычислительный элемент обобщенной модели и обеспечивающая параллельную обработку сигналов.

3. Метод вейвлет-фильтрации сигналов с понижающей дискретизацией на основе блочной обработки данных, являющийся развитием обобщенной модели для ресурсоэффективной реализации многоуровневых преобразований.

4. Методы и архитектуры для реализации немодульных операций в системе остаточных классов на основе аппарата дробных величин для непосредственного вычисления позиционных характеристик без полного восстановления двоичного кода.

5. Метод и алгоритм дискретного вейвлет-преобразования многомерных сигналов с использованием масштабированных коэффициентов и параллельной обработкой в системе остаточных классов, представляющие собой комплексную реализацию обобщенной модели для задач обработки изображений.

6. Технология создания программно-аппаратных систем цифровой обработки сигналов в системе остаточных классов с использованием комплекса специализированных программных средств для автоматизации преобразования математического описания в аппаратную реализацию.

Основные результаты диссертационного исследования были использованы в рамках следующих научно-технических работ:

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

1. «Северо-Кавказский центр математических исследований» (Договоры № 075-02-2021-1749, № 075-02-2022-892, № 075-02-2023-938), 2021-2023.

2. «Разработка математических моделей и методов снижения энергопотребления в системах мобильной связи на основе системы остаточных классов» (Проект № 2.6035.2017/БЧ), 2017-2019.

3. «Проблемы интеграции параллельной компьютерной алгебры и искусственных нейронных сетей в области инфокоммуникационных технологий» (Проект № 2563) 2014-2016.

Российский научный фонд

1. «Перспективные методы интеллектуальной обработки сигналов на основе глубоких нейронных сетей и модулярных вычислений» (Проект № 23-71-10013), 2023-2026.

2. «Аппаратные ускорители для цифровой обработки трехмерных медицинских изображений с использованием масштабированных фильтров и параллельных модулярных вычислений» (Проект № 21-71-00017), 2021-2023.

Российский фонд фундаментальных исследований

1. «Экономичные средства интеллектуального анализа визуальной информации на основе сверточных нейронных сетей» (Проект № 19-07-00130 А), 2019-2021.

2. «Разработка перспективной архитектуры на базе ядра векторного процессора для задач обработки и визуализации сигналов» (Проект № 18-37-20059 мол_а_вед), 2019-2020.

3. «Разработка новых отказоустойчивых мобильных систем связи с низким энергопотреблением на основе интеграции параллельной математики и искусственных нейронных сетей» (Проект № 18-07-00109 А), 2018-2019.

4. «Разработка методов и алгоритмов цифровой фильтрации сигналов в системе остаточных классов с использованием вейвлетов конечного поля» (Проект № 14-07-31004-мол-а), 2014-2015.

5. «Проект организации I-ой международной конференции «Параллельная компьютерная алгебра и её приложения в новых инфокоммуникационных системах» (Проект № 14-07-20389-г), 2014.

6. «Разработка методов и алгоритмов реализации вычислительно сложных процедур цифровой обработки сигналов в системе остаточных классов» (Проект № 13-07-00478-а), 2013-2014.

Совет по грантам Президента Российской Федерации

1. «Высокопроизводительные устройства цифровой обработки медицинских изображений на основе параллельной математики» (Проект № МК-3918.2021.1.6), 2021-2022.

2. «Разработка методов интеллектуального анализа изображений с вычислениями в конечных алгебраических структурах» (Проект № СП-2245.2018.5), 2018-2020.

3. «Разработка устройств цифровой обработки изображений с низким энергопотреблением на основе системы остаточных классов» (Проект № МК-5980.2016.9), 2016-2017.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов подтверждена корректным и обоснованным применением классических методов исследования, строгими математическими доказательствами и результатами анализа эффективности разработанных методов на базе вычислительных платформ FPGA и ASIC в САПР Xilinx ISE, Xilinx Vivado Design Suite, Yosys, OpenLane и Synopsys Design Compiler. Результаты согласуются с проведенными экспериментами.

Моделирование и вычислительные эксперименты проведены с использованием программных пакетов и САПР: MATLAB версий R2016a-R2022b с задействованием модулей Signal Processing Toolbox, Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox, Deep Learning

Toolbox, Wavelet Toolbox; Xilinx ISE версии 14.7; Xilinx Vivado Design Suite версий 2016.3-2019.2; Yosys версии 0.25; OpenLane; Synopsys Design Compiler; Adobe Photoshop CS6. Для анализа трехмерных медицинских томографических изображений также использованы программы: Weasis Medical Viewer; OnDemand3D Dental; Planmeca Romexis Viewer; eFilm Lite.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Тема и основные результаты диссертации соответствуют следующим областям исследований паспорта специальности 2.3.5 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей»:

1 – «Модели, методы и алгоритмы проектирования, анализа, трансформации, верификации и тестирования программ и программных систем», а именно разработаны методы проектирования программных систем ЦОС для реализации высокопроизводительной фильтрации сигналов на основе блочной обработки данных, анализа вычислительной погрешности методов ЦОС с целью достижения баланса между качественными и эксплуатационными показателями проектируемых систем, масштабирования коэффициентов используемых фильтров, выбора наборов модулей СОК специального вида при организации параллельных модулярных вычислений, оценки ресурсозатрат на реализацию систем ЦОС с обработкой данных в СОК на основе unit-gate модели;

7 – «Модели, методы, архитектуры, алгоритмы, форматы, протоколы и программные средства человеко-машинных интерфейсов, компьютерной графики, визуализации, обработки изображений и видеоданных, систем виртуальной реальности, многомодального взаимодействия в социкиберфизических системах», а именно разработаны обобщенная модель усовершенствованной цифровой обработки сигналов в СОК и архитектура цифрового фильтра для параллельной обработки сигналов в СОК, разработаны методы и архитектуры для эффективной по ресурсозатратам реализации немодульных операций в СОК, разработаны методы высокопроизводительной цифровой фильтрации одномерных и многомерных сигналов на основе дискретного вейвлет-преобразования с реализацией сверточных вычислений блочной обработкой данных, использованием модулярных вычислений и коэффициентов фильтров, масштабированных в соответствии с результатами анализа вычислительной погрешности методов ЦОС;

8 – «Модели и методы создания программ и программных систем для параллельной и распределенной обработки данных, языки и инструментальные средства параллельного программирования», а именно разработана технология создания программно-аппаратных систем для высокопроизводительной ЦОС с параллельной реализацией модулярных вычислений и использованием нейросетевой обработки данных.

Апробация работы. Выносимые на защиту результаты диссертационного исследования прошли апробацию на научных мероприятиях в России и за рубежом. Наиболее значимые из них представлены далее.

1. International Conference Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS), Petrozavodsk, Russia, 2022.
2. International Conference on Mathematics and its Applications in new Computer Systems, Stavropol, Russia, 2021.
3. International Conference on Actual Problems of Applied Mathematics and Computer Science, Stavropol, Russia, 2022.
4. 23rd Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Bologna, Italy, 2018.
5. XV International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY), Saint Petersburg, Russia, 2016.
6. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Omsk, Russia, 2015.
7. International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT), Dolgoprudny, Russia, 2014.
8. Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Budva, Montenegro 2019, 2020, 2021, 2022.
9. Third International Conference on Digital Information Processing, Data Mining, and Wireless Communications (DIPDMWC), Moscow, Russia, 2016.
10. International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Novosibirsk, Russia, 2017.
11. 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Budapest, Hungary, 2019.

12. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Saint Petersburg, Russia, 2019, 2020, 2023.

13. IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Baltimore, USA, 2017.

Публикации. По теме диссертации автором было опубликовано 129 работ, в том числе 3 монографии [1-3], 28 статей в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук [4-31], 31 статья в журналах, индексируемых в международных базах Scopus и/или Web of Science [32-62], 50 работ – в сборниках трудов российских и международных конференций [80-129], получено 5 патентов на изобретения [63-67] и 12 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ [68-79].

Личный вклад автора. Диссертационная работа представляет собой многолетнее исследование автора, объединенное тематикой и методами исследования. Все выносимые на защиту результаты получены лично автором. Из совместных работ в диссертацию включены только те результаты, которые принадлежат непосредственно автору. В опубликованных совместных работах постановка и решение задач осуществлялись совместными усилиями соавторов при непосредственном участии соискателя. Автором написана часть 3 монографии [1], содержащая главы 6 и 7, и раздел IV монографии [2], содержащий главы 11 и 12, посвященные применению модулярных вычислений в цифровой обработке сигналов. В коллективной монографии [3] автором написана глава 9, посвященная цифровой обработке изображений на основе системы остаточных классов. В статьях [7, 12, 17, 25-28, 50-53] автором разработаны обобщенная модель усовершенствованной цифровой обработки сигналов в системе остаточных классов и архитектура цифрового фильтра для параллельной обработки сигналов в системе остаточных классов. В статьях [10, 54-56, 60, 62] автором предложен метод цифровой фильтрации на основе блочной обработки данных. В статьях [5, 8, 15, 18, 20, 22-24, 30, 32-34, 38, 40, 42, 46, 49, 58, 59] автором разработаны методы и архитектуры для реализации немодульных операций в системе остаточных классов на основе дробных величин. В статьях [4, 6, 11, 13, 14, 19, 21, 35, 36, 43, 45, 48, 57] автором предложены метод и алгоритм организации дискретного вейвлет-преобразования изображений с параллельной обработкой в системе остаточных классов и масштабированными коэффициентами. В статьях [16, 37, 39, 41, 44, 47, 61] автором проведены программно-аппаратные реализации нейронных сетей на основе вычислений в системе остаточных классов.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, перечня используемых сокращений, списка литературы с 427 источниками и 3 приложений с патентами, свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ и актами о внедрении результатов диссертационной работы. Общий объем основного текста работы – 433 страницы, включая 54 таблицы и 116 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен обзор актуальных проблем и подходов к улучшению эксплуатационных характеристик систем ЦОС. Современные вычислительные средства работают с большими массивами данных, что способствует увеличению требований в эффективности обработки информации по показателям скорости вычислений, площади и энергопотреблению разрабатываемых систем. Имеющиеся вычислительные методы обеспечивают высокую точность обработки цифровых данных, однако при этом требуют использования мощных вычислительных платформ с высокими ресурсозатратами в процессе эксплуатации. Таким образом, требуется повышение производительности систем для эффективной по ресурсозатратам ЦОС, способных отвечать современным требованиям. Поставленная цель будет достигнута за счет разработки методов на основе оригинальных решений, улучшающих эксплуатационные характеристики систем ЦОС.

Анализ современных трендов по улучшению эксплуатационных характеристик систем ЦОС позволил составить и структурировать набор наиболее актуальных и перспективных подходов. В рамках главы проанализировано текущее состояние исследований по применению различных вычислительных методов и структурных решений, наиболее широко освещаемыми и часто используемыми из которых являются: использование приближенных вычислений; модификация вычислительных блоков; реализация свертки в форме блочной обработки методом Винограда; использование альтернативных систем счисления; проектирование аппаратных

ускорителей на основе программируемых пользователем вентильных матриц (ППВМ, FPGA) и интегральных схем специального назначения (ИССН, ASIC) в САПР. В качестве одного из наиболее перспективных подходов к повышению производительности систем ЦОС выделена СОК, позволяющая улучшить эксплуатационные характеристики средств вычислительной техники за счет встроенного параллелизма при реализации операций с использованием величин малой разрядности. Отмечена необходимость в развитии методологии СОК для эффективной по ресурсозатратам реализации методов ЦОС на современных средствах вычислительной техники и разработке подходов на основе комбинированного применения методов организации параллельной обработки данных в СОК и иных решений, сочетающихся с СОК и позволяющих значительно усилить ее преимущества и в значительной степени нивелировать ее недостатки. Исходя из этого, обозначена научная проблема диссертационного исследования, заключающаяся в необходимости разработки методов параллельной обработки данных в СОК для создания технологии высокопроизводительной ЦОС.

Во второй главе разработан подход к организации параллельной обработки данных в СОК при цифровой фильтрации сигналов, основанный на математическом описании ЦФ в СОК, как на уровне структурной организации вычислительных блоков, так и на уровне побитового выполнения операций в этих блоках. Представленная обобщенная модель усовершенствованной цифровой обработки сигналов и архитектура организации параллельной обработки данных подвергнуты теоретическому анализу эксплуатационных характеристик при реализации на современных средствах вычислительной техники с использованием unit-gate модели (UGM), позволяющей оценить параметры системы ЦОС, спроектированной в САПР на базе платформ ППВМ или ИССН. Основные результаты главы представлены далее.

Выявлено, что наиболее экономными по совокупности ресурсозатрат на реализацию модулярных вычислений являются модули СОК специального вида: 2^k и $2^k - 1$. Задержка сумматоров и умножителей при реализации вычислений по данным модулям аналогична задержке соответствующих блоков при реализации вычислений в позиционной системе счисления (ПСС) с k -битным диапазоном. Аппаратные затраты на операции сложения и умножения по модулям вида $2^k - 1$ незначительно превышают аппаратные затраты на выполнение этих операций в ПСС с k -битным диапазоном. Использование других модулей СОК повышает порядок сложности затрат на реализацию вычислений при ЦОС.

Выявлено, что при реализации ЦФ вместо блоков умножения с накоплением (MAC-блоки) могут использоваться усеченные MAC-блоки (ТМАС-блоки), также использующие сумматоры с сохранением переноса (CSA), но позволяющие использовать только один параллельно-префиксный сумматор Когге-Стоуна (KSA) в ЦФ за счет небольшого увеличения деревьев CSA и сократить время выполнения фильтрации от 22% до 29% по сравнению с известной реализацией ЦФ в MAC-блоках, в том числе использующих сумматоры с распространением переносов (CRA). Структура MAC- и ТМАС-блоков представлена на рисунке 1, где: b_i – коэффициенты фильтра порядка K ; $X(N)$ – отсчеты исходного сигнала; A_i и B_i – выходы дерева сумматоров с соответствующего блока; $Y(N)$ – отсчеты обработанного сигнала.

Разработаны обобщенная модель усовершенствованной цифровой обработки сигналов в СОК и архитектура (рисунки 2 и 3) цифрового фильтра с организацией параллельной обработки сигналов в СОК с модулями специального вида $\{2^{k_1}, 2^{k_2} - 1, 2^{k_3} - 1, \dots, 2^{k_n} - 1\}$, учитывающая все налагаемые на вычислительный диапазон ограничения и реализующая многоканальную обработку данных через КИХ-МЦФ по каждому модулю системы (формула 1).

Теоретический анализ ресурсозатрат на реализацию цифровой фильтрации сигналов в ПСС и СОК, согласно разработанным модели и архитектуре, показал превосходство модулярных вычислений как по задержке, сократив ее от 1,3 до 2,6 раз, так и по аппаратным ресурсозатратам системы ЦОС, уменьшив их в 1,7-4,8 раза. При этом отмечено, что большее количество модулей СОК обеспечивает большее преимущество по эксплуатационным характеристикам системы ЦОС. С ростом разрядности обрабатываемых данных преимущества в скорости фильтрации в СОК несколько ослабевают, а преимущества в экономии аппаратных средств наоборот, усиливаются. Рост порядка ЦФ несколько увеличивает преимущества в скорости фильтрации и в экономии аппаратных ресурсов при использовании модулярных вычислений.

$$\left\{ \begin{aligned} &\{m_1, m_2, \dots, m_n\} = \{2^{k_1}, 2^{k_2} - 1, 2^{k_3} - 1, \dots, 2^{k_n} - 1\}, \\ &GCD(m_i, m_j) = 1, 2 \leq i < j \leq n, \\ &\prod_{i=1}^n m_i \geq \max(X) \cdot \max(|b|) \cdot (K+1) \cdot 2, \\ &|A_0 \cdot 2 + B_0|_{m_i} = |X(N) \cdot b_0|_{m_i}, \\ &|A_j \cdot 2 + B_j|_{m_i} = |X(N-j) \cdot b_j + A_{j-1} + B_{j-1}|_{m_i}, 1 \leq j \leq K, \\ &|Y(N)|_{m_i} = |A_K \cdot 2 + B_K|_{m_i}. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Проанализированы ресурсозатраты на реализацию КИХ-МЦФ, построенного на основе СОК со сбалансированным набором модулей $\{2^k - 1, 2^k, 2^k + 1\}$ и использующего специализированные вычислительные блоки, адаптированные под модули вида $2^k + 1$. Теоретический анализ технических характеристик КИХ-МЦФ на основе UGM продемонстрировал снижение аппаратных затрат от 2% до 10,3%, но вместе с тем повысил задержку вычислений от 8,3% до 53,3% в зависимости от порядка фильтра и разновидности блоков суммирования.

Разработанные обобщенная модель усовершенствованной цифровой обработки сигналов в СОК и архитектура цифрового фильтра для параллельной обработки сигналов в СОК с модулями специального вида могут найти применение в различных приложениях обработки цифровых данных, активно использующих операцию цифровой фильтрации, на которой основывается множество методов ЦОС и ЦОИ для решения широкого круга задач, в частности, шумоподавления, восстановления, сжатия, слияния и интеллектуальной обработки данных. Снижение ресурсозатрат на выполнение цифровой фильтрации позволит расширить применение СОК для повышения производительности вычислений в современных системах цифровой обработки одномерных и многомерных сигналов.

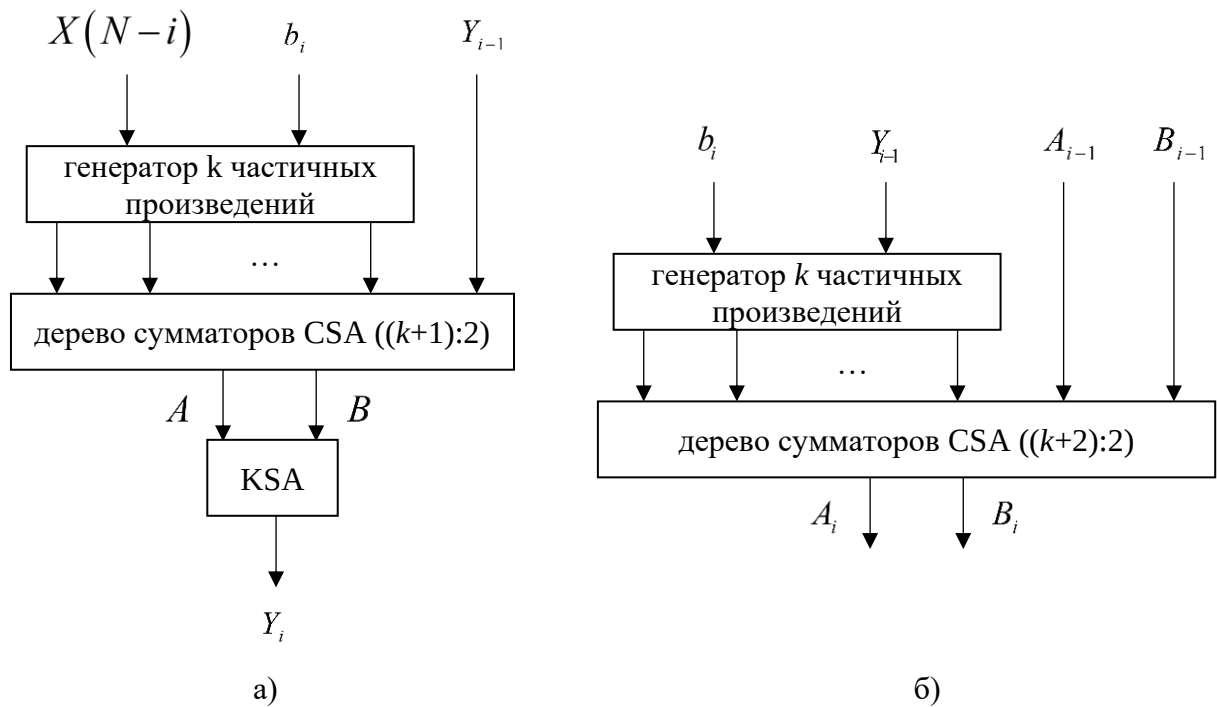
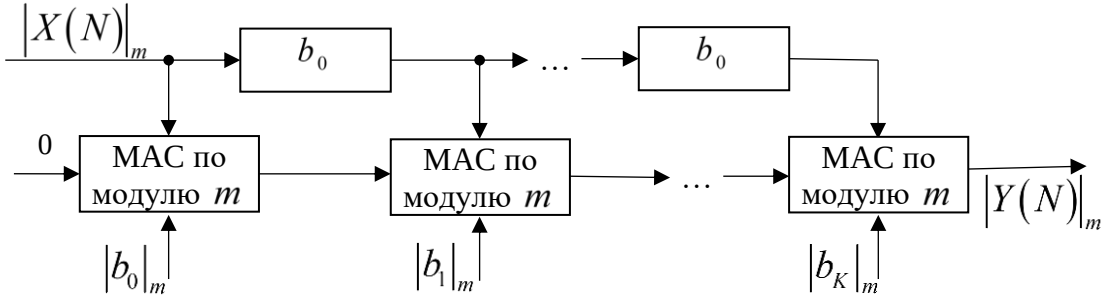
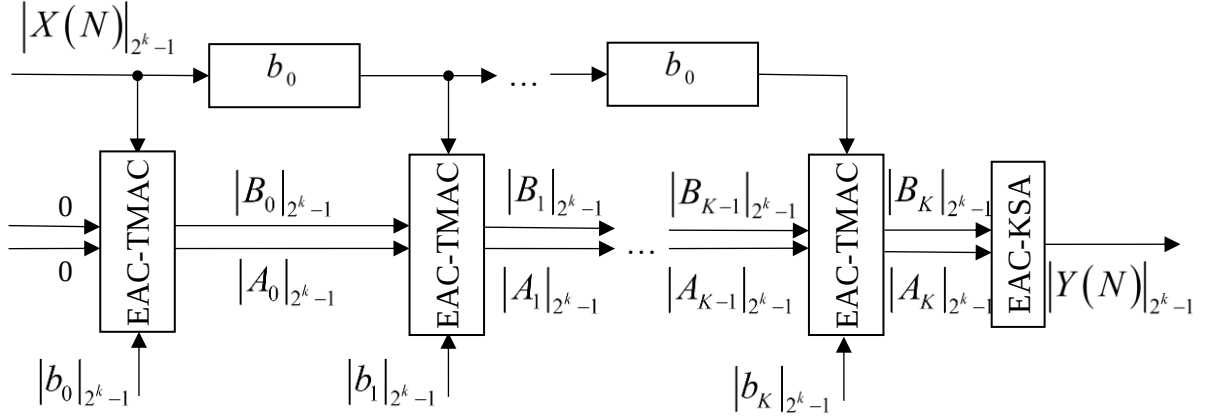


Рисунок 1 – Архитектуры блока умножения с накоплением (а) и усеченного блока умножения с накоплением (б)

Рисунок 2 – Архитектура цифрового фильтра порядка K по модулю m Рисунок 3 – Архитектура цифрового фильтра порядка K по модулю $2^k - 1$

Третья глава посвящена повышению производительности систем, реализующих различные методы цифровой фильтрации сигналов, за счет блочной обработки данных с понижением избыточности вычислений и сокращением количества используемых операций. Производительность системы ЦОС повышается за счет эффективного распараллеливания вычислений с получением нескольких значений отсчетов двумерных сигналов на выходе каждого вычислительного канала за одну итерацию. Теоретическая оценка эксплуатационных характеристик реализации разработанных подходов на основе UGM продемонстрировала значительное повышение скорости вычислений и производительности средств вычислительной техники на базе платформы ППВМ. Основные результаты главы представлены далее.

Проанализированы подходы к организации блочной обработки данных методом Винограда (МВ) для повышения скорости работы методов цифровой фильтрации одномерных и многомерных сигналов при их реализации на современных средствах вычислительной техники. МВ использует вспомогательные матрицы преобразования для организации блочной обработки данных, вид которой зависит от параметров обрабатываемого сигнала, цифровых фильтров и точек многочлена Лагранжа, применяемых для составления матрицы Вандермонда. Выбраны наиболее эффективные с точки зрения вычислительной сложности наборы точек, используемые далее для оценки эксплуатационных характеристик систем ЦОС.

Предложена методика для оценки эксплуатационных характеристик системы ЦОС, реализующей блочную обработку данных с использованием МВ. Рассмотрены различные параметры МВ и рассчитано количество используемых операций сложения и умножения на основе численных значений коэффициентов вспомогательных матриц преобразования, составление которых выполняется априори и не требует затрат в процессе эксплуатации устройства, реализующего методы обработки сигналов на основе МВ. Результаты оценки на основе предложенной методики с использованием UGM показали, что организация блочной обработки данных МВ снижает вычислительную сложность цифровой фильтрации изображений до 84% при неизменном качестве обработки данных.

Разработан подход к реализации вейвлет-фильтрации двумерных сигналов, осуществляемой по формуле (2), на основе блочной обработки данных, представленной в формуле (3).

$$I(x, y) = \sum_{i=1}^r I(x-i, y) \cdot r_i, \quad I^n(x, y) = \sum_{i=1}^r I^n(x, y-i) \cdot r_i, \quad (2)$$

где $I(x, y)$ – пиксели исходного двумерного изображения; $R = (r_1, r_2, r_3, \dots, r_{r-1}, r_r)$ – одномерный вейвлет-фильтр (ВФ) порядка r .

$$M = A^T ((GR) \square (B^T N)), \quad (3)$$

где: M – фрагмент обработанного изображения размером $m \times 1$; R – ВФ размера $r \times 1$; N – исходный фрагмент изображения размером $n \times 1$ ($n = m + r - 1$); A^T , G , B^T – матрицы преобразования размеров $m \times n$, $n \times r$, $n \times n$, соответственно; $\square$ – оператор поэлементного матричного умножения. В случае одномерной фильтрации МВ обозначается как $F(m, r)$ и содержит размер m фрагментов обработанного изображения и порядок r используемого вейвлета. Вейвлет-обработка реализована параллельно по 2 вычислительных каналам с применением составленных вспомогательных матриц преобразования. Количество используемых операций умножений значительно снижено благодаря возможности априорной организации через масштабирование и сложение, обладающие значительно меньшей вычислительной сложностью. Предложенный подход сократил вычислительную сложность цифровой фильтрации двумерного сигнала до 72,9%. Оценка эксплуатационных характеристик системы ЦОС на основе UGM при использовании предложенного подхода продемонстрировала повышение скорости вычислений до 73,62% (рисунок 4) и уменьшение аппаратных затрат до 34,03% (рисунок 5) за счет понижения количества используемых операций умножения.

Разработан метод организации блочной обработки данных при одномерной цифровой фильтрации двумерных сигналов с понижающей дискретизацией, заключающийся в выполнении следующей последовательности действий. Исходя из параметров исходного сигнала и используемого банка фильтров выбирается определенное количество значений точек $s_0, s_1, \dots, s_{n-2}, s_{n-1}$, на основе которых составляются интерполяционный многочлен Лагранжа L и соответствующая ему матрица Вандермонда V . Далее составляются вспомогательные матрицы преобразования A^T, G, B^T . После чего в зависимости от исходных данных МВ $F(m, r, d)$ блочная обработка данных по формуле (3) организуется с использованием комбинации МВ в виде одной из следующих формул.

$$F(m, r, d) = s_2 \cdot F(m, s_1 + 1) + (d - s_2) \cdot F(m, s_1), \quad (4)$$

$$F(m, r, d) = d \cdot F(m, s_1), \quad (5)$$

где: d – шаг свертки; s_1 и s_2 – неполное частное и остаток от деления r на d , соответственно. Формула (4) принимает вид (5), когда d делит r .

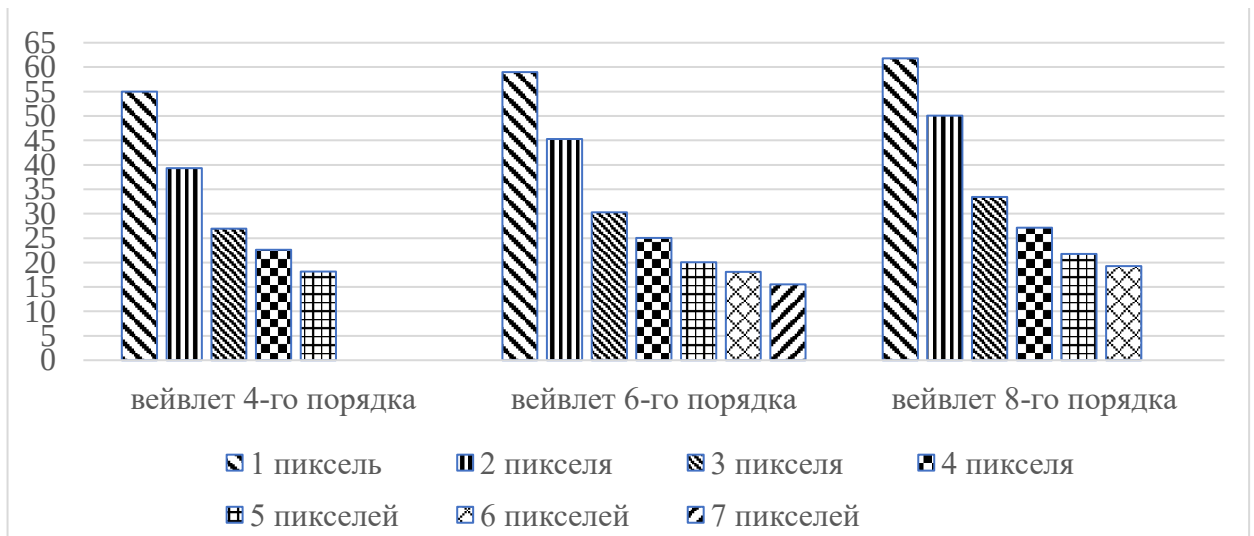


Рисунок 4 – Теоретическая оценка задержки вычислений (у.е.) при вейвлет-фильтрации двумерных 8-битных изображений с использованием блочной обработки данных

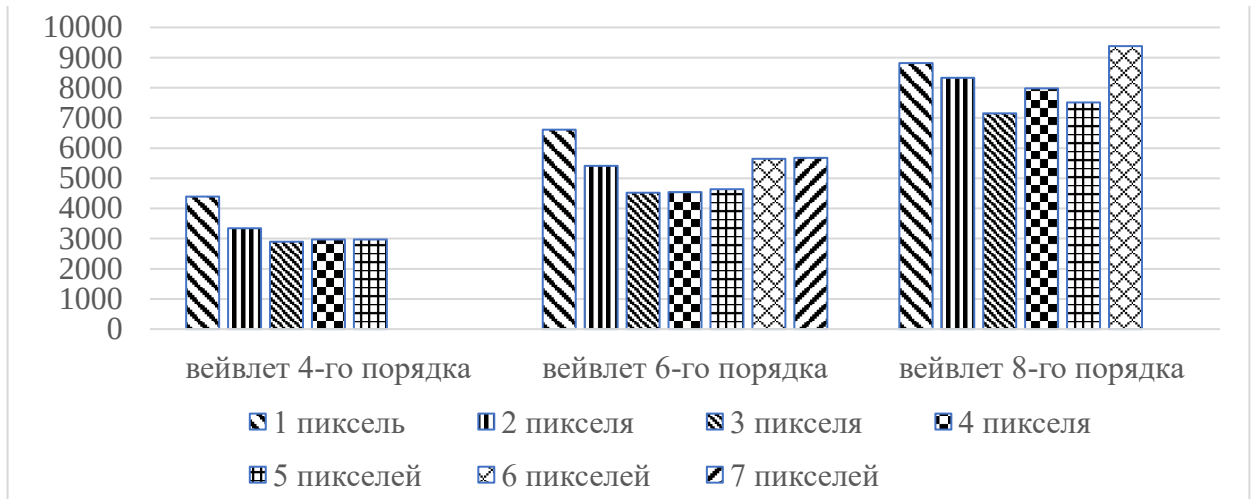


Рисунок 5 – Теоретическая оценка аппаратных затрат (у.е.) при вейвлет-фильтрации двумерных 8-битных изображений с использованием блочной обработки данных

Разработанный метод организации блочной обработки данных при одномерной цифровой фильтрации сигналов может найти применение в различных приложениях обработки цифровых данных, реализующих вычисления в формате с фиксированной запятой. Данный метод позволяет учесть информационную избыточность, возникающую вследствие использования ЦФ с заранее определенными коэффициентами, и повысить скорость выполнения методов цифровой обработки одномерных и многомерных сигналов за счет сокращения количества вычислительно сложных операций умножения, повсеместно используемых в современных системах ЦОС и ЦОИ.

В четвертой главе представлены оригинальные методы и архитектуры для реализации немодульных операций в СОК. Предложены подходы к эффективной по ресурсозатратам аппаратной реализации операций обратного преобразования, определения знака числа, сравнения чисел, а также обнаружения, локализации и исправления ошибок в модулярном коде. Основные результаты главы представлены далее.

Разработана модифицированная версия Китайской теоремы об остатках (КТО) для выполнения преобразования остатков в двоичный код. В СОК с модулями $\{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ число X представляется в виде $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, где $x_i \equiv |X|_{m_i}$. При этом обратное преобразование выполняется по формуле

$$X = \left| \sum_{i=1}^n \left(|M_i^{-1}|_{m_i} M_i \right) x_i \right|_M, \quad (6)$$

где $M_i = M/m_i$, а выражение $|M_i^{-1}|_{m_i}$ означает обратный элемент для M_i в мультипликативной группе кольца вычетов по модулю m_i . Аппаратная реализация операции по формуле (6) является вычислительно сложной, в связи с чем основной целью большинства исследований обратного преобразования является максимальное упрощение данной операции. Одним из самых эффективных подходов является модификация традиционной КТО, заключающаяся в аппроксимации относительного положения чисел на числовой прямой. Этот подход получил название КТО с дробными величинами (КТОд). В основе КТОд лежит идея упрощения вычислений за счет изменения выражения (6) для выявления положения этого числа. Для этого поделим обозначенное выражение на некоторое число M :

$$\frac{X}{M} = \left| \sum_{i=1}^n x_i \frac{|M_i^{-1}|_{m_i} M_i}{M} \right|_1 = \left| \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i \right|_1, \quad (7)$$

где $|\cdot|_1$ представляет собой операцию нахождения остатка, и

$$\alpha_i = \frac{|M_i^{-1}|_{m_i} M_i}{M}. \quad (8)$$

В этом случае формула (7) преобразуется к виду

$$\frac{X}{M} = \left| \sum_{i=1}^n x_i \alpha_i \right|_1. \quad (9)$$

Данное выражение можно записать в виде

$$X = \frac{X'M}{2^K}, \text{ где } X' = \left\lfloor 2^K \frac{X}{M} \right\rfloor = \left| \sum_{i=1}^n x_i \alpha'_i \right|_{2^N}. \quad (10)$$

Данный подход (рисунок 6а) позволяет избежать операции вычисления остатка от деления на модуль M , тем самым уменьшая ресурсозатраты при аппаратной реализации модулярных вычислений. Предложенные метод и архитектура существенно проясняют требуемое количество двоичных значений аналогичным избыточные оценкам, что позволяет вычислить с минимальным требуемым количеством обрабатываемых бит. Результаты предварительного моделирования указывают на сокращение ресурсозатрат при реализации рассматриваемой операции для ЦОС.

Разработан метод определения знака числа в СОК, также основанный на применении дробных величин, представимый в виде следующей последовательностью действий.

1. Для СОК с модулями $\{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ предварительно вычисляются константы $M = m_1 m_2 \dots m_n$, $\mu = -n + \sum_{i=1}^n m_i$, $N = \lceil \log_2(M\mu) \rceil$ и $\alpha_i = \left(\left| M_i^{-1} \right|_{m_i} M_i \right) / M$.

2. Для констант k_i , определенных в пункте 1, определяются дробные величины $\left[F(\alpha_i) \right]_{2^{-\tilde{N}}}$ и $\left[F(\alpha_i) \right]_{2^{-N}}$, где $F(\alpha_i)$ – бесконечная дробь в двоичной системе счисления, равная α_i , и $\tilde{N} < N$.

3. С целью выявления знака исходного числа рассчитывается значение величины $\left[F(X/M) \right]_{2^{-\tilde{N}}} = \left| \sum_{i=1}^n x_i \left[F(\alpha_i) \right]_{2^{-\tilde{N}}} \right|_1$.

4. Из условия $0 < \left[F\left(\frac{X}{M}\right) \right]_{2^{-\tilde{N}}} < \frac{1}{2} - 2^{-\tilde{N}} \mu$ следует, что исходное число больше нуля. Из условия $\frac{1}{2} < \left[F\left(\frac{X}{M}\right) \right]_{2^{-\tilde{N}}} < 1 - 2^{-\tilde{N}} \mu$ следует, что оно меньше нуля.

5. Если ни одно из условий пункта 4 не выполнено, то число X попало в одну из зон неопределенности, поэтому требуется уточняющая итерация. Вычисляется $\left[F(X/M) \right]_{2^{-N}} = \left| \sum_{i=1}^n x_i \left[F(\alpha_i) \right]_{2^{-N}} \right|_1$.

6. Если $0 < \left[F(X/M) \right]_{2^{-N}} < 0,5$, то число X положительное. Если $0,5 < \left[F(X/M) \right]_{2^{-N}} < 1$, то число X отрицательное.

Предложенный выбор точности при вычислении грубой оценки знака позволяет снизить количество обрабатываемых разрядов до величины примерно пропорциональной логарифму диапазона СОК, в то время как лучшие из известных методов имеют время выполнения, линейно зависящее от диапазона. Расчеты показали превосходство по скорости вычислений предложенного метода на основе КТОд над известными аналогами на основе КТО и обобщенной ПСС (ОПСС). Данное обстоятельство имеет место для СОК с произвольным заданным набором модулей. В случае задания СОК со специальным подбором модулей вида $2^k \pm 1$ возможно создание более быстрых узкоспециализированных решений для определения знака числа. Разработанный метод является универсальным и не привязан к какому-либо набору модулей.

Для решения задачи сравнения чисел в СОК разработаны метод и архитектура (рисунок 6б) с использованием дробных величин, в соответствии с которыми для сравнения двух чисел X и Y в модулярном коде необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Установить, какие знаки имеют исходные числа.
2. В случае, когда оба числа являются беззнаковыми, если их разность больше нуля, то уменьшаемое число превосходит вычитаемое.
3. В случае, когда оба числа имеют одинаковый знак, выполняется вычисление $|X/M - Y/M|_1$.

4. В случае, когда числа имеют противоположные знаки, первое число больше, если выполняется условие $0 \leq |X/M - Y/M|_1 < 0,5$, и второе число больше, если выполняется условие $0,5 \leq |X/M - Y/M|_1 < 1$.

Данный метод позволяет сократить количество используемых операций при реализации параллельной обработки данных в модулярном коде, что указывает на возможность значимого снижения ресурсозатрат при реализации рассматриваемой немодульной операции с использованием различных наборов модулей СОК на базе платформ ППВМ и ИССН при решении различных задач ЦОС.

Для решения задач обнаружения, локализации и исправления ошибочного разряда предложены метод и архитектура, последовательность действий при реализации которых способна оптимизировать обработку данных в модулярном коде при локализации ошибочного разряда с помощью дробных величин. Благодаря применению КТОд удастся заменить сложные операторы преобразования чисел из СОК в ОПСС более простыми операциями сложения, что приводит к значительному снижению ресурсозатрат на обработку цифровых данных, а также к перспективному повышению производительности вычислений при реализации предложенных структур на базе платформ ППВМ и ИССН.

Разработанные методы и архитектуры для реализации немодульных операций в СОК могут найти применение в различных приложениях обработки цифровых данных, активно использующих не только модульные, но и большое количество немодульных операций, а именно обратное преобразование чисел, сравнение, определения знака и коррекции ошибок в модулярном коде. Снижение ресурсозатрат на выполнение данных операций позволит расширить применение СОК для повышения скорости вычислений на практике, в частности для решения широкого круга задач в различных приложениях ЦОС и ЦОИ.

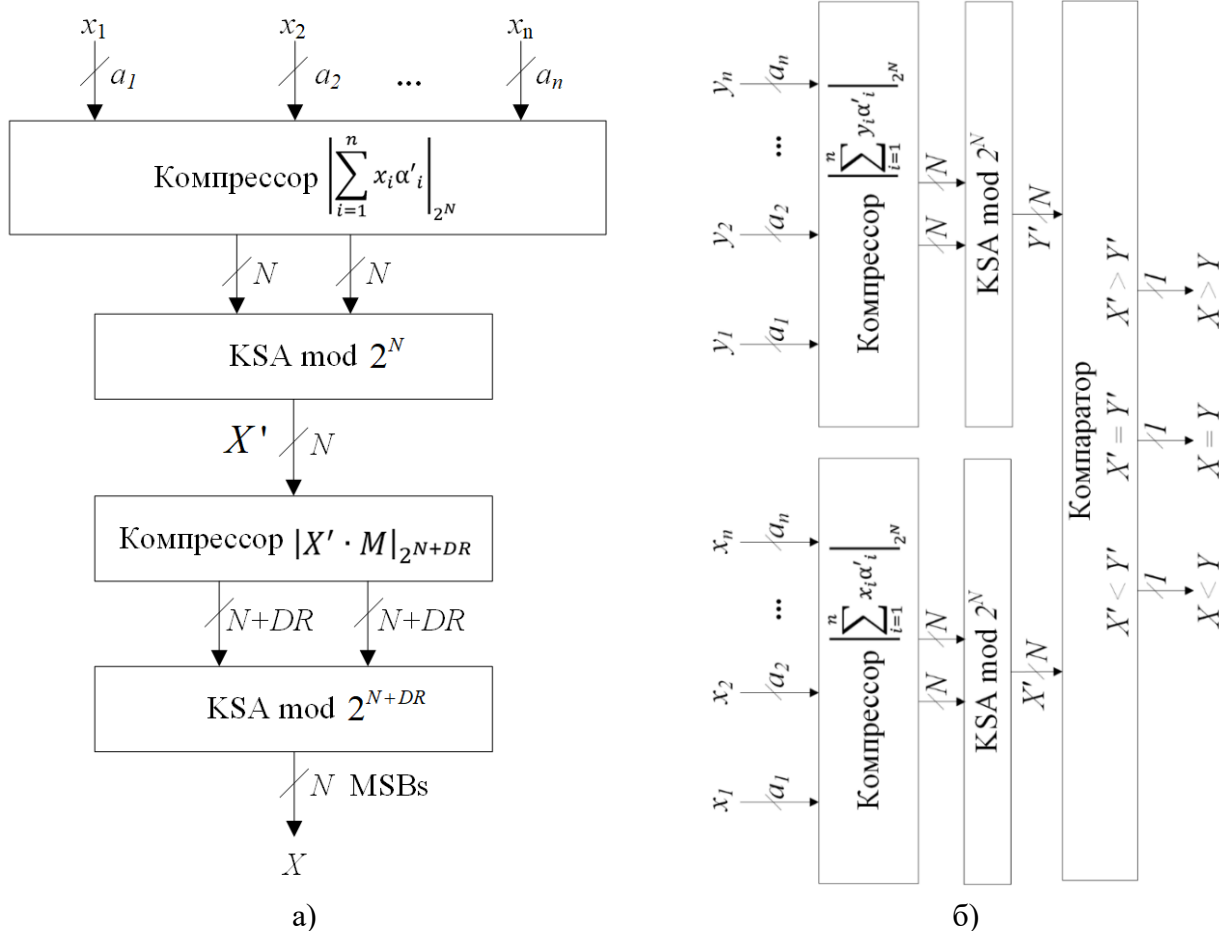


Рисунок 6 – Архитектуры для реализации немодульных операций в системе остаточных классов на основе дробных величин: а) архитектура для обратного преобразования чисел из системы остаточных классов в позиционную систему счисления; б) архитектура для сравнения двух чисел

В пятой главе разработаны метод и алгоритм пространственной вейвлет-фильтрации многомерных сигналов в СОК, а также представлены результаты их программной реализации на примере обработки трехмерных медицинских томограмм. Предложенные подходы основаны на параллельной организации вычислений по нескольким каналам в модульном коде, анализе погрешности вычислений при обработке многомерных сигналов и использовании масштабированных коэффициентов вейвлет-фильтров. Представленные подходы имеют глубокую математическую проработку, которая в совокупности с результатами программного моделирования позволяет утверждать, что использование предложенных разработок позволяет снизить вычислительную сложность пространственной вейвлет-фильтрации и повысить скорость вычислений при реализации методов ЦОС на современных средствах вычислительной техники. Основные результаты главы представлены далее.

Рассмотрены подходы к цифровой фильтрации двумерных сигналов с параллельной организацией вычислений в СОК с использованием масштабированных коэффициентов ЦФ для уменьшения вычислительной сложности и снижения задержки методов цифровой фильтрации многомерных сигналов, в частности двумерных изображений (рисунок 7). Установлено, что реализация цифровой фильтрации сигналов в формате с фиксированной точкой открывает возможность проектирования высокопроизводительных аппаратных структур на базе современных платформ ППВМ и ИССН. Параметр масштабирования множитель позволяет значительно упростить и ускорить операции с его использованием при сохранении высокого качества обработки сигналов в терминах пикового отношения сигнала к шуму (ПОСШ, PSNR).

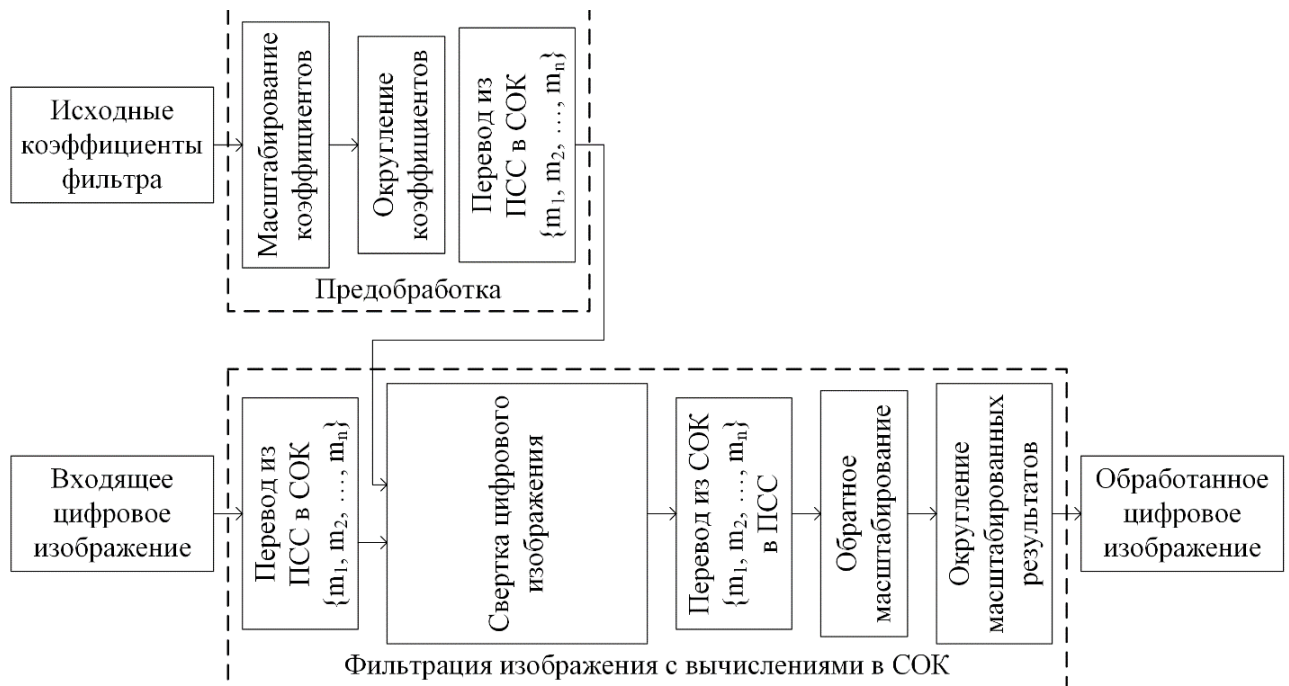


Рисунок 7 – Схема пространственной фильтрации изображения в системе остаточных классов

Предложен алгоритм масштабирования коэффициентов ВФ для обработки многомерных сигналов в СОК (рисунок 8), учитывающий накопительную погрешность многократной последовательной свертки с анализирующими и синтезирующими ВФ при прямом и обратном ДВП данных и гарантирующий достижение высокого качества восстанавливаемого сигнала в терминах PSNR. Данный алгоритм позволяет выполнить предварительное преобразование коэффициентов ВФ, используемых для вейвлет-обработки (ВО) многомерных сигналов, и функционирует следующим образом. На вход алгоритма подаются параметры изображений и системы ЦОС (в данном случае максимальное значение яркости пикселей M_{max} и коэффициент качества обработки двумерных изображений $C_{quality}$ в терминах PSNR), параметры используемого вейвлета (количество коэффициентов вейвлета l и коэффициенты $f_{F,i}$ соответствующего фильтра F). На основе известных значений M_{max} и $C_{quality}$ рассчитывается начальное значение параметра масштабирования по формуле $k = \log_2(M_{max} + 1) + C_{quality} - 1$. Далее выполняется

расчет подходящего значения порога Q высокого качества обработки изображения по формуле $Q = C_{quality} \cdot \log_2(M_{max} + 1)$ и значение характеристики PSNR по формуле $PSNR = 10 \log_{10}(M_{max}^2 / MSE)$. Если

полученное значение PSNR достигает порога Q , то k является достаточным и возможно избыточным, поэтому его значение уменьшается для проверки на избыточность. С использованием нового значения параметра масштабирования выполняется перерасчет значения характеристики PSNR и повторное его сравнение со значением порога Q . Данный цикл повторяется, пока полученное значение PSNR не перестанет удовлетворять условию высокого качества обработки изображений, то есть пока не выполнится условие $PSNR < Q$. В этом случае значение параметра k , полученное на предыдущей итерации цикла, является достаточным и не избыточным. Если же первое полученное значение PSNR не достигает порога Q , то k является недостаточным и его значение увеличивается. С использованием нового значения параметра масштабирования выполняется перерасчет значения характеристики PSNR и повторное его сравнение со значением порога Q . Данный цикл повторяется, пока полученное значение PSNR не начнет удовлетворять условию высокого качества обработки изображений, то есть пока не выполнится условие $PSNR \geq Q$. В этом случае значение параметра k , полученное на данной итерации цикла, является достаточным и не избыточным. Используя рассчитанное значение параметра масштабирования k выполняется масштабирование коэффициентов $f_{F,i}$ и вычисляется их разрядность по формуле $r_{f_{F,i}}^* = \lceil \log_2(|f_{F,i}^*| + 1) \rceil + 1$. На выход алгоритма

подаются масштабированные коэффициенты $f_{F,i}^*$ и их разрядность $r_{f_{F,i}}^*$, использование которых гарантирует высокое качество ВО двумерных изображений. Помимо этого, полученные значения $f_{F,i}^*$ и $r_{f_{F,i}}^*$ являются эффективными по вычислительной сложности, от которой существенно зависят эксплуатационные показатели системы, в частности ее производительность. Программная реализация алгоритма масштабирования коэффициентов вейвлет-фильтров выполнена в виде итерационной процедуры в среде MATLAB, автоматически подбирающей параметр k по заданному порогу PSNR. Реализован модуль сквозного тестирования на наборах трехмерных медицинских томограмм, обеспечивающий сравнение с эталонными реализациями в ПСС и расчет метрики PSNR.

Разработан метод вейвлет-фильтрации цифровых сигналов с параллельной организацией вычислений в СОК, использующий масштабированные коэффициенты ВФ для понижения вычислительной сложности блоков цифровой фильтрации и улучшения эксплуатационных

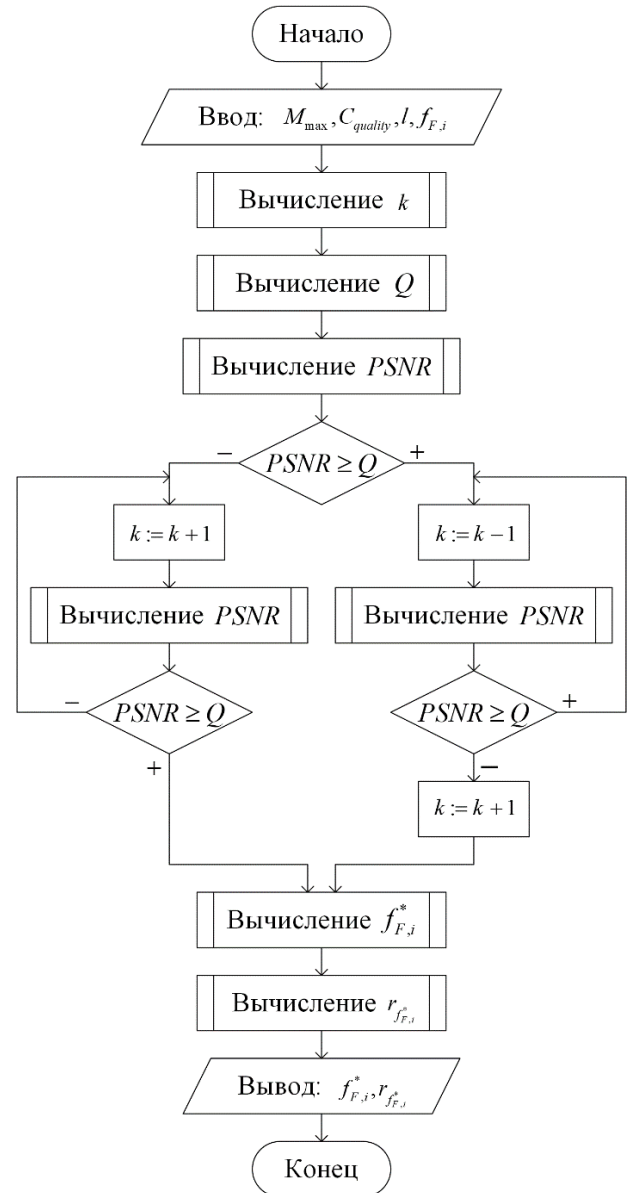


Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма масштабирования коэффициентов вейвлет-фильтров для вейвлет-обработки двумерных изображений

показателей систем ЦОС. Согласно разработанному методу, вейвлет-фильтрации сигналов с использованием масштабированных коэффициентов и параллельной обработкой в СОК осуществляется в виде следующей последовательности действий. Сперва исходя из характеристик исходного сигнала и используемого банка фильтров определяется вычислительный диапазон СОК

по формуле $\prod_{i=1}^n m_i \geq \left| M_{\max} \cdot \max(f) \cdot l^3 \right| \cdot 2$, где набор модулей представляется в виде $\{m_1, m_2, \dots, m_n\} = \{2^{k_1}, 2^{k_2} - 1, \dots, 2^{k_n} - 1\}$ и удовлетворяет ограничению $GCD(m_i, m_j) = 1$, где $2 \leq i < j \leq n$. Далее выполняется предварительное масштабирование коэффициентов ВФ согласно блок-схеме алгоритма, представленного на рисунке 8. После этого все исходные и предварительные данные переводятся из ПСС в СОК. Модулярная реализация ДВП осуществляется с использованием масштабированных коэффициентов. Полученный набор значений переводится из модулярного кода в позиционный и масштабируется по формуле $\tilde{I} = \left\lfloor 2^{-6k} I^* \right\rfloor$.

Проведено программное моделирование разработанных метода и алгоритма вейвлет-фильтрации многомерных сигналов с использованием трехмерных медицинских томограмм. Выявлено, что чрезмерное масштабирование приводит к возникновению равномерно распределенных видимых искажений при ВО визуальных данных. Характер данных искажений определяется наличием повышающей дискретизации при обратном вейвлет-преобразовании данных, приводящим к засветлению томограмм, степень которого зависит от величины накопленной вычислительной погрешности.

Разработанные алгоритм масштабирования коэффициентов ВФ и метод ВО сигналов с использованием масштабированных коэффициентов и вычислений в СОК могут найти применение в различных приложениях ЦОС и ЦОИ, активно использующих ДВП и его вариации для решения практических задач, таких как шумоподавление, сжатие и слияние данных. Понижение вычислительной сложности методов вейвлетной обработки данных с использованием предложенных разработок позволит значительно сократить ресурсозатраты на эксплуатацию различных систем ЦОС и ЦОИ.

Шестая глава посвящена программно-аппаратной реализации разработанных в предшествующих главах модели, методов, алгоритма и архитектур на основе параллельной обработки данных в СОК с использованием предложенной технологии создания высокопроизводительных и отказоустойчивых систем ЦОС. Основные результаты главы представлены далее.

Представленные в предыдущих главах разработки с параллельной обработкой данных в СОК, а также вспомогательные методики расчета параметров и программные реализации вычислений позволяют усовершенствовать подходы к ЦОС на имеющейся программно-аппаратной базе. Графическая иллюстрация разработанной технологии представлена на рисунке 9 и демонстрирует расширение методологии ЦОС посредством использования различных инструментов и принципов их взаимодействия друг с другом. Важно отметить, что помимо значимых разработок, а именно архитектуры цифрового фильтра для параллельной обработки сигналов в СОК (раздел 2.3), метода высокоскоростной вейвлет-фильтрации сигналов на основе блочной обработки данных с уменьшением количества используемых умножений (раздел 3.4), методов и архитектур для реализации немодульных операций в СОК и преобразования данных, в частности метода и архитектуры для обратного преобразования чисел из модулярного кода в позиционный (подраздел 4.1.2), метода определения знака числа в СОК (раздел 4.2), метода и архитектуры для сравнения чисел в СОК (раздел 4.3) и метода и архитектуры для обнаружения, локализации и исправления ошибок в СОК (подраздел 4.4.2), алгоритма масштабирования коэффициентов вейвлет-фильтров (подраздел 5.2.1) и метода вейвлет-обработки цифровых сигналов с использованием масштабированных коэффициентов и модулярных вычислений (подраздел 5.2.2), также важное место занимают различные программные инструменты для выбора эффективных по ресурсозатратам наборов модулей СОК (разделы 2.1 и 2.2) на основе предварительной теоретической оценки вычислительных структур в ПСС и СОК на основе UGM (разделы 2.2-2.4, 3.2 и 3.3), составления вспомогательных матриц преобразования (раздел 3.1), оценки погрешности вычислений на разных этапах обработки данных (разделы 5.1 и 5.2), преобразования коэффициентов используемых ЦФ (разделы 5.1 и 5.2). Отдельно следует выделить важность САПР, способных осуществить эффективную по ресурсозатратам аппаратную реализацию различных методов ЦОС в СОК на современных платформах, в частности FPGA и ASIC.

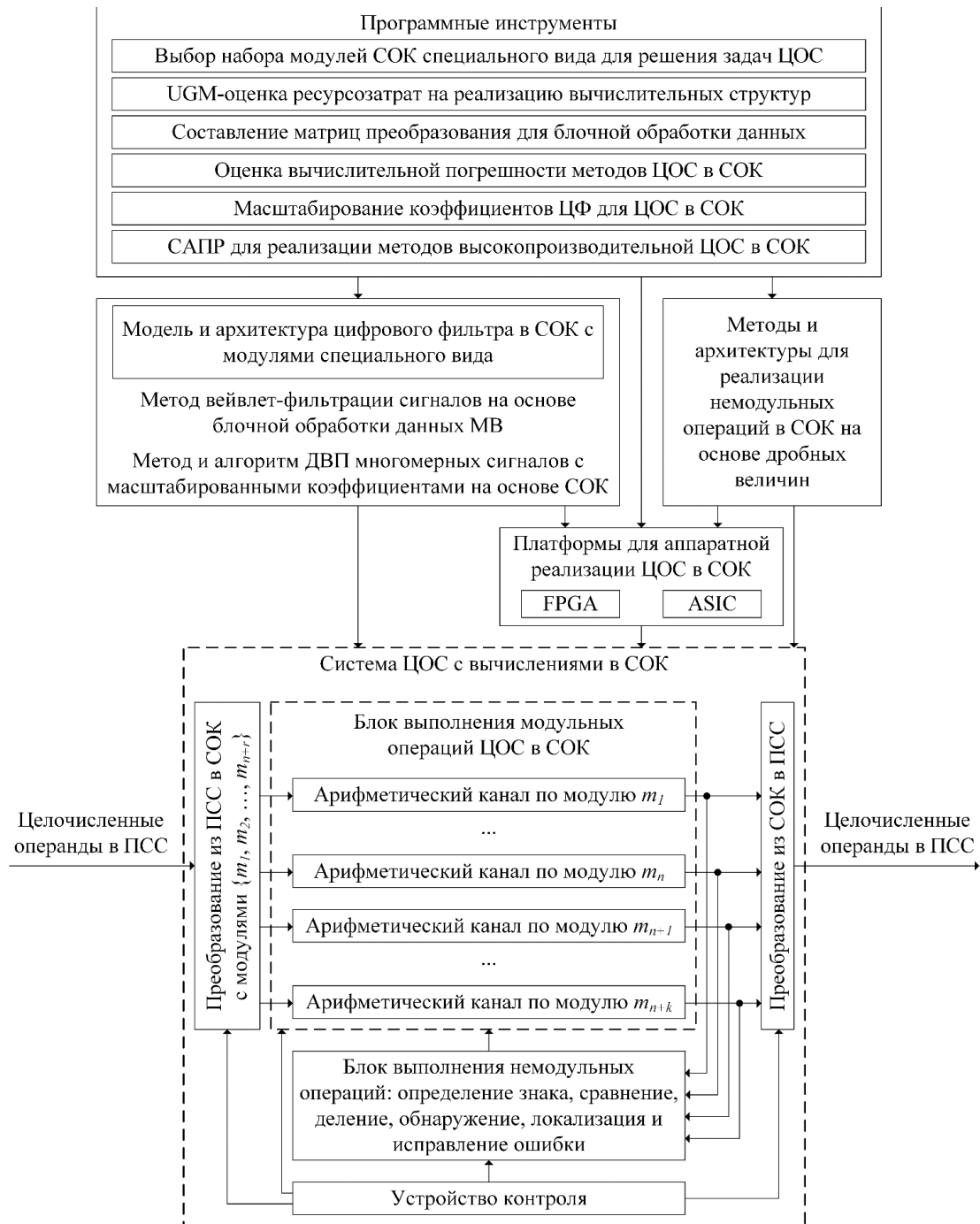


Рисунок 9 – Технология создания программно-аппаратных систем цифровой обработки сигналов в системе остаточных классов с использованием комплекса специализированных программных средств

Программная реализация разработанных методов выполнена в виде модульного программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего сквозной переход от математических моделей к верифицированным аппаратным структурам: ядро математического моделирования на базе MATLAB с автоматизированным подбором наборов модулей СОК, анализом накопительной погрешности и оптимизацией параметров масштабирования коэффициентов фильтров; генератор параметризуемых RTL-конфигураций, преобразующий формализованные описания алгоритмов в параметризуемые HDL-модели с учётом архитектурных особенностей целевых платформ FPGA и ASIC; фреймворк сквозной верификации, включающий автоматизированную генерацию тестовых векторов, эталонное моделирование в позиционной системе счисления, расчет метрик качества PSNR, MSE, пропускной способности, задержки и энергопотребления. Для обеспечения воспроизводимости экспериментов реализован автоматизированный конвейер тестирования и постобработки результатов, компоненты которого зарегистрированы в виде программ для ЭВМ.

Проведено программное моделирование КИХ-ЦФ с использованием ТМАС-блоков на основе разработанных модели и архитектуры цифрового фильтра для параллельной обработки сигналов в СОК с модулями специального вида. Моделирование произведено в САПР Xilinx Vivado 18.3 с использованием языка описания аппаратуры VHDL на ППВМ Artix xc7a200tffg1156-3. Установлено, что применение предложенного подхода к организации параллельной обработки данных в СОК вида $\{2^{k_1}, 2^{k_2} - 1, 2^{k_3} - 1, \dots, 2^{k_n} - 1\}$ для реализации КИХ-ЦФ снижает вычислительную задержку и аппаратные затраты при ЦОС до 1,8 и 4,8 раз, соответственно, по сравнению с реализацией в ПСС. Увеличение количества модулей СОК позволяет получить лучший результат по совокупности эксплуатационных показателей устройства ЦОС в сравнении с СОК с меньшим числом модулей.

Проведено программное моделирование КИХ-ЦФ в СОК со сбалансированным набором модулей вида $\{2^k - 1, 2^k, 2^k + 1\}$. Моделирование произведено в САПР Synopsys Design Compiler с использованием standard cell library. Результаты продемонстрировали снижение аппаратных затрат с сопутствующим понижением быстродействия по сравнению с реализациями КИХ-ЦФ в СОК, не использующими модуль вида $2^k + 1$. Для 32-разрядного диапазона СОК (таблица 1) предложенный ЦФ позволил сократить аппаратные расходы до 23% и снизить энергопотребление до 22,3% при уменьшении скорости вычислений до 2 раз. Для 48-разрядного диапазона СОК ЦФ позволил снизить аппаратные расходы до 14%, но увеличил задержку также в 2 раза.

Таблица 1 – Результаты программного моделирования в системе автоматизированного проектирования цифровой фильтрации в системе остаточных классов с 32-разрядным диапазоном

Набор модулей		7, 15, 16, 31, 127, 2047 на основе сумматоров KSA	7, 15, 16, 31, 127, 2047 на основе сумматоров CPA	7, 9, 17, 31, 32, 65, 127 (предложенный)
3-ий порядок	Площадь, мкм ²	20724,69	20346,38	16139,30
	Задержка, нс	2,37	3,49	4,37
	Мощность, мВт	9,90	9,88	7,78
	Площадь×заде ржка	49117,51	71008,86	70528,74
7-ой порядок	Площадь, мкм ²	40456,07	40074,16	31152,99
	Задержка, нс	3,62	4,71	7,79
	Мощность, мВт	19,28	19,25	15,03
	Площадь×заде ржка	146450,98	188749,30	242681,82
15-ый порядок	Площадь, мкм ²	79856,12	79465,79	62507,06
	Задержка, нс	6,27	7,38	14,53
	Мощность, мВт	38,00	37,98	29,52
	Площадь×заде ржка	500697,86	586457,51	908227,53
31-ый порядок	Площадь, мкм ²	161175,75	160775,37	126564,46
	Задержка, нс	18,77	22,23	27,89
	Мощность, мВт	75,38	75,36	58,57
	Площадь×заде ржка	3025268,89	3574036,40	3529882,82

Проведено программное моделирование вейвлет-обработки цифровых данных с децимацией на основе предложенного метода высокоскоростной вейвлет-фильтрации сигналов с организацией блочной обработки данных и уменьшением количества используемых умножений. Моделирование проведено в САПР Xilinx Vivado 2018.2 с использованием языка описания аппаратуры Verilog на плате xc7vx485tffg1157-1 семейства ППВМ Family Virtex 7 с заданными по умолчанию параметрами синтеза и реализации. Анализ эксплуатационных характеристик (рисунки 10-12) показал повышение производительности до 66% при возрастании аппаратных и энергетических затрат до 95% и 344%, соответственно, по сравнению с прямой реализацией ЦФ.

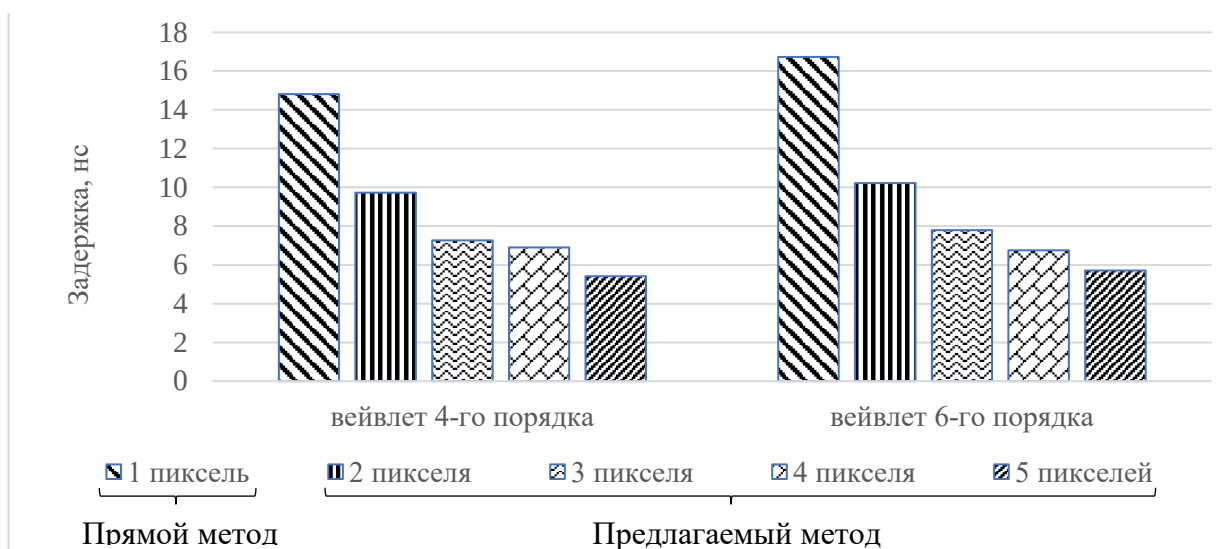


Рисунок 10 – Временные затраты на реализацию блочной обработки данных при вейвлет-обработке двумерного 8-битного сигнала с децимацией

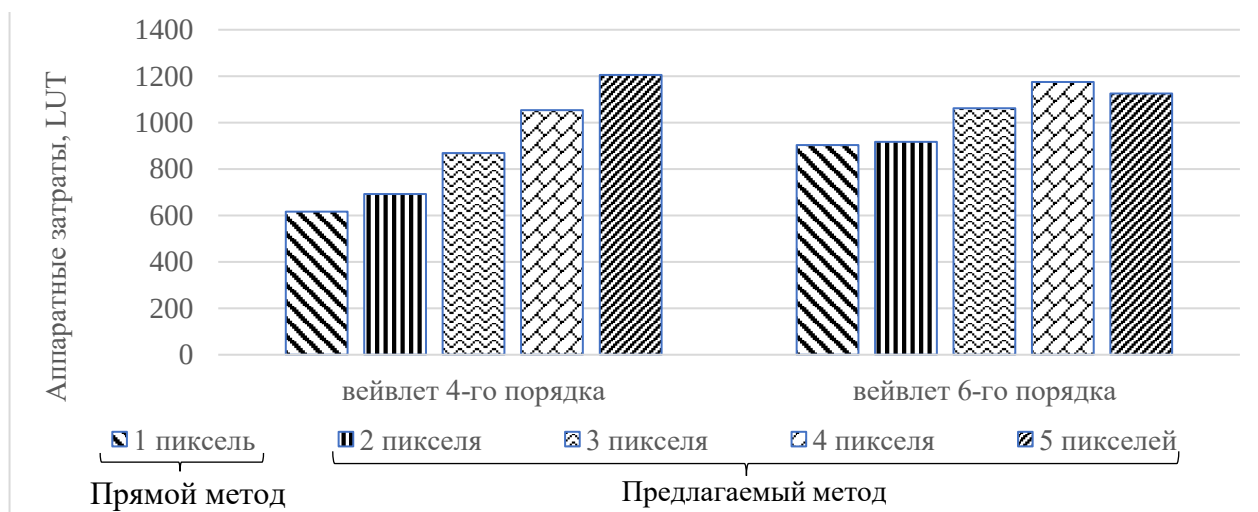


Рисунок 11 – Аппаратные затраты на реализацию блочной обработки данных при вейвлет-обработке двумерного 8-битного сигнала с децимацией

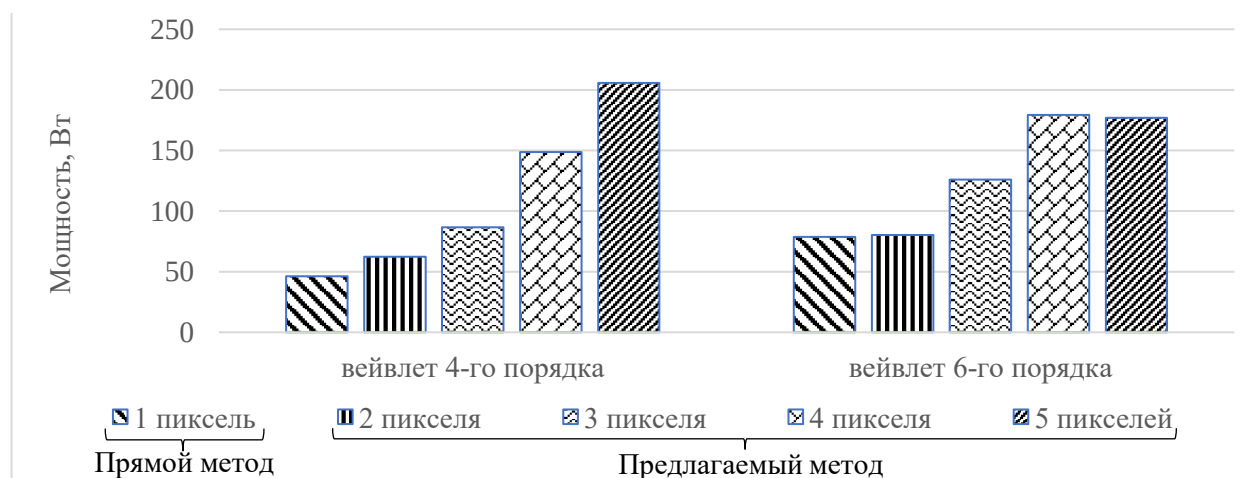


Рисунок 12 – Затраты мощности на реализацию блочной обработки данных при вейвлет-обработке двумерного 8-битного сигнала с децимацией

Проведено программное моделирование в САПР метода и архитектуры для обратного преобразования чисел из СОК в ПСС на основе дробных величин. В качестве платформы для моделирования выбраны плата KC705 XC7K70T семейства ППВМ Xilinx Kintex 7, плата ML605 XC6VLX75T семейства ППВМ Virtex 6 и плата SP605 XC6LX45T семейства ППВМ Spartan 6. Использован высокоскоростной язык описания аппаратного обеспечения интегральных схем VHDL. Синтез выполнен в САПР ISE Design Suit 4.7 WebPack. Результаты показали, что предложенный подход имеет в 1,4-2,4 и 2,1-4,7 раза бóльшую производительность, чем подходы, основанные на применении КТО и ОПСС, соответственно.

Проведено программное моделирование метода определения знака числа, представленного в коде СОК, на основе КТОд. Моделирование произведено на ППВМ в САПР Xilinx ISE 14.7 с использованием языка описания аппаратуры VHDL на целевой плате xc7k70t-2fbg676 семейства Kintex-7. Результаты показали повышение производительности до 27,14 раз и уменьшение аппаратных затрат (слайсов, S) до 2,45 раз по сравнению с реализацией в КТО и ОПСС.

Проведено программное моделирование метода и архитектуры для сравнения чисел в СОК на основе КТОд. Моделирование осуществлено в САПР ISE Design Suite версии 14.7 с использованием языка описания аппаратуры VHDL на целевой плате XC7K70T семейства ППВМ Kintex-7. Результаты показали снижение аппаратных затрат до 7,07 раз по сравнению с реализацией в КТО и ОПСС.

Проведено программное моделирование блока обнаружения, локализации и исправления ошибок в СОК на основе КТО с дробными величинами. Моделирование произведено в САПР ISE Design Suite 14.7 с использованием языка описания аппаратуры VHDL на плате KC705 XC7K70T-2FBG676 семейства ППВМ Kintex-7. Результаты показали снижение аппаратных затрат до 31,63% и повышение производительности до 13 раз по сравнению с реализацией в КТО и ОПСС.

Проведено программное моделирование ДВП трехмерных сигналов на основе предложенных алгоритма масштабирования коэффициентов ВФ (таблица 2) и метода ВО сигналов с параллельной обработкой в СОК (таблица 3). Моделирование произведено в САПР Xilinx Vivado версии 2020.2 с использованием языка описания аппаратуры VHDL на плате xcu115-flvf-1924-3 семейства ППВМ Kintex UltraScale с параметрами «Flow_PerfOptimized_high». Выявлено, что использование наборов модулей СОК специального вида позволяет задействовать эффективные техники суммирования в блоках CSA и KSA с техникой EAC, что приводит к существенному повышению скорости вычислений по всем каналам. Результаты показали повышение производительности в 2,89-3,59 раз при увеличении аппаратных затрат в 1,18-3,29 раз по сравнению с реализацией в ПСС по стандарту IEEE 1076-2019.

Таблица 2 – Результаты программного моделирования в системе автоматизированного проектирования вейвлет-обработки трехмерных медицинских томограмм с использованием масштабированных коэффициентов фильтров

Метод		Битность изображения	Разрядность коэффициентов	Производительность, Мвокс/с	Площадь, LUTs
Известные	Стандарт IEEE 1076-2019	8	32	58,13	4094
		12	32	46,21	11989
		16	32	33,46	24325
	Alzaq, 2018	8	12	72,42	1465
	Chehaitly, 2017	8	16	66,63	1760
Предлагаемые	Для вейвлетов Добеши	8	11	82,49	1250
	Для симлетов	12	16	46,70	4527
	Для койфлетов	16	20	42,08	11749

Таблица 3 – Результаты программного моделирования в системе автоматизированного проектирования вейвлет-обработки трехмерных медицинских томограмм в системе остаточных классов с использованием масштабированных коэффициентов фильтров

Метод		Разрядность коэффициентов	Производительность устройства, Мвокс/с		Площадь устройства, LUTs	
			СОК	ПСС	СОК	ПСС
Известные	Alzaq, 2018	12	182,3	72,4	5715	1465
	Chehaitly, 2017	16	155,1	66,6	6654	1760
	Стандарт IEEE 1076-2019	32	103,4	58,1	12731	4094
Предлагаемый	Для вейвлетов Добеши	11	209,0	82,5	4820	1250

Проведена программно-аппаратная реализация нейросетевых вычислений с организацией параллельной обработки визуальных данных в СОК. На вход сети поступает RGB-изображение размера 256×192 . Два первых слоя отвечают за извлечение признаков из изображения. Первый слой производит операцию свертки с использованием 8 фильтров размера $3 \times 3 \times 3$, с шагом 3. Результатом вычислений первого слоя являются 8 карт признаков размером 85×64 . Второй слой выполняет операцию выборки максимальных элементов с помощью маски размера 2×2 и с шагом 2. На выход второго слоя поступают 8 карт признаков размера 42×32 , соединенные со входами двух последних слоев, отвечающих за классификацию изображений. Третий слой состоит из 10 нейронов, а четвертый слой состоит из 8 нейронов, каждый из которых соответствует определенному классу. Сверточные вычисления реализованы на аппаратном уровне в САПР Xilinx Vivado версии 16.6 на плате xc7k70tbg484-2 семейства ППВМ Kintex-7 с использованием языка описания аппаратуры VHDL. Остальные уровни обработки цифровых данных реализованы на программном уровне в среде MATLAB. Результаты показали повышение производительности на 58,89% по сравнению с программной реализацией в ПСС (таблица 4).

Таблица 4 – Результаты программно-аппаратной реализации нейросетевых вычислений с организацией параллельной обработки визуальных данных в системе остаточных классов

Реализация	Уровень обработки данных	Время, с	Производительность, изобр./с
Программная реализация в ПСС	Слой свертки	0,0380	10,8696
	Остальные слои СНС	0,0540	
	Общее время программной реализации в ПСС	0,0920	
Программно-аппаратная реализация с вычислениями в СОК	Передача изображения на ППВМ	0,0025	17,2712
	Слой свертки	0,0001	
	Передача результатов на «рабочую станцию»	0,0013	
	Остальные слои СНС	0,0540	
Общее время программно-аппаратной реализации с вычислениями в СОК		0,0579	17,2712

Проведено программное моделирование отказоустойчивой сети Хопфилда с организацией параллельной обработки данных в СОК. Моделирование произведено с САПР Xilinx Vivado версии 2016.6 на плате семейства ППВМ Kintex-7 с использованием языка описания аппаратуры VHDL. Реализованы подходы на основе КТО, КТОд и ССС. Сравнение показало, что КТОд вызывает задержку в 1,3-2 раза меньшую, чем стандартная КТО, и в 1,2-3,8 раза, чем ССС. КТОд использует в 1,8-3,3 раза меньше аппаратных ресурсов, чем стандартная КТО, и в 1,5-3 раза меньше, чем ССС. Энергопотребление при использовании КТОд значительно уменьшается по сравнению с другими подходами с возрастанием количества оснований.

Разработанная технология создания высокопроизводительных и отказоустойчивых программно-аппаратных систем цифровой обработки одномерных и многомерных сигналов, основанная на расширении методологии ЦОС в СОК разработанными моделями, методами и алгоритмами, а также вспомогательными оригинальными и модифицированными программными инструментами, а также ряд проведенных с ее использованием реализаций на современных средствах вычислительной техники могут найти применение во множестве приложений обработки цифровых данных для улучшения эксплуатационных показателей современных средств вычислительной техники и повышения производительности систем ЦОС и ЦОИ при решении широкого круга задач, таких как шумоподавление, восстановление, сжатие, слияние и интеллектуальная обработка данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена научная проблема разработки моделей и методов параллельной обработки данных в системе остаточных классов для создания технологии высокопроизводительной цифровой обработки сигналов, имеющая важное хозяйственное значение. **Достигнута цель исследования**, заключающаяся в обеспечении требуемого уровня производительности систем цифровой обработки сигналов при сохранении требуемых показателей точности и качества восстановления данных за счет разработки научно обоснованных математических моделей, методов и программного обеспечения параллельной обработки данных на основе системы остаточных классов. Основные полученные результаты, составляющие **итоги диссертационного исследования**, представлены далее.

1. Разработаны обобщенная модель усовершенствованной цифровой обработки сигналов в системе остаточных классов и архитектура цифрового фильтра с конечной импульсной характеристикой в модулярной форме для параллельной обработки сигналов в системе остаточных классов с модулями специального вида $\{2^k - 1, 2^k, 2^k + 1\}$. Внедрение блоков усеченного умножителя с накоплением, передающих два числа на следующее звено фильтра, позволило использовать лишь один параллельно-префиксный сумматор и сократить время фильтрации одномерных сигналов на 22-29%. Организация многоканальной обработки по каждому модулю снижает задержку в 1,3-1,8 раза и аппаратные затраты в 1,7-4,8 раз по сравнению с позиционной системой счисления. Установлено, что увеличение числа модулей усиливает совокупные эксплуатационные показатели, рост разрядности данных смещает преимущество в сторону экономии ресурсов, а повышение порядка цифрового фильтра дополнительно улучшает оба параметра. Результаты подтверждены программным моделированием в системе автоматизированного проектирования Xilinx Vivado 18.3 на языке описания аппаратуры сверхскоростных интегральных схем и программируемых пользователем вентильных матрицах семейства Artix-7.

2. Предложен метод высокоскоростной вейвлет-фильтрации сигналов на основе блочной обработки данных с уменьшением количества используемых умножений. Метод использует априорно составленные вспомогательные матрицы преобразования, формируемые через многочлены Лагранжа и матрицы Вандермонда, и распараллеливание вычислений по двум каналам. Замена вычислительно сложных операций умножения на процедуры масштабирования и сложения снижает вычислительную сложность до 72,9%, повышает скорость обработки до 73,62% и уменьшает аппаратные затраты до 34,03%. Для вейвлетов высокого порядка предложено разделение фильтра на составляющие с целью минимизации размера матриц преобразования. Программная верификация в системе автоматизированного проектирования Xilinx Vivado 2018.2 на языке Verilog и программируемых пользователем вентильных матрицах семейства Virtex-7 зафиксировала прирост производительности до 66% по сравнению с прямой реализацией вейвлет-фильтров, с учетом сопутствующего роста аппаратных и энергетических затрат в заданной конфигурации.

3. Разработаны методы и архитектуры для реализации немодульных операций в системе остаточных классов, а именно: разработан метод обратного преобразования чисел из системы остаточных классов в позиционной системе счисления на основе дробных величин и архитектура, повышающая производительность до 4,7 раз по сравнению с подходами на основе

Китайской теоремы об остатках и обобщенной позиционной системы счисления; разработан метод определения знака числа, представленного в системе остаточных классов, на основе дробных величин, повышающий производительность до 27,14 раз и уменьшающий аппаратные затраты до 2,45 раз по сравнению с подходами на основе Китайской теоремы об остатках и обобщенной позиционной системы счисления; разработан метод сравнения чисел в системе остаточных классов на основе дробных величин и архитектура, понижающая аппаратные затраты до 7,07 раз по сравнению с подходами на основе Китайской теоремы об остатках и обобщенной позиционной системы счисления; разработаны метод и архитектура блока обнаружения, локализации и исправления ошибок в системе остаточных классов на основе дробных величин, повышающие производительность до 13 раз и снижающие аппаратные затраты до 31,63% по сравнению с подходом на обобщенной позиционной системе счисления. Представленные результаты получены при программной реализации в системе автоматизированного проектирования ISE Design Suite 14.7 на языке описания аппаратуры сверхскоростных интегральных схем и программируемых пользователем вентильных матрицах семейств Virtex-6, Spartan-6 и Kintex-7.

4. Предложен алгоритм масштабирования коэффициентов вейвлет-фильтров для цифровой обработки сигналов в системе остаточных классов, гарантирующий высокое качество восстановления сигнала в терминах пикового отношения сигнала к шуму за счет предварительного преобразования коэффициентов анализирующих и синтезирующих фильтров прямого и обратного дискретного вейвлет-преобразования в формат с фиксированной запятой. Выявлено, что чрезмерное масштабирование может вызывать равномерно распределенные искажения и засветление визуальных данных из-за повышающей дискретизации, что требует контролируемого подбора параметра масштабирования. Интеграция алгоритма с техниками суммирования с блоками сумматора с сохранением переноса и сумматора Когге-Стоуна с техникой циклического подключения старшего переноса, что приводит к существенному повышению скорости вычислений по всем каналам в параллельных архитектурах повышает производительность дискретного вейвлет-преобразования в 2,89–3,59 раз по сравнению с реализацией по стандарту IEEE 1076-2019 согласно результатам программного моделирования в системе автоматизированного проектирования Vivado 2020.2 на программируемых пользователем вентильных матрицах семейства Kintex UltraScale, обеспечивая оптимальный баланс между скоростью, точностью и аппаратными затратами.

5. Разработан метод вейвлет-обработки сигналов с использованием масштабированных коэффициентов и параллельной обработкой в системе остаточных классов. Установлено, что распределение вычислительной нагрузки по независимым каналам обработки позволяет существенно снизить задержку блоков цифрового фильтра и повысить пропускную способность системы. Метод оптимизирован для работы с форматом с фиксированной запятой, что упрощает множительные операции при сохранении высокого качества обработки. Программная верификация в системе автоматизированного проектирования Vivado 2020.2 на базе программируемых пользователем вентильных матриц семейства Kintex UltraScale показала повышение производительности дискретного вейвлет-преобразования в 2,89–3,59 раз по сравнению с последовательной реализацией в позиционной системе счисления по стандарту IEEE 1076-2019, демонстрируя эффективность модулярной организации вычислений для высокоскоростной обработки многомерных сигналов при контролируемых аппаратных затратах.

6. Разработана технология создания высокопроизводительных и отказоустойчивых программно-аппаратных систем цифровой обработки одномерных и многомерных сигналов в системе остаточных классов, расширяющая традиционную методологию за счет внедрения обобщенной модели, методов, алгоритма, архитектур и комплекса специализированных программных средств для проектирования в современных системах автоматизированного проектирования. Предусмотрена гибридная реализация: аппаратное ускорение сверточных операций на языке описания аппаратуры сверхскоростных интегральных схем в системе автоматизированного проектирования Xilinx Vivado и программная обработка остальных уровней в среде MATLAB, что повысило производительность нейросетевой обработки визуальных данных на 58,89% относительно позиционной системы счисления. Для задач отказоустойчивости внедрена модифицированная Китайская теорема об остатках с дробными величинами, которая в сети Хопфилда снижает задержку в 1,2–3,8 раза, аппаратные затраты в 1,5–

3,3 раза и энергопотребление с ростом числа оснований по сравнению со стандартной Китайской теоремы об остатках и смешанной системы счисления, подтверждая эффективность модулярных вычислений для надежных нейросетевых и телекоммуникационных систем.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Тема и основные результаты диссертации соответствуют следующим областям исследований паспорта специальности 2.3.5 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей»:

1 – «Модели, методы и алгоритмы проектирования, анализа, трансформации, верификации и тестирования программ и программных систем», а именно разработаны методы проектирования программных систем цифровой обработки сигналов для реализации высокопроизводительной фильтрации сигналов на основе блочной обработки данных, анализа вычислительной погрешности методов цифровой обработки сигналов с целью достижения баланса между качественными и эксплуатационными показателями проектируемых систем, масштабирования коэффициентов используемых фильтров, выбора наборов модулей системы остаточных классов специального вида при организации параллельных модулярных вычислений, оценки ресурсозатрат на реализацию систем цифровой обработки сигналов с обработкой данных в системе остаточных классов на основе unit-gate модели;

7 – «Модели, методы, архитектуры, алгоритмы, форматы, протоколы и программные средства человеко-машинных интерфейсов, компьютерной графики, визуализации, обработки изображений и видеоданных, систем виртуальной реальности, многомодального взаимодействия в социкиберфизических системах», а именно разработаны обобщенная модель усовершенствованной цифровой обработки сигналов в системе остаточных классов и архитектура цифрового фильтра для параллельной обработки сигналов в системе остаточных классов, разработаны методы и архитектуры для эффективной по ресурсозатратам реализации немодульных операций в системе остаточных классов, разработаны методы высокопроизводительной цифровой фильтрации одномерных и многомерных сигналов на основе дискретного вейвлет-преобразования с реализацией сверточных вычислений блочной обработкой данных, использованием модулярных вычислений и коэффициентов фильтров, масштабированных в соответствии с результатами анализа вычислительной погрешности методов цифровой обработки сигналов;

8 – «Модели и методы создания программ и программных систем для параллельной и распределенной обработки данных, языки и инструментальные средства параллельного программирования», а именно разработана технология создания программно-аппаратных систем для высокопроизводительной цифровой обработки сигналов с параллельной реализацией модулярных вычислений и использованием нейросетевой обработки данных.

Рекомендации. Все полученные результаты представляют собой части единого исследования, результаты которого могут быть применены и уже применяются для создания систем высокопроизводительной цифровой обработки сигналов, изображений и видеоданных при решении широкого круга практических задач в различных областях. Наиболее перспективными направлениями для внедрения предлагаемых разработок являются медицинская диагностика, системы компьютерного зрения, телемедицина, робототехнические комплексы, беспилотный транспорт, спутниковые системы, цифровое сельское хозяйство, многочисленные приложения искусственного интеллекта.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в: выводе аналитических критериев выбора модулей под конкретные классы преобразований с учетом разрядности данных и требований к точности; расширении методологии блочной обработки данных при реализации сверточных вычислений с шагом различной величины; совершенствовании методов немодульных операций через развитие аппарата дробных величин; углублении анализа накопления вычислительной погрешности при многоуровневых преобразованиях в системе остаточных классов, особенно для многомерных данных, и разработке теоретической оценки границ применимости приближенных модулярных вычислений; исследовании пределов масштабируемости системы остаточных классов для цифровых данных высокой размерности и построении формальных моделей соотношения между параллелизмом вычислений, избыточностью кодирования и надежностью обработки, что выведет систему остаточных классов на уровень универсального инструмента цифровой обработки сигналов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии автора

1. Червяков, Н. И. Компьютерные вычисления на основе модулярной алгебры: коллективная монография / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, М. Г. Бабенко, И. Н. Лавриненко, А. В. Лавриненко – Ставрополь: Фабула. – 2015. – 210 с.
2. Червяков, Н. И. Модулярная арифметика и ее приложения в инфокоммуникационных технологиях: коллективная монография / Н. И. Червяков, А. А. Коляда, П. А. Ляхов, М. Г. Бабенко, И. Н. Лавриненко, А. В. Лавриненко – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2017. – 400 с.
3. Chervyakov, N. RNS-Based Image Processing / N. Chervyakov, P. Lyakhov // In: Molahosseini, A., de Sousa, L., Chang, CH. (eds) Embedded Systems Design with Special Arithmetic and Number Systems. Springer, Cham – 2017. – P. 217-245. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49742-6_9.

Статьи автора в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

4. Аникуева, О. В. Реализация дискретного вейвлет-преобразования в системе остаточных классов специального вида / О. В. Аникуева, П. А. Ляхов, Н. И. Червяков // Инфокоммуникационные технологии. – 2014. – Т. 12, № 4. – С. 4-9. **ВАК (К2).**
5. Бабенко, М. Г. Эффективный алгоритм точного определения универсальной позиционной характеристики модулярных чисел и его применение для вычисления основных операций в системе остаточных классов / М. Г. Бабенко, И. Н. Лавриненко, П. А. Ляхов, Н. И. Червяков // Инфокоммуникационные технологии. – 2014. – Т. 12, № 1. – С. 4-18. **ВАК (К2).**
6. Ляхов, П. А. Вейвлетные фильтры третьего порядка в простых полях Галуа / П. А. Ляхов, Н. И. Червяков, Н. Ф. Семенова, К. С. Шульженко // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. – 2015. – № 13(210). – С. 78-84. **ВАК (К2).**
7. Ляхов, П. А. Высокопроизводительная цифровая фильтрация на модифицированных умножителях с накоплением в системе остаточных классов с модулями специального вида / П. А. Ляхов, А. С. Ионисян, М. В. Валуева, А. С. Ларикова // Информационные технологии. – 2021. – Т. 27, № 4. – С. 171-179. – DOI 10.17587/it.27.171-179. **ВАК (К1).**
8. Ляхов, П. А. Метод быстрого определения знака числа в системе остаточных классов / П. А. Ляхов // Современные наукоемкие технологии. – 2025. – № 7. – С. 34-42. – DOI 10.17513/snt.40438. **ВАК (К1).**
9. Ляхов, П. А. Модифицированные умножители с накоплением для повышения производительности цифровых фильтров / П. А. Ляхов, А. С. Ионисян, М. В. Валуева, А. С. Ларикова // Инфокоммуникационные технологии. – 2020. – Т. 18, № 4. – С. 403-410. – DOI 10.18469/ikt.2020.18.4.03. **ВАК (К1).**
10. Ляхов, П.А. Повышение скорости вейвлет обработки изображений на основе метода Винограда с учетом децимации / П. А. Ляхов // Известия Юго-Западного государственного университета – 2025. – Т. 29, № 2. – С. 130-145. – DOI 10.21869/2223-1560-2025-29-2-130-145. **ВАК (К2).**
11. Ляхов, П.А. Проектирование цифровых фильтров с масштабированием в системе остаточных классов / П. А. Ляхов // Системы анализа и обработки данных – 2025. Т. 100, № 4. – С. 85-104. – DOI: 10.17212/2782-2001-2025-4-85-104. **ВАК (К2).**
12. Ляхов, П.А. Уменьшение аппаратных затрат цифровой фильтрации в системе остаточных классов, на основе усеченных блоков умножения с накоплением / П. А. Ляхов // Известия Юго-Западного государственного университета – 2025. Т. 29, № 4. – С. 111-124. – DOI 10.21869/2223-1560-2025-29-4-111-124. **ВАК (К2).**
13. Нагорнов, Н. Н. Исследование шума квантования фильтров дискретного вейвлет-преобразования для обработки трехмерных изображений в медицине / Н. Н. Нагорнов, П. А.

Ляхов, Н. И. Червяков // Информационные технологии. – 2019. – Т. 25, № 7. – С. 415-425. – DOI 10.17587/it.25.415-425. **ВАК (К1).**

14. Червяков, Н. И. Анализ шума квантования фильтров дискретного вейвлет-преобразования изображений / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, Н. Н. Нагорнов // Инфокоммуникационные технологии. – 2018. – Т. 16, № 3. – С. 257-264. – DOI 10.18469/ikt.2018.16.3.01. **ВАК (К1).**

15. Червяков, Н. И. Аналитический обзор методов определения позиционных характеристик в системе остаточных классов / Н. И. Червяков, М. Г. Бабенко, П. А. Ляхов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2012. – № 12. – С. 027-030. **ВАК (К2).**

16. Червяков, Н. И. Архитектура сверточной нейронной сети с вычислениями в системе остаточных классов с модулями специального вида / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, Д. И. Калита, М. В. Валуева // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2017. – № 1. – С. 3-15. **ВАК (К2).**

17. Червяков, Н. И. Выбор оптимального набора модулей системы остаточных классов для повышения производительности фильтров с конечной импульсной характеристикой / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, Д. И. Калита // Информационные технологии. – 2015. – Т. 21, № 12. – С. 923-929. **ВАК (К1).**

18. Червяков, Н. И. Метод определения знака числа в системе остаточных классов на основе приближенных вычислений / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2012. – № 12. – С. 56-64. **ВАК (К2).**

19. Червяков, Н. И. О выборе диапазона системы остаточных классов для цифровой обработки изображений / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, Д. И. Калита // Инфокоммуникационные технологии. – 2016. – Т. 14, № 2. – С. 111-122. – DOI 10.18469/ikt.2016.14.2.01. **ВАК (К1).**

20. Червяков, Н. И. Оптимизация процесса коррекции ошибок в системе остаточных классов за счет применения китайской теоремы об остатках с дробными числами / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, М. Г. Бабенко, И. Н. Лавриненко [и др.] // Инфокоммуникационные технологии. – 2018. – Т. 16, № 2. – С. 157-168. – DOI 10.18469/ikt.2018.16.2.01. **ВАК (К1).**

21. Червяков, Н. И. Построение в конечных полях вейвлетных фильтров третьего порядка с использованием двучленов специального вида / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, Н. Ф. Семенова // Инфокоммуникационные технологии. – 2015. – Т. 13, № 2. – С. 111-117. – DOI 10.18469/ikt.2015.13.2.01. **ВАК (К1).**

22. Червяков, Н. И. Приближенный метод выполнения немодульных операций в системе остаточных классов / Н. И. Червяков, В. М. Авербух, М. Г. Бабенко, П. А. Ляхов [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 6-1. – С. 189-193. **ВАК (К1).**

23. Червяков, Н. И. Приближенный метод определения знака числа в системе остаточных классов и его техническая реализация / Н. И. Червяков, М. Г. Бабенко, П. А. Ляхов, И. Н. Лавриненко // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2013. – № 4(176). – С. 131-141. **ВАК (К2).**

24. Червяков, Н. И. Приближенный метод определения позиционной характеристики модулярного числа и его применение для выполнения немодульных процедур нейропроцессоров в системе остаточных классов / Н. И. Червяков, М. Г. Бабенко, П. А. Ляхов [и др.] // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2012. – № 12. – С. 040-046. **ВАК (К2).**

25. Червяков, Н. И. Применение сумматоров с параллельно-префиксной архитектурой для перевода чисел из двоичной системы счисления в систему остаточных классов / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, Н. Ф. Семенова, М. В. Валуева // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2016. – № 10. – С. 31-40. **ВАК (К2).**

26. Червяков, Н. И. Проектирование КИХ-фильтров в системе остаточных классов с модулями специального вида / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2014. – № 9. – С. 52-60. **ВАК (К2).**

27. Червяков, Н. И. Реализация КИХ-фильтров в системе остаточных классов / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2012. – № 5. – С. 16-25. **ВАК (К2).**

28. Червяков, Н. И. Умножение и деление в системе остаточных классов с использованием полей Галуа $GF(p)$ / Н. И. Червяков, М. Г. Бабенко, П. А. Ляхов [и др.] // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического

университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2014. – № 3(198). – С. 65-76. **ВАК (K2).**

29. Червяков, Н. И. Целочисленная сглаживающая фильтрация в системе остаточных классов / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, Н. Н. Нагорнов // Инфокоммуникационные технологии. – 2018. – Т. 16, № 1. – С. 7-19. – DOI 10.18469/ikt.2018.16.1.01. **ВАК (K1).**

30. Червяков, Н. И. Эффективный метод приближенного вычисления позиционной характеристики модулярного представления числа / Н. И. Червяков, В. М. Авербух, М. Г. Бабенко, И. Н. Лавриненко, П. А. Ляхов // Информационные технологии. – 2012. – № 11. – С. 21-29. **ВАК (K1).**

31. Червяков, Н. И. Ускорение тензорных вычислений с использованием системы остаточных классов / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, А. С. Ионисян, А. Р. Оразаев // Инфокоммуникационные технологии. – 2019. – Т. 17, № 4. – С. 361-366. – DOI 10.18469/ikt.2019.17.4.01. **ВАК (K1).**

Статьи автора в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus

32. Boyvalenkov, P. Classification of Moduli Sets for Residue Number System with Special Diagonal Functions / P. Boyvalenkov, N. I. Chervyakov, P. Lyakhov [et al.] // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 156104-156116. – DOI 10.1109/ACCESS.2020.3019452. **Scopus, Web of Science (Q1).**

33. Boyvalenkov, P. Residue number systems with six modules and efficient circuits based on power-of-two diagonal modulus / P. Boyvalenkov, P. Lyakhov, N. Semyonova, M. Valueva, G. Boyvalenkov, D. Minenkov, D. Kaplun // Computers and Electrical Engineering. – 2023. – Vol. 110. – P. 108854. **Scopus, Web of Science (Q1).**

34. Chervyakov, N. A high-speed division algorithm for modular numbers based on the chinese remainder theorem with fractions and its hardware implementation / N. Chervyakov, P. Lyakhov, M. Babenko [et al.] // Electronics. – 2019. – Vol. 8, No. 3. – P. 261. – DOI 10.3390/electronics8030261 **Scopus, Web of Science (Q2).**

35. Chervyakov, N. Analysis of the quantization noise in discrete wavelet transform filters for 3D medical imaging / N. Chervyakov, P. Lyakhov, N. Nagornov // Applied Sciences (Switzerland). – 2020. – Vol. 10, No. 4. – P. 1223. – DOI 10.3390/app10041223. **Scopus, Web of Science (Q2).**

36. Chervyakov, N. Analysis of the quantization noise in discrete wavelet transform filters for image processing / N. Chervyakov, P. Lyakhov, N. Nagornov [et al.] // Electronics. – 2018. – Vol. 7, No. 8. – P. 135. – DOI 10.3390/electronics7080135. **Scopus, Web of Science (Q2).**

37. Chervyakov, N. I. Residue Number System-Based Solution for Reducing the Hardware Cost of a Convolutional Neural Network / N. I. Chervyakov, P. A. Lyakhov, M. A. Deryabin [et al.] // Neurocomputing. – 2020. – Vol. 407. – P. 439-453. – DOI 10.1016/j.neucom.2020.04.018. **Scopus, Web of Science (Q1).**

38. Chervyakov, N. I. A division algorithm in a redundant residue number system using fractions / N. Chervyakov, P. Lyakhov, M. Babenko [et al.] // Applied Sciences (Switzerland). – 2020. – Vol. 10, No. 2. – P. 695. – DOI 10.3390/app10020695. **Scopus, Web of Science (Q2).**

39. Chervyakov, N. I. A new model to optimize the architecture of a fault-tolerant modular neurocomputer / N. I. Chervyakov, P. A. Lyakhov, M. G. Babenko [et al.] // Neurocomputing. – 2018. – Vol. 303. – P. 37-46. – DOI 10.1016/j.neucom.2018.04.028. **Scopus, Web of Science (Q1).**

40. Chervyakov, N. I. An Approximate Method for Comparing Modular Numbers and its Application to the Division of Numbers in Residue Number Systems / N. I. Chervyakov, M. G. Babenko, P. A. Lyakhov, I. N. Lavrinenko // Cybernetics and Systems Analysis. – 2014. – Vol. 50, No. 6. – P. 977-984. – DOI 10.1007/s10559-014-9689-2. **Scopus, Web of Science (Q3).**

41. Chervyakov, N. I. An efficient method of error correction in fault-tolerant modular neurocomputers / N. I. Chervyakov, P. A. Lyakhov, M. G. Babenko [et al.] // Neurocomputing. – 2016. – Vol. 205. – P. 32-44. – DOI 10.1016/j.neucom.2016.03.041. **Scopus, Web of Science (Q1).**

42. Chervyakov, N. I. Comparison of modular numbers based on the chinese remainder theorem with fractional values / N. I. Chervyakov, P. A. Lyakhov, M. G. Babenko [et al.] // Automatic Control and Computer Sciences. – 2015. – Vol. 49, No. 6. – P. 354-365. – DOI 10.3103/S0146411615060048. **Scopus, Web of Science (Q4).**

43. Chervyakov, N. I. Digital filtering of images in a residue number system using finite-field wavelets / N. I. Chervyakov, P. A. Lyakhov, M. G. Babenko // *Automatic Control and Computer Sciences*. – 2014. – Vol. 48, No. 3. – P. 180-189. – DOI 10.3103/S0146411614030031. **Scopus, Web of Science (Q4)**.
44. Chervyakov, N. I. Hardware implementation of a convolutional neural network using calculations in the residue number system / N. I. Chervyakov, P. A. Lyakhov, N. N. Nagornov, M. V. Valueva, G. V. Valuev // *Computer Optics*. – 2019. – T. 43. – №. 5. – С. 857-868. **Scopus, Web of Science (Q3)**.
45. Chervyakov, N. I. Quantization noise of multilevel discrete wavelet transform filters in image processing / N. I. Chervyakov, P. A. Lyakhov, N. N. Nagornov // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2018. – T. 54. – P. 608-616. <https://doi.org/10.3103/S8756699018060092>. **Scopus, Web of Science (Q3)**.
46. Chervyakov, N. I. Residue-to-binary conversion for general moduli sets based on approximate Chinese remainder theorem / N. I. Chervyakov, P. A. Lyakhov, M. G. Babenko [et al.] // *International Journal of Computer Mathematics*. – 2017. – Vol. 94, No. 9. – P. 1833-1849. – DOI 10.1080/00207160.2016.1247439. **Scopus, Web of Science (Q2)**.
47. Chervyakov, N. I. The architecture of a fault-tolerant modular neurocomputer based on modular number projections / N. I. Chervyakov, P. A. Lyakhov, M. G. Babenko [et al.] // *Neurocomputing*. – 2018. – Vol. 272. – P. 96-107. – DOI 10.1016/j.neucom.2017.06.063. **Scopus, Web of Science (Q1)**.
48. Kaplun, D. Improving calculation accuracy of digital filters based on finite field algebra / D. Kaplun, P. Lyakhov, D. Butusov [et al.] // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2020. – Vol. 10, No. 1. – P. 45. – DOI 10.3390/app10010045. **Scopus, Web of Science (Q2)**.
49. Lyakhov, P. A novel sign detection method in residue number system based on Chinese remainder theorem with fractional values / P. Lyakhov, M. Bergerman, R. Minenkov, Abdulkadirov, A. Abdulsalyamova, N. Nagornov, A. Voznesensky, D. Minenkov, D. Kaplun // *Microprocessors and Microsystems*. – 2023. – Vol. 102. – P. 104940. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2023.104940>. **Scopus, Web of Science (Q2)**.
50. Lyakhov, P. A. High-Performance Digital Filtering on Truncated Multiply-Accumulate Units in the Residue Number System / P. Lyakhov, M. Valueva, G. Valuev, N. Nagornov // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 209181-209190. – DOI 10.1109/ACCESS.2020.3038496. **Scopus, Web of Science (Q1)**.
51. Lyakhov, P. A. A method of increasing digital filter performance based on truncated multiply-accumulate units / P. Lyakhov, M. Valueva, G. Valuev, N. Nagornov // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2020. – Vol. 10, No. 24. – P. 1-11. – DOI 10.3390/app10249052. **Scopus, Web of Science (Q2)**.
52. Lyakhov, P. A. Designing of High-Performance Digital Filters using the Balanced Residue Number System Moduli Set / P.A. Lyakhov, N.N. Nagornov, M. V. Bergerman, A.S., Abdulsalyamova, R.I. Abdulkadirov // *Programming and Computer Software*. – 2025. – T. 51. – №. 5. – P. 327-339. **Scopus, Web of Science (Q4)**.
53. Lyakhov, P. A. Area-Efficient digital filtering based on truncated multiply-accumulate units in residue number system $2n-1$, $2n$, $2n+1$ // *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*. – 2023. – Vol. 35. – №. 6. – P. 101574. **Scopus, Web of Science (Q1)**.
54. Lyakhov, P. A. Development of digital image processing algorithms based on the Winograd method in general form and analysis of their computational complexity / P.A. Lyakhov, N.N. Nagornov, N. F. Semyonova, A.S Abdulsalyamova // *Computer Optics*. – 2023. – T. 47. – №. 1. – P. 66-78. **Scopus, Web of Science (Q3)**.
55. Lyakhov, P. A. Reducing the Computational Complexity of Image Processing Using Wavelet Transform Based on the Winograd Method / P. A. Lyakhov, N. N. Nagornov, N. F. Semyonova, A. S. Abdulsalyamova // *Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications*. – 2023. – Vol. 33, No. 2. – P. 184-191. – DOI 10.1134/S1054661823020074. **Scopus, Web of Science (Q3)**.
56. Lyakhov, P. High-Speed Wavelet Image Processing Using the Winograd Method with Downsampling / P. Lyakhov, N. Semyonova, N. Nagornov, M. Bergerman, A. Abdulsalyamova //

Mathematics. – 2023. – Vol. 11. – №. 22. – P. 4644. <https://doi.org/10.3390/math11224644>. **Scopus, Web of Science (Q1).**

57. Nagornov, N. N. RNS-Based FPGA Accelerators for High-Quality 3D Medical Image Wavelet Processing Using Scaled Filter Coefficients / N. N. Nagornov, P. A. Lyakhov, M. V. Valueva, M. V. Bergerman // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 19215-19231. – DOI 10.1109/ACCESS.2022.3151361. **Scopus, Web of Science (Q1).**

58. Pettenghi, H. Efficient RNS Reverse Converters for Moduli Sets with Dynamic Ranges Up to $(10n+1)$ -bit / H. Pettenghi, R. Paludo, R. Matos, P. A. Lyakhov // Circuits, Systems, and Signal Processing. – 2018. – Vol. 37, No. 11. – P. 5178-5196. – DOI 10.1007/s00034-018-0815-7. **Scopus, Web of Science (Q3).**

59. Valueva, M. Construction of residue number system using hardware efficient diagonal function / M. Valueva, G. Valuev, P. Lyakhov [et al.] // Electronics. – 2019. – Vol. 8, No. 6. – P. 694. – DOI 10.3390/electronics8060694. **Scopus, Web of Science (Q2).**

60. Valueva, M. Digital Filter Architecture with Calculations in the Residue Number System by Winograd Method $F(2 \times 2, 2 \times 2)$ / M. Valueva, P. Lyakhov, G. Valuev, N. Nagornov // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 143331-143340. – DOI 10.1109/ACCESS.2021.3121520. **Scopus, Web of Science (Q1).**

61. Valueva, M. V. Application of the residue number system to reduce hardware costs of the convolutional neural network implementation / M. V. Valueva, P. A. Lyakhov, G. V. Valuev [et al.] // Mathematics and Computers in Simulation. – 2020. – Vol. 177. – P. 232-243. – DOI 10.1016/j.matcom.2020.04.031 **Scopus, Web of Science (Q1).**

62. Valueva, M. V. High-performance digital image filtering architectures in the residue number system based on the Winograd method/ M.V. Valueva, P.A. Lyakhov, N.N. Nagornov, G.V. Valuev //Computer Optics. – 2022. – T. 46. – №. 5. – С. 752-762. **Scopus, Web of Science (Q3).**

Патенты на изобретения

63. Патент № 2559771 С2 РФ, МПК G06F 7/72. устройство для основного деления модулярных чисел: № 2013148505/08: заявл. 30.10.2013: опубл. 10.08.2015 / Н. И. Червяков, М. Г. Бабенко, П. А. Ляхов, И. Н. Лавриненко.

64. Патент № 2503995 С2 РФ, МПК G06F 7/72. Устройство для определения знака модулярного числа: № 2011139278/08: заявл. 26.09.2011: опубл. 10.01.2014 / Н. И. Червяков, М. Г. Бабенко, П. А. Ляхов [и др.].

65. Патент № 2559772 С2 РФ, МПК G06F 7/72. устройство для основного деления модулярных чисел в формате системы остаточных классов: № 2013149446/08: заявл. 06.11.2013: опубл. 10.08.2015 / Н. И. Червяков, М. Г. Бабенко, П. А. Ляхов [и др.].

66. Патент № 2503992 С2 РФ, МПК G06F 7/02, G06F 7/72. Устройство для сравнения чисел, представленных в системе остаточных классов: № 2011139397/08: заявл. 27.09.2011: опубл. 10.01.2014 / Н. И. Червяков, М. Г. Бабенко, П. А. Ляхов [и др.].

67. Патент № 2483346 С1 РФ, МПК G06F 11/08, G06F 7/72. Устройство для обнаружения переполнения динамического диапазона, определения ошибки и локализации неисправности вычислительного канала в ЭВМ, функционирующих в системе остаточных классов: № 2011145755/08: заявл. 10.11.2011: опубл. 27.05.2013 / Н. И. Червяков, М. Г. Бабенко, П. А. Ляхов [и др.].

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

68. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023616462 РФ. Среда моделирования цифровой обработки сигналов в системе остаточных классов на основе фильтра с конечной импульсной характеристикой: № 2023615241: заявл. 22.03.2023: опубл. 28.03.2023 / П. А. Ляхов, Н. Н. Нагорнов, М. В. Бергерман, А. Ш. Абдулсалимова.

69. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021619007 РФ. Среда аппаратного моделирования фильтрации изображений по методу Винограда: № 2021618215: заявл. 31.05.2021: опубл. 03.06.2021 / М. В. Валуева, П. А. Ляхов, Н. Н. Нагорнов, Г. В. Валуев.

70. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021619598 РФ. Среда прогнозирования аппаратной и временной сложности микроэлектронных вычислительных устройств: № 2021618478: заявл. 31.05.2021: опубл. 15.06.2021 / П. А. Ляхов, М. В. Бергерман.

71. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020612962 РФ. Среда аппаратного моделирования дискретного вейвлет-преобразования в системе остаточных классов для медицинской визуализации: № 2020611770: заявл. 25.02.2020: опубл. 06.03.2020 / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, М. В. Валуева, Н. Н. Нагорнов.

72. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020612961 РФ. Среда аппаратного моделирования дискретного вейвлет-преобразования с квантованными коэффициентами для обработки медицинских изображений: № 2020611741: заявл. 25.02.2020: опубл. 06.03.2020 / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, М. В. Валуева [и др.].

73. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019612363 РФ. Программа вычисления максимальной погрешности дискретного вейвлет-преобразования трехмерных медицинских изображений: № 2019611156: заявл. 18.01.2019: опубл. 18.02.2019 / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, Н. Н. Нагорнов.

74. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018613585 РФ. Программа реализации метода сглаживающей фильтрации изображений в СОК: № 2018610959: заявл. 02.02.2018: опубл. 19.03.2018 / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, Н. Н. Нагорнов, М. В. Валуева.

75. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017617504 РФ. Среда моделирования распознавания изображений с использованием сверточных нейронных сетей: № 2017614396: заявл. 12.05.2017: опубл. 05.07.2017 / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, М. В. Валуева, Д. И. Калита.

76. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017613716 РФ. Среда моделирования пространственной фильтрации изображений: № 2017610863: заявл. 02.02.2017: опубл. 27.03.2017 / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, К. С. Шульженко [и др.].

77. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017613768 РФ. Среда моделирования выделения контуров изображений с использованием вычислений в системе остаточных классов: № 2017610875: заявл. 02.02.2017: опубл. 29.03.2017 / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, А. В. Гладков, К. С. Шульженко.

78. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016617258 РФ. Среда моделирования цифровой фильтрации изображений в системе остаточных классов с модулями специального вида: № 2016614485: заявл. 04.05.2016: опубл. 29.06.2016 / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, К. С. Шульженко [и др.].

79. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016610061 РФ. Среда моделирования цифровой фильтрации в системе остаточных классов с модулями специального вида: № 2015660741: заявл. 09.11.2015: опубл. 11.01.2016 / К. С. Шульженко, П. А. Ляхов, Н. И. Червяков, Д. И. Калита.

Автореферат диссертации

Ляхов Павел Алексеевич

**МЕТОДЫ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ ЦИФРОВОЙ
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЫЧИСЛЕНИЙ
В СИСТЕМЕ ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ**

Текст автореферата размещен на сайтах:

Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования
Российской Федерации
<https://vak.gisnauka.ru/>

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский
Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН)
<https://dc.spcras.ru/>

Подписано в печать «__» _____ 2026 г.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл.печ.л. 2,0. Тираж ____ экз.
Заказ № ____