На правах рукописи

Ляхов Павел Алексеевич

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ВЫЧИСЛЕНИЙ В СИСТЕМЕ ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ

Специальность 2.3.2 – Вычислительные системы и их элементы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Ставрополь, 2024

Работа выполнена…

Научный консультант: …

Официальные оппоненты:
1. …

2. …

3. …

Ведущая организация: …

Защита состоится …

С диссертацией можно ознакомиться…

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

…
…
…

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные устройства цифровой обработки изображений (ЦОИ) требуют больших вычислительных затрат и ресурсов для своего функционирования. Прежде всего это связано с непрерывным улучшением характеристик цифровых изображений, включая пространственный размер и цветовую глубину, и существенным повышением их количества. В совокупности это приводит к значительному возрастанию объема цифровой визуальной информации, которую нужно регистрировать, обрабатывать, хранить и передавать. В частности, ЦОИ использует значительное количество времени и памяти на всех этапах обработки, что особенно критично для устройств, работающих в режиме реального времени. При этом обработка изображений должна быть не только достаточно быстрой, но и максимально качественной. Существующие устройства не могут удовлетворить данные потребности, а темпы развития и совершенствования микроэлектроники и ее вычислительных мощностей значительно уступают темпам возрастания объема цифровой визуальной информации и роста вычислительной сложности методов ЦОИ, что представляет собой **противоречие в практике**. Таким образом, непрерывно растущая практическая потребность в повышении скорости вычислений делает все более актуальной проблему низкой производительности устройств ЦОИ. Сложившаяся ситуация побуждает исследователей к активному совершенствованию уже известных и разработке принципиально новых устройств обработки изображений, отвечающих современным требованиям и готовых к применению в различных сферах практической деятельности человека. Исходя из данной ситуации сформулирована **цель исследования**, заключающаяся в повышении производительности устройств ЦОИ. Достижение выбранной цели и успешное решение обозначенной проблемы окажут большое влияние на развитие таких направлений, как медицинская визуализация, медицинская диагностика, телемедицина, системы компьютерного зрения, робототехнические комплексы, беспилотный транспорт, спутниковые системы, цифровое сельское хозяйство, многочисленные приложения генеративного искусственного интеллекта.

Степень разработанности темы. Существует множество перспективных теоретических решений, способных повысить производительность устройств ЦОИ. В их число входят подходы, основанные на применении приближенных вычислений, учете неявной информационной избыточности, использовании блоков реализации арифметических 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 устройств на их основе. Приближение к пределу миниатюризации технологических процессов производства микроэлектронной техники на основе кремниевых технологий требует изменения подходов к организации вычислений в цифровых устройствах, особенно для использования во встраиваемых проблемно-ориентированных процессорах. Среди различных альтернативных числовых систем, расширяющих вычислительные возможности и

повышающих производительность устройств 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 вычислительных алгоритмов цифровой обработки сигналов. Успешность решений в области развития модулярной арифметики подтверждается в том числе значительным вкладом в теорию модулярных вычислений и их приложений отечественными и зарубежными исследователями, такими как И. Я. Акушский, В. М. Амербаев, Н. И. Червяков, Д. И. Юдицкий, О. А. Финько, А. И. Галушкин, В. А. Торгашев, N. Szabo, M. Valach, H. L. Garner, A. S. Fraenkel, A. Huang, B. Parhami, W. Ienkns, H. Krisha, A. Omondi, A. Premkumar, I. Ramires, A. Curcik, L.Yang, D. Zhang, P Steffan, G. Pirlo, L. Sousa и другие. Однако, несмотря на высокий потенциал в повышении производительности устройств ЦОИ, 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 ЦОИ. Требуется развитие методологии применения СОК для эффективной по скорости вычислений реализации алгоритмов и архитектур, а также адаптация блоков реализации арифметических операций для модулярных вычислений при обработке многомерных сигналов. Помимо этого, необходимо разработать подходы к ЦОИ, основанные на комбинированном применении методов организации арифметической 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 СОК, отсутствует методологический аппарат использования СОК для организации вычислений в устройствах ЦОИ. Для разрешения данного противоречия обозначена **научная проблема**: необходимость разработки методов, алгоритмов и архитектур на основе СОК для повышения производительности устройств ЦОИ.

На основании проведенного анализа определены объект и предмет исследования. **Объектом исследования** являются устройства ЦОИ. В качестве **предмета исследования** выступают методы организации арифметической обработки данных в устройствах ЦОИ. Для решения обозначенной общей научной проблемы проведена ее декомпозиция на ряд частных задач.

1. Аналитический обзор современных проблем и подходов к улучшению эксплуатационных характеристик устройств цифровой обработки изображений.

2. Разработка метода цифровой фильтрации сигналов с организацией арифметической обработки данных в системе остаточных классов.

3. Разработка методов высокопроизводительной фильтрации цифровых изображений на основе матричных вычислений.

4. Разработка методов и алгоритмов организации арифметической обработки данных, представленных в системе остаточных классов, при выполнении немодульных операций.

5. Разработка методов и алгоритмов вейвлет-преобразования изображений с арифметической обработкой в системе остаточных классов.

6. Разработка нейросетевых архитектур с арифметической обработкой данных в системе остаточных классов.

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, аппаратного моделирования на программируемых пользователем вентильных матрицах (ППВМ, FPGA) и интегральных схемах специального назначения (ИССН, ASIC) в средах Xilinx ISE, Xilinx Vivado Design Suite, Yosys, OpenLane и Synopsys Design Compiler.

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

1. Разработан метод цифровой фильтрации сигналов с организацией арифметической обработки данных в системе остаточных классов с модулями специального вида.

2. Предложен метод высокопроизводительной вейвлет-фильтрации изображений на основе матричных вычислений с уменьшением количества используемых умножений.

3. Разработан метод организации матричных вычислений при вейвлет-обработке цифровых изображений с понижающей дискретизацией.

4. Разработан метод обратного преобразования чисел системы из остаточных классов в позиционную систему счисления на основе Китайской теоремы об остатках с дробными величинами.

5. Разработан алгоритм определения знака числа, представленного в системе остаточных классов, на основе Китайской теоремы об остатках с дробными величинами.

6. Разработан алгоритм сравнения чисел в системе остаточных классов на основе Китайской теоремы об остатках с дробными величинами.

7. Разработана архитектура блока обнаружения, локализации и исправления ошибок в системе остаточных классов на основе Китайской теоремы об остатках с дробными величинами.

8. Предложен алгоритм масштабирования коэффициентов вейвлет-фильтров для обработки изображений в системе остаточных классов.

9. Разработан метод вейвлет-обработки изображений с использованием масштабированных коэффициентов и арифметической обработкой в системе остаточных классов.

10. Разработан метод цифровой обработки изображений с использованием вейвлетов над конечными полями в системе остаточных классов.

11. Разработана архитектура нейронной сети с реализацией сверточных вычислений в системе остаточных классов.

12. Разработана архитектура отказоустойчивой сети Хопфилда с организацией арифметической обработки данных в системе остаточных классов.

Практическая и теоретическая значимость. Работа носит теоретический характер. Полученные результаты позволяют проектировать архитектуры устройств цифровой обработки изображений на основе вычислений в системе остаточных классов. Разработанные методы способствуют повышению производительности архитектур и устройств цифровой обработки изображений. Разработанные программные продукты и аппаратные решения, зарегистрированные в соответствующем порядке, способствуют улучшению эксплуатационных характеристик устройств цифровой обработки изображений. Практическая и теоретическая значимость полученных результатов и вклад диссертанта в развитие соответствующей отрасли знаний подтверждаются цитированием опубликованных результатов в международных научных изданиях: 680 ссылок в Web of Science (*h*-index=12), 1012 ссылок в Scopus (*h*-index=15).

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Метод цифровой фильтрации сигналов с организацией арифметической обработки данных в системе остаточных классов с модулями специального вида.
2. Методы высокопроизводительной вейвлет-фильтрации цифровых изображений на основе матричных вычислений с понижающей дискретизацией.
3. Методы, алгоритмы и архитектуры организации арифметической обработки данных, представленных в системе остаточных классов, при выполнении немодульных операций на основе Китайской теоремы об остатках с дробными величинами.
4. Методы и алгоритмы дискретного вейвлет-преобразования изображений с использованием масштабированных коэффициентов и арифметической обработкой в системе остаточных классов.
5. Высокопроизводительные и отказоустойчивые архитектуры нейронных сетей на основе арифметической обработки данных в системе остаточных классов.

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.

ООО «Техкомпания Хуавей»

1. «Перемножение матриц FP16 в СОК с потенциальными потерями точности» (Проект № TC20221220108), 2023.

2. «Исследование применения системы остаточных классов для адаптивного фильтра с конечной импульсной характеристикой» (Проект № TC20211210654), 2022.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов подтверждена корректным и обоснованным применением классических методов исследования, строгими доказательствами и результатами анализа эффективности разработанных методов и архитектур на базе вычислительных платформ FPGA и ASIC. Результаты согласуются с проведенными экспериментами.

Моделирование и вычислительные эксперименты проведены с использованием программных пакетов: 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 ВАК 2.3.2 (05.13.05) – «Вычислительные системы и их элементы».

4. Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования вычислительных систем и их элементов в нормальных и экстремальных условиях с целью улучшения их технико-экономических и эксплуатационных характеристик.

5. Разработка научных методов и алгоритмов организации арифметической, логической, символьной и специальной обработки данных, хранения и ввода-вывода информации.

6. Разработка научных подходов и методов, архитектурных и структурных решений, обеспечивающих эффективную техническую реализацию аппаратно-программных систем и комплексов за счет оптимизации применяемой электронной компонентной базы, элементов вычислительных систем и встраиваемого программного обеспечения.

7. Разработка научных методов и алгоритмов организации параллельной и распределенной обработки информации, многопроцессорных, многоядерных, многомашинных и специальных вычислительных систем.

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

Российские конференции.

1. Научно-практическая конференция Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука - региону», Естественные науки - основа настоящего и фундамент для будущего, Ставрополь, 2019.
2. Параллельная компьютерная алгебра, Ставрополь, 2010.
3. Студенческая наука для развития информационного общества, Ставрополь, 2020.
4. Параллельная компьютерная алгебра и её приложения в новых инфокоммуникационных системах, Ставрополь, 2014.
5. Перспективы развития информационных технологий, Новосибирск, 2011.

Международные конференции.

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. Journal of Physics: Conference Series, Krasnoyarsk, Russia, 2019, 2020.
5. 23rd Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Bologna, Italy, 2018.
6. XV International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY), Saint Petersburg, Russia, 2016.
7. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Omsk, Russia, 2015.
8. International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT), Dolgoprudny, Russia, 2014.
9. Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Budva, Montenegro 2019, 2020, 2021, 2022.
10. Third International Conference on Digital Information Processing, Data Mining, and Wireless Communications (DIPDMWC), Moscow, Russia, 2016.
11. International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Novosibirsk, Russia, 2017.
12. 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Budapest, Hungary, 2019.
13. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Saint Petersburg, Russia, 2019, 2020.
14. Seminar on Signal Processing, Saint Petersburg, Russia, 2023.
15. 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], 30 статей в журналах, индексируемых в международных базах Scopus и/или Web of Science [4-33], 26 статей в журналах списка, рекомендованного ВАК [34-59], 53 работы – в сборниках трудов российских и международных конференций [77-129], получено 5 патентов на изобретения [60-64] и 12 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ [65-76].

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 модулярной арифметики в цифровой обработке сигналов. В коллективной монографии [3] автором написана глава 9, посвященная цифровой обработке изображений на основе системы остаточных классов. В статьях [22-24, 37, 39, 44, 53-56, 58] автором разработаны методы цифровой фильтрации сигналов с организацией арифметической обработки данных в системе остаточных классов. В статьях [25-27, 31, 33] автором предложены архитектуры цифровых фильтров на основе метода Винограда и системы остаточных классов. В статьях [4-6, 10, 12, 14, 18, 21, 29, 30, 35, 42, 45, 47, 49-52, 59] автором разработаны методы организации арифметической обработки данных, представленных в

системе остаточных классов, при выполнении немодульных операций. В статьях [7, 8, 15, 17, 20, 28, 34, 36, 38, 40, 41, 46, 48, 57] автором предложены методы организации дискретного вейвлет-преобразования изображений с арифметической обработкой в системе остаточных классов. В статьях [9, 11, 13, 16, 19, 32, 43] автором разработаны методы организации арифметической обработки данных в нейронных сетях 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 2 приложений с патентами и свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ. Общий объем основного текста работы – 449 страниц, включая 55 таблиц и 117 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Анализ современных трендов по улучшению эксплуатационных характеристик устройств ЦОИ позволил составить и структурировать набор наиболее актуальных и перспективных подходов. В рамках главы проанализировано текущее состояние исследований по применению различных вычислительных методов, а также архитектурных и структурных решений к улучшению эксплуатационных характеристик устройств ЦОИ, наиболее широко освещаемыми и часто используемыми из которых являются: использование приближенных вычислений; модификация вычислительных элементов; реализация свертки в форме матричных вычислений методом Винограда; использование альтернативных систем счисления; аппаратные ускорители на основе ППВМ и ИССН. В качестве одного из наиболее перспективных подходов к повышению производительности устройств ЦОИ выделена СОК, позволяющая улучшить эксплуатационные характеристики устройств за счет встроенного параллелизма при реализации арифметических операций с использованием величин малой разрядности. Отмечена необходимость в развитии методологии СОК для эффективной по ресурсозатратам реализации методов и алгоритмов ЦОИ на современных устройствах вычислительной техники и разработке подходов на основе комбинированного применения методов организации арифметической

обработки данных в СОК и иных решений, сочетающихся с СОК и позволяющих значимо усилить ее преимущества и в значительной степени нивелировать ее недостатки. Исходя из этого, обозначена научная проблема диссертационного исследования, заключающаяся в необходимости разработки методов, алгоритмов и архитектур на основе СОК для повышения производительности устройств ЦОИ, и разделена на частные задачи.

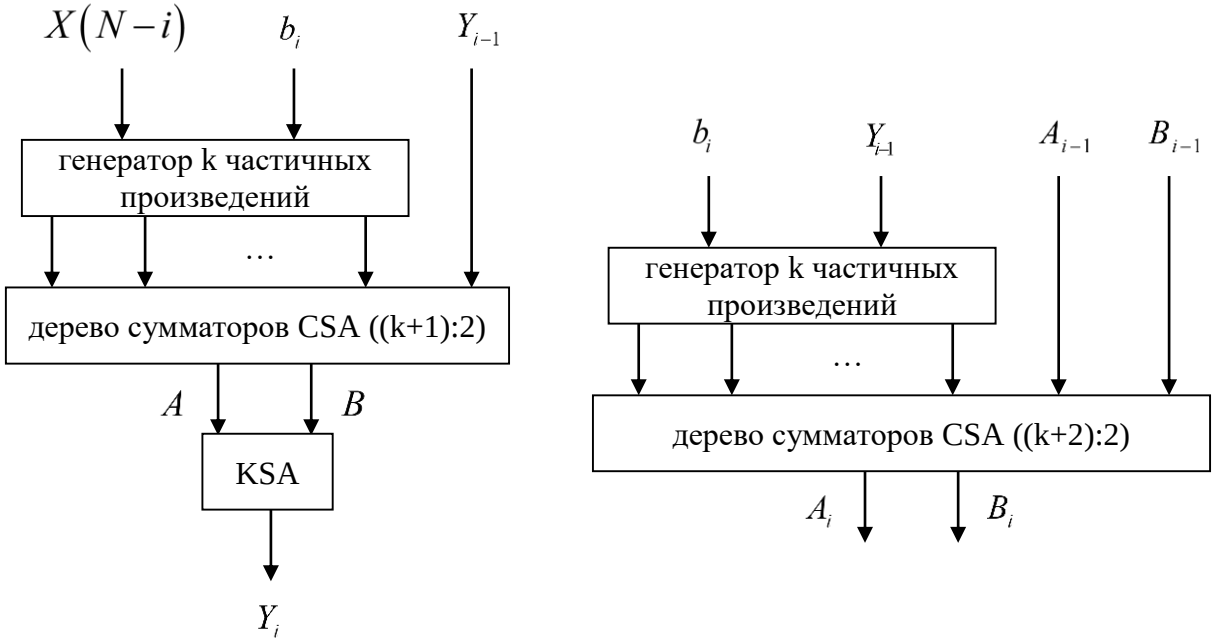
Во второй главе разработан метод организации арифметической обработки данных в СОК при цифровой фильтрации сигналов, основанный на математическом описании цифровых фильтров в СОК, как на уровне структурной организации арифметических блоков, так и на уровне побитового выполнения операций в этих блоках. Представленный метод организации параллельной обработки данных подвергнут теоретическому анализу скорости работы и аппаратных затрат на его реализацию с использованием методики unit-gate model (UGM), позволяющей оценить параметры цифрового устройства, спроектированного на базе ППВМ или ИССН. Основные теоретические и практические результаты главы представлены далее.

Установлено, что наиболее эффективными по совокупности показателей скорости и аппаратных затрат выполнения модульных операций являются модули СОК специального вида: 2^k или 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 арифметических действий выполнения обработки данных при цифровой фильтрации сигналов и может быть оправдан лишь при табличной организации вычислений.

Выявлено, что при реализации ЦФ вместо блоков умножения с накоплением (MAC-блоки) могут использоваться усеченные MAC-блоки (TMAC-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 на до 29% по сравнению с известной реализацией ЦФ в MAC-блоках, в том числе использующих сумматоры с распространением переносов (CPA). Структура MAC- и TMAC-блоков представлена на рисунке 1, где: b_i – коэффициенты фильтра; $X(N)$ – отсчеты исходного сигнала; A_i и B_i – выходы дерева сумматоров с соответствующего блока; $Y(N)$ – отсчеты обработанного сигнала.

Установлено, что применение метода организации арифметической обработки данных в СОК вида $\left\{2^{k_1}, 2^{k_2}-1, 2^{k_3}-1, \ldots, 2^{k_n}-1\right\}$ для реализации ЦФ порядка K по модулю вида $m=2^k$ (рисунок 2) и модулям вида 2^k-1 (рисунок 3) с использованием техники с циклическим подключением старшего переноса (EAC) уменьшает вычислительную задержку и аппаратные затраты на ЦОС до 1,8 и 4,8

раз, соответственно. Увеличение количества модулей СОК позволяет получить лучший результат по совокупности эксплуатационных показателей устройства ЦОС в сравнении с СОК с меньшим числом модулей.



а) б)

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

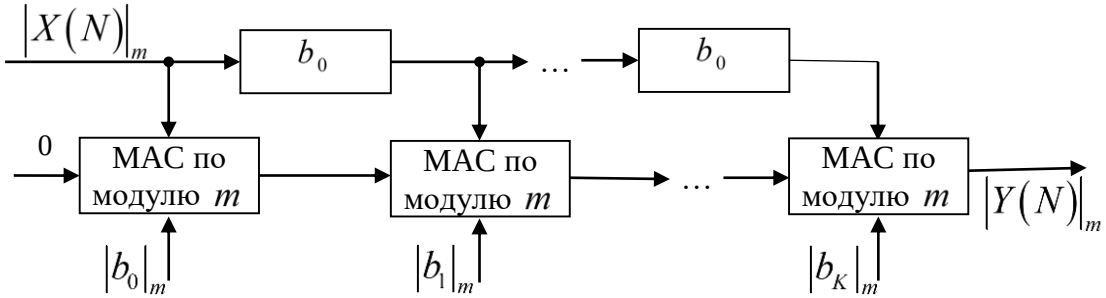


Рисунок 2 – Схема цифрового фильтра порядка K по модулю m

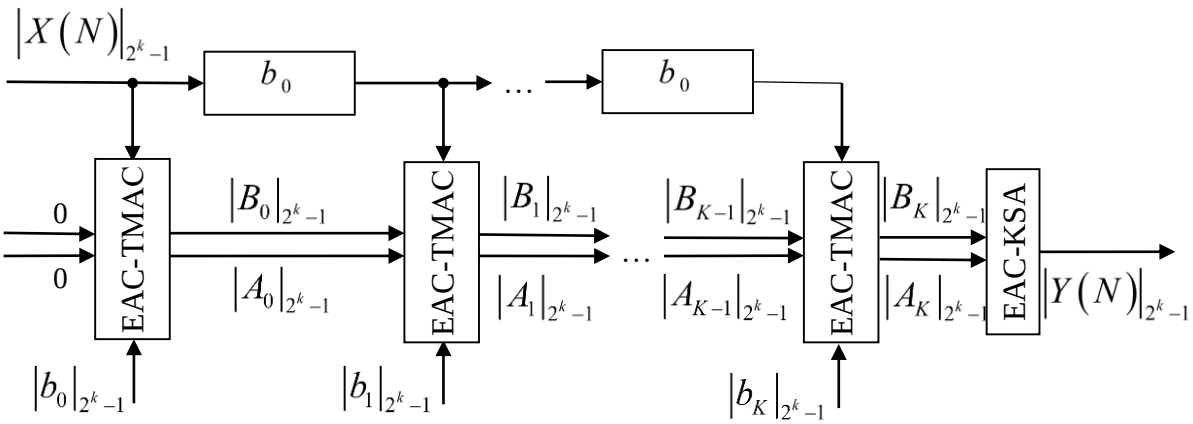


Рисунок 3 – Схема цифрового фильтра порядка K по модулю 2^k-1

Аппаратная реализация на ИССН показала, что использование реализации ЦФ, построенного на основе метода организации арифметической обработки со сбалансированной СОК вида $\{2^k-1, 2^k, 2^k+1\}$, позволяет снизить аппаратные затраты, однако уступает в быстродействии известным аналогам. Так, для 32-разрядного диапазона СОК, предложенный ЦФ позволил уменьшить аппаратные расходы до 23% и снизить энергопотребление до 22,3%, но при этом задержка устройства увеличилась в 2 раза (таблица 1). Для 48-разрядного диапазона СОК фильтр с модулями 2^k-1, 2^k и 2^k+1 позволил снизить аппаратные расходы до 14%, но увеличил задержку также в 2 раза (таблица 2).

Таблица 1 – Результаты аппаратного моделирования 32-разрядного фильтров с организацией арифметической обработки данных в СОК

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, мм^2	20724,69	20346,38	**16139,30**
	Задержка, нс	**2,37**	3,49	4,37
	Мощность, мВт	9,90	9,88	**7,78**
	Площадь×задержка	**49117,51**	71008,86	70528,74
7-ой порядок	Площадь, мм^2	40456,07	40074,16	**31152,99**
	Задержка, нс	**3,62**	4,71	7,79
	Мощность, мВт	19,28	19,25	**15,03**
	Площадь×задержка	**146450,98**	188749,30	242681,82
15-ый порядок	Площадь, мм^2	79856,12	79465,79	**62507,06**
	Задержка, нс	**6,27**	7,38	14,53
	Мощность, мВт	38,00	37,98	**29,52**
	Площадь×задержка	**500697,86**	586457,51	908227,53
31-ый порядок	Площадь, мм^2	161175,75	160775,37	**126564,46**
	Задержка, нс	**18,77**	22,23	27,89
	Мощность, мВт	75,38	75,36	**58,57**
	Площадь×задержка	**3025268,89**	3574036,40	3529882,82

Таблица 2 – Результаты аппаратного моделирования 48-разрядных фильтров с организацией арифметической обработки данных в СОК

Набор модулей		31, 127, 255, 511, 512, 2047 на основе сумматоров KSA	64, 59, 53, 47, 43, 41, 37, 35, 33	31, 127, 255, 511, 512, 2047 на основе сумматоров CPA	17, 31, 32, 33, 65, 127, 257, 511 (предложенный)
3-ий порядок	Площадь, мм^2	31666,72	36751,78	**31144,03**	31490,98
	Задержка, нс	**2,38**	3,75	3,49	4,32
	Мощность, мВт	**14,59**	17,13	**14,59**	14,99
	Площадь× задержка	**75336,79**	137819,18	108692,65	136041,01
7-ой порядок	Площадь, мм^2	62127,76	68714,95	61594,35	**61075,75**
	Задержка, нс	**4,45**	5,08	5,54	6,28
	Мощность, мВт	**28,52**	32,12	**28,52**	29,00
	Площадь× задержка	**276468,55**	349071,94	341232,68	383555,68
15-ый порядок	Площадь, мм^2	125086,50	135060,56	124534,72	**122237,34**
	Задержка, нс	**6,31**	7,65	7,39	9,78
	Мощность, мВт	**56,43**	62,02	**56,43**	57,23
	Площадь× задержка	**789295,81**	1033213,29	920311,55	1195481,19
31-ый порядок	Площадь, мм^2	252268,54	273103,34	251700,26	**247278,22**
	Задержка, нс	18,79	**11,56**	22,25	30,94
	Мощность, мВт	**111,90**	121,84	111,91	113,48
	Площадь× задержка	4740125,90	**3157074,67**	5600330,84	7650788,19

Третья глава посвящена разработке методов повышения производительности устройств, реализующих различные алгоритмы цифровой фильтрации изображений. Предлагаемые разработки основываются на реализации вычислений в матричной форме с понижением избыточности вычислений и сокращением количества используемых операций. Производительность устройства повышается за счет эффективного распараллеливания вычислений с получением нескольких значений яркости обработанных пикселей на выходе каждого вычислительного канала за одну итерацию. Теоретическая оценка

эксплуатационных характеристик реализации разработанных методов на основе UGM и аппаратная реализация продемонстрировали значительное повышение скорости вычислений и производительности устройств на базе ППВМ. Основные теоретические и практические результаты главы представлены далее.

Проанализированы подходы к организации матричных вычислений методом Винограда (МВ) для повышения скорости работы методов цифровой фильтрации изображений при их реализации на современных микроэлектронных устройствах. МВ использует вспомогательные матрицы преобразования для организации матричных вычислений, вид которых зависит от параметров обрабатываемого изображения, цифровых фильтров и точек многочлена Лагранжа, применяемых для составления матрицы Вандермонда. Выбраны наиболее эффективные с точки вычислительной сложности наборы точек, используемые далее для оценки эксплуатационных характеристик устройств цифровой фильтрации изображений МВ.

Предложена методика для оценки эксплуатационных характеристик устройства, реализующего цифровую фильтрацию в матричной форме 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 изображений на основе МВ. Результаты оценки на основе предложенной методики с использованием UGM показали, что организация матричных вычислений МВ снижает вычислительную сложность цифровой фильтрации изображений до 84% при неизменном качестве обработки визуальных данных.

Разработан метод вейвлет-фильтрации изображений, осуществляемой по формуле (1), на основе матричных вычислений, представленных в формуле (2).

$$I'(x,y)=\sum_{i=1}^{r} I(x-i,y)\cdot r_i,\;\; I''(x,y)=\sum_{i=1}^{r} I'(x,y-i)\cdot r_i, \qquad (1)$$

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

$$M = A^T\left((GR)\odot\left(B^T N\right)\right), \qquad (2)$$

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; $\odot$ – 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 (ВО) 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 до 72,9%. Оценка эксплуатационных характеристик устройства на основе предложенной методики показала, что разработанный метод реализации вейвлет-фильтрации на основе матричных вычислений МВ повышает производительность устройства ЦОИ до 73,62% и уменьшает аппаратные затраты до 34,03% за счет понижения количества используемых операций умножения. Сделан вывод, что при использовании вейвлетов высокого порядка целесообразно разделить ВФ на составляющие для уменьшения размера вспомогательных матриц преобразования.

Разработан метод организации матричных вычислений при одномерной цифровой фильтрации изображений с понижающей дискретизацией. Выведены формулы (3) и (4) для реализации сверточных вычислений при любых значениях шага свертки одномерного фильтра с двумерным изображением в виде комбинации МВ с различными параметрами.

$$F(m,r,d)=s_2\cdot F(m,s_1+1)+(d-s_2)\cdot F(m,s_1), \quad (3)$$

$$F(m,r,d)=d\cdot F(m,s_1), \quad (4)$$

где: d – шаг свертки; s_1 и s_2 – неполное частное и остаток от деления r на d, соответственно. Формула (3) принимает вид (4), когда d делит r. Анализ эксплуатационных характеристик посредством аппаратного моделирования на ППВМ (рисунки 4-6) показал, что разработанный метод организации матричных вычислений при ВО изображений с понижающей в 2 раза дискретизацией повышает производительность устройства цифровой фильтрации до 66% при возрастании аппаратных и энергетических затрат до 95% и 344%, соответственно.

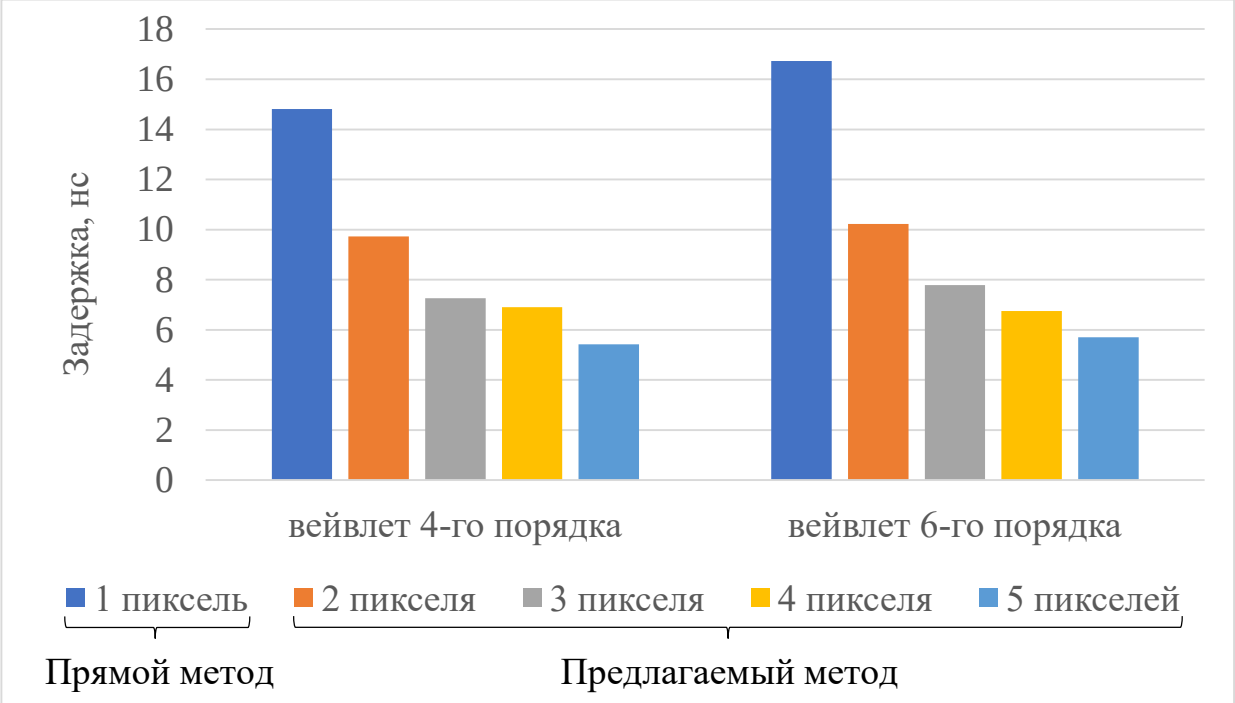


Рисунок 4 – Временны́е затраты на реализацию матричных вычислений при вейвлет-обработке двумерного 8-битного изображения с децимацией

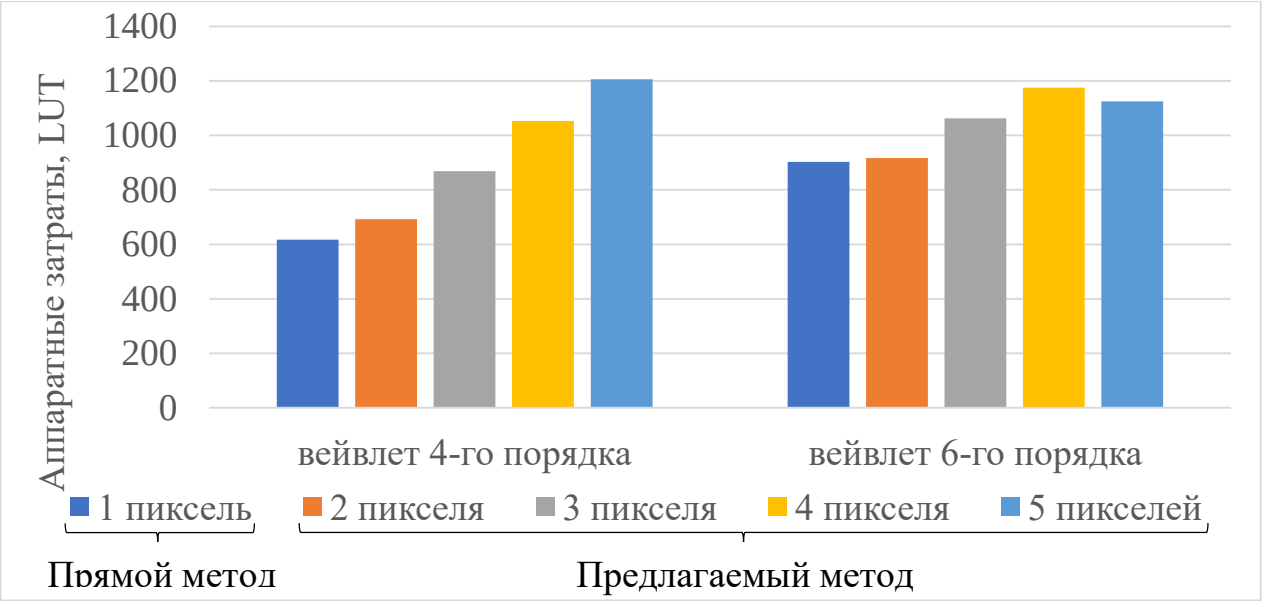


Рисунок 5 – Аппаратные затраты на реализацию матричных вычислений при вейвлет-обработке двумерного 8-битного изображения с децимацией

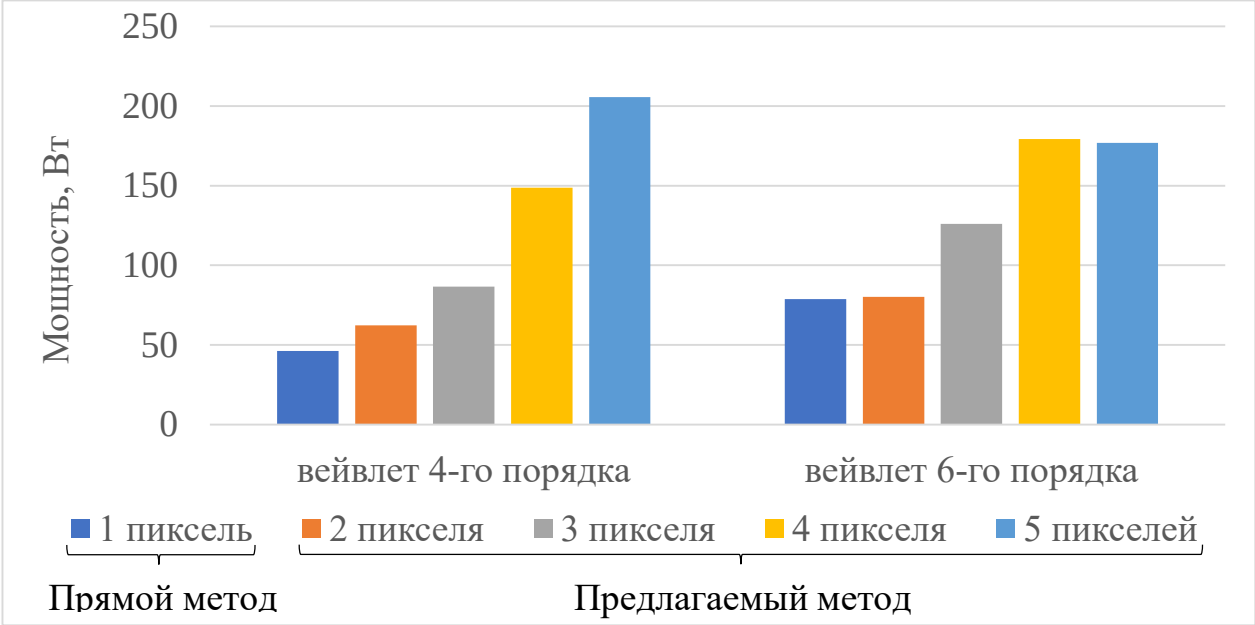


Рисунок 6 – Затраты мощности на реализацию матричных вычислений при вейвлет-обработке двумерного 8-битного изображения с децимацией

В **четвертой главе** изложены оригинальные методы и алгоритмы реализации немодульных операций в СОК. Предложены подходы к эффективной по ресурсозатратам аппаратной реализации операций обратного преобразования, определения знака, сравнения чисел и коррекции ошибок в модулярном коде. Основные теоретические и практические результаты главы представлены далее.

Разработана модифицированная версия Китайской теоремы об остатках (КТО) с дробными величинами (КТОд) для выполнения преобразования остатков в двоичный код. В СОК с модулями $\{m_1, m_2, ..., m_n\}$ число X представляется в виде

$\{x_1, x_2, .., x_n\}$, где $x_i \equiv |X|_{m_i}$. При этом обратное преобразование выполняется по формуле

$$X = \left| \sum_{i=1}^{n} \left(\left| M_i^{-1} \right|_{m_i} M_i \right) x_i \right|_M , \quad (5)$$

где $M_i = M/m_i$, а выражение $\left| M_i^{-1} \right|_{m_i}$ означает обратный элемент для M_i в мультипликативной группе кольца вычетов по модулю m_i. Аппаратная реализация операции по формуле (5) 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 (5) для выявления положения этого числа. Для этого поделим обозначенное выражение на некоторое число M:

$$\frac{X}{M} = \left| \sum_{i=1}^{n} x_i \frac{\left| M_i^{-1} \right|_{m_i} M_i}{M} \right|_1 = \left| \sum_{i=1}^{n} \alpha_i x_i \right|_1 , \quad (6)$$

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

$$\alpha_i = \frac{\left| M_i^{-1} \right|_{m_i} M_i}{M}. \quad (7)$$

В этом случае формула (6) преобразуется к виду

$$\frac{X}{M} = \left| \sum_{i=1}^{n} x_i \, \alpha_i \right|_1 . \quad (8)$$

Данное выражение можно записать в виде

$$X = \frac{X'M}{2^K}, \text{ где } X' = \left\lfloor 2^K \frac{X}{M} \right\rfloor = \left| \sum_{i=1}^{n} x_i \alpha'_i \right|_{2^N} . \quad (9)$$

Данный подход позволяет избежать операции вычисления остатка от деления на модуль M, тем самым уменьшив ресурсозатраты при аппаратной реализации модулярных вычислений. Предложенный метод вычисления существенно проясняет требуемое количество двоичных значений аналогичным избыточные оценкам, что позволяет вычислить с минимальным требуемым количеством обрабатываемых бит. Проведенное аппаратное моделирование показывает, что предложенный метод имеет в 1,4-2,4 и 2,1-4,7 раза бóльшую производительность, чем методы, основанные на применении КТО и обобщенной ПСС (ОПСС), соответственно. Таким образом, предложенный подход позволяет значительно повысить производительность вычислений при преобразовании цифровых данных.

Разработан алгоритм определения знака числа в СОК, также основанный на применении дробных величин, который может быть представлен следующей последовательностью действий.

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

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 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. Моделирование алгоритма показало, что предложенный алгоритм существенно превосходит по скорости вычислений известные аналоги на основе КТО и 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 алгоритм является универсальным и не привязан к какому-либо набору модулей. Аппаратная реализация алгоритмов определения знака числа в СОК на ППВМ показала (рисунки 7 и 8), что предложенный алгоритм повышает производительность устройства в 2,05-14,98 и в 3,57-27,14 раз, чем алгоритмы на основе КТО и ОПСС, соответственно, и требует в 1,05-2,08 и в 1,21-1,65 раз меньше аппаратных ресурсов (слайсов, *S*), чем алгоритмы на основе КТО и ОПСС, соответственно.

Для решения задачи сравнения двух чисел X и Y в модулярном коде представлен оригинальный подход на основе КТОд, в соответствии с которым необходимо выполнить следующую последовательность действий.

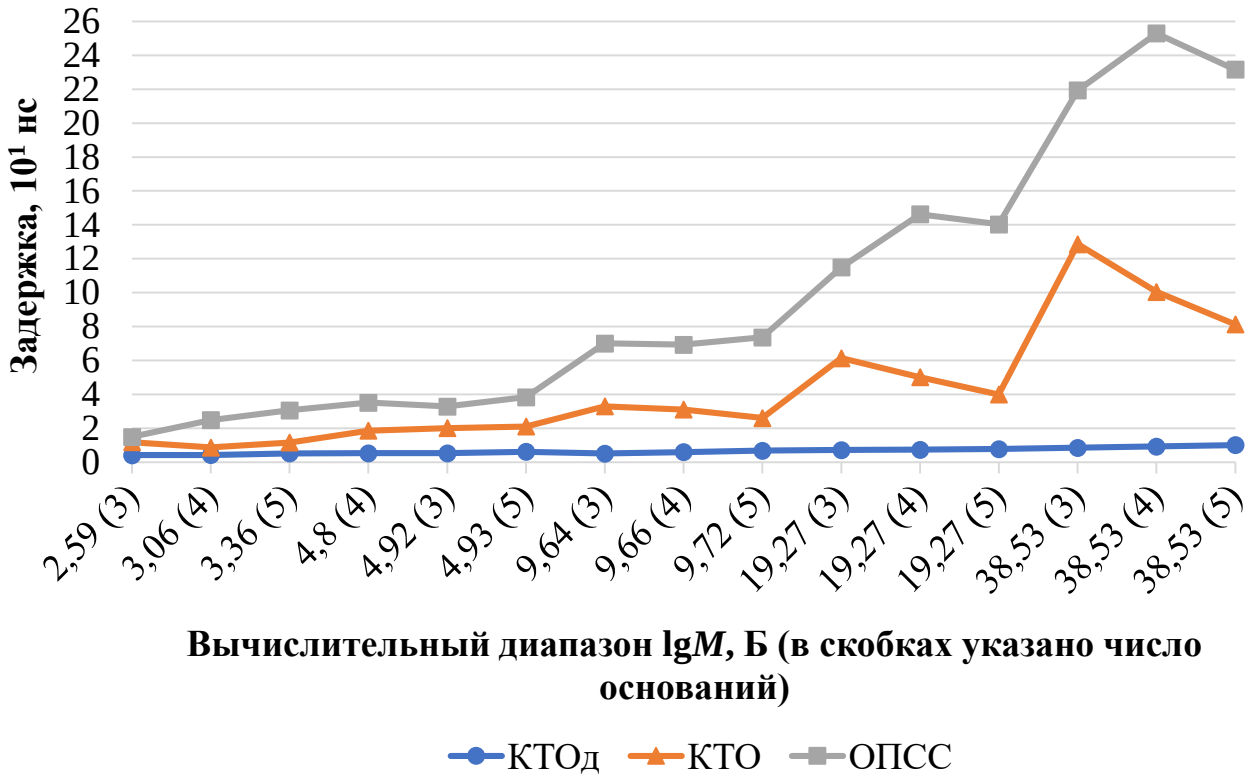


Рисунок 7 – Временны́е затраты (задержка) на определение знака числа в модулярном коде по результатам аппаратного проектирования на ППВМ

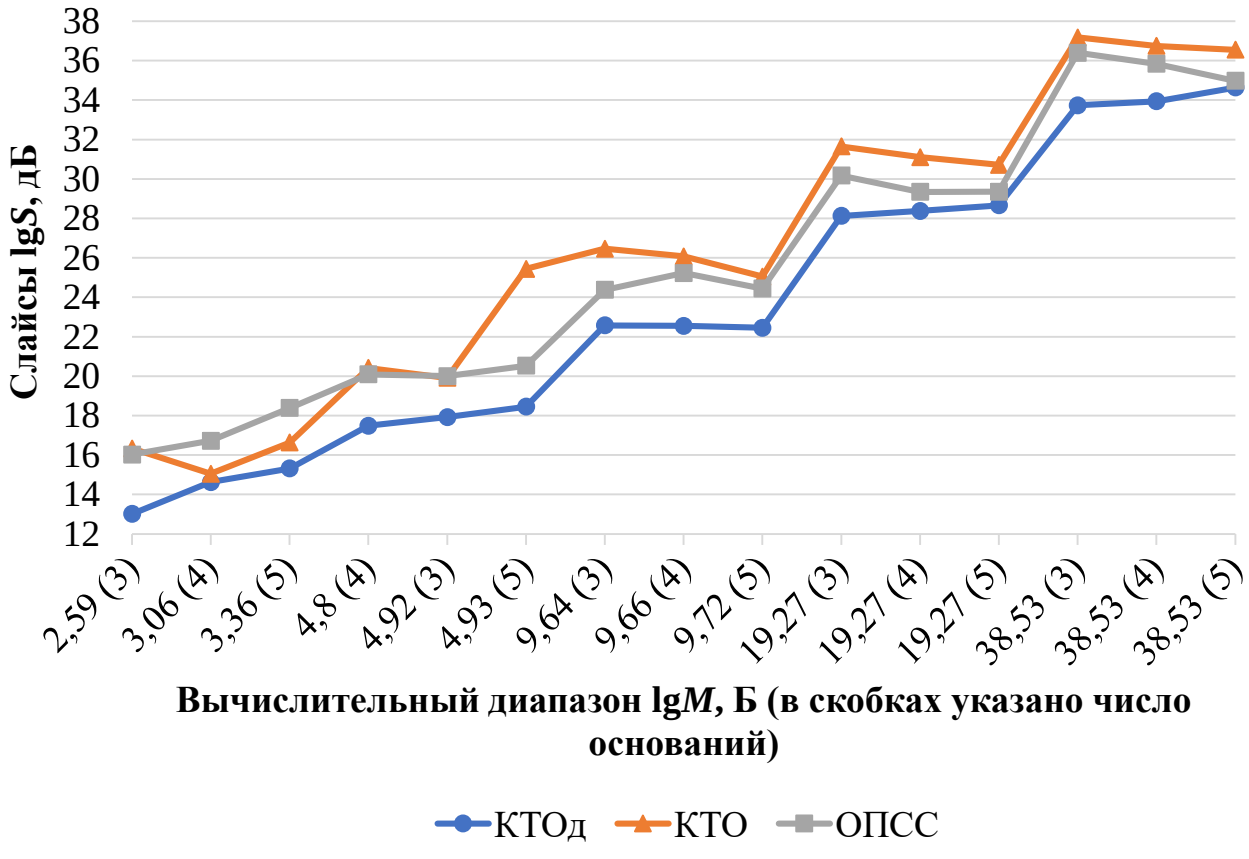


Рисунок 8 – Аппаратные затраты (слайсы, *S*) на определение знака числа в модулярном коде по результатам аппаратного проектирования на ППВМ

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 $\left|X/M - Y/M\right|_1$.

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

Эффективность по требуемой площади и скорости работы устройства реализации данной немодульной операции в СОК подтверждается экспериментальными данными. Выигрыш по ресурсозатратам обеспечивается значительно уменьшенным количеством выполняемых операций при реализации арифметической обработки данных в модулярном коде.

Для решения задач обнаружения, локализации и исправления ошибочного разряда предложен вычислительный блок (рисунок 9), архитектура которого способна оптимизировать обработку данных в модулярном коде при локализации ошибочного разряда с помощью КТОд. Принципы функционирования данной разработки описываются следующим образом. На вход блока поступает исходное число $X = \left(x_1, x_2, ..., x_{n+r}\right)$ и на выходе формируется откорректированный разряд числа $\overline{X} = \left(\overline{x}_1, \overline{x}_2, ..., \overline{x}_{n+r}\right)$. Входные регистры $RG\left(m_i\right)$, где $i = 1, 2, ..., n+1, ..., n+r$ объемом $\left(n+r\right)\left[\log m_i\right]$ бит служат для временного хранения чисел x_i и m_i в СОК, поступающих по входным шинам размером $b_i = \left[\log_2 m_i\right]$. Схема формирования проекций (СФП-Х) для избыточного диапазона M_F и схема формирования проекций (СФП-М) для рабочего диапазона $M_I = M$ за счет реконфигурации формируют кортежи i-ых проекций и единичные сигналы, используемые для локализации ошибочного разряда. Выходы схем формирования проекций СФП-Х и СФП-М поступают на вход $LUTm_i$ – таблицы суммарным объемом $O\left(n2^b \log n\right)$ бит. Для сравнения, процедура преобразования в ОПСС требует $O\left(n^2 2^b\right)$ бит при допущении $b_i = b$, где b_i – количество двоичных разрядов модулей m_i. Для повышения эффективности алгоритма и удобства анализа его сложности предполагается, что величины модулей более-менее одинаковы. В LUT-таблицы записываются некоторые округленные дробные числа $\left[\alpha_i x_i\right]_{2^{-N}}$ и $\left[\alpha_i m_i\right]_{2^{-N}}$, каждое из которых содержит $N = \left[\log_2 M_I \rho - 1\right]$ бит, которые затем суммируются деревом сумматоров $\left[\sum_{i=1}^{n} \alpha_i x_i\right]_{2^{-N}}$ и $\left[\sum_{i=n+1}^{n+2} \alpha_i m_i\right]_{2^{-N}}$ по модулю 1. Точные значения чисел определяются неравенством $\left[x\right]_{2^{-N}} \le x \le \left[x\right]_{2^{-N}+2^{-N+1}}$. Результаты суммирования в виде значений $F\left(\overline{X}/M_I\right)$ и $F\left(M/M_I\right)$, или $F\left(\overline{X}_i/M_I\right)$ и $F\left(M_i/M_I\right)$ поступают на схему сравнения (СС). СС реализует модели правил Ψ_1 и Ψ_2 и формируют сигналы: «ошибка или переполнения диапазона» или «ошибка не установлена».

При определении ошибки выходной сигнал СС поступает на вход «S» RS-триггера и переводит его в единичное состояние, которое запускает счетчик проекций (СТ). Счетчик проекций управляет реконфигурацией СПФ-Х и СПФ-М, которые формируют кортежи i-ых проекций. Кроме того, выходной сигнал СС является стробирующим для схемы «$И_i$», определяющие отказавший модуль СОК. На вторые входы схем «$И_i$» поступают сигналы с выхода СПФ-Х. Выходные значения схем «$И_i$» используются в качестве адресного кода демультиплексора DMX типа $1:n$, где n – количество модулей СОК. Информационный вход DMX коммутирует на входы умножителей Умн m_i только проекции $\overline{X_i}$, так как при анализе числа $\overline{X}$ адресный код равен $(0,0,...,0)$ – неиспользуемый нулевой выход. В исходном состоянии RS-триггер и счетчик проекций СТ находятся в нулевом состоянии.

Благодаря применению КТОд удается заменить сложные операторы преобразования чисел из СОК в ОПСС более простыми операциями сложения, что и привело к значительному снижению ресурсов, а также к перспективному повышению производительности. На базе платформы ППВМ разработаны структуры, которые способны обеспечить эффективную по ресурсозатратам аппаратную реализацию разработанной архитектуры с использованием различных наборов модулей СОК.

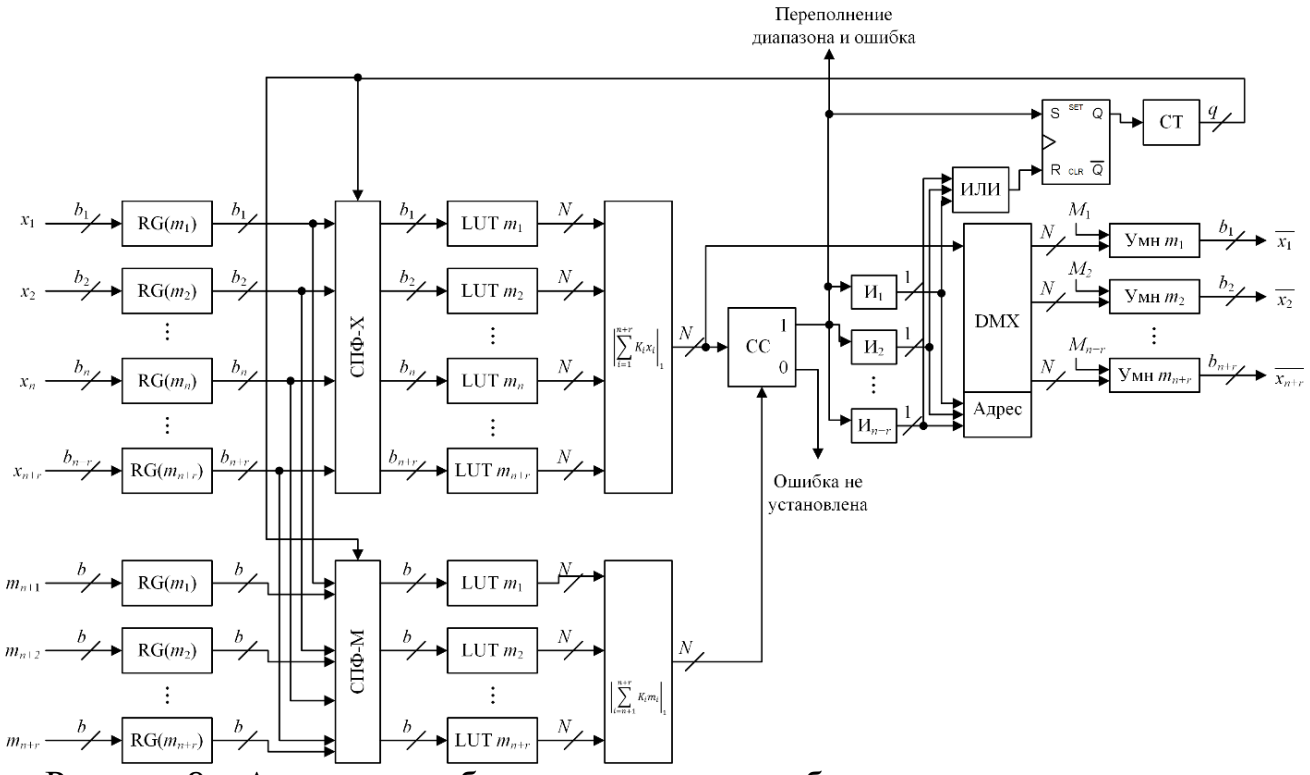


Рисунок 9 – Архитектура блока коррекции ошибок модулярного процессора

Предложенные подходы к выполнению немодульных операций 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. Повышение скорости выполнения этих операций, а также снижение аппаратных затрат позволит расширить применение СОК на практике, в частности в приложениях ЦОС и ЦОИ.

В пятой главе разработаны методы и алгоритмы пространственной фильтрации изображений в СОК, а также представлены результаты их программной и аппаратной реализации на ППВМ. Предложенные подходы к обработке изображений основаны на параллельной организации вычислений по нескольким каналам в модулярном коде, использовании масштабированных вычислений и анализе погрешности вычислений при обработке изображений ЦФ с масштабированными коэффициентами. Представленные разработки имеют глубокую математическую проработку, результаты которой в совокупности с результатами моделирования позволяют утверждать, что использование предложенных разработок позволяет снизить вычислительную сложность пространственной фильтрации и повысить скорость вычислений при программной и аппаратной реализации методов ЦОИ на современных вычислительных устройствах. Основные теоретические и практические результаты главы представлены далее.

Рассмотрены подходы к цифровой фильтрации двумерных изображений с параллельной организацией вычислений в СОК с использованием масштабированных коэффициентов ЦФ для уменьшения вычислительной сложности и снижения задержки при ЦОИ (рисунок 10). Установлено, что реализация методов цифровой фильтрации изображений в формате с фиксированной точкой открывает возможность проектирования высокопроизводительных аппаратных архитектур на современных ППВМ и ИССН. Выбранный для масштабирования множитель позволяет значительно упростить и ускорить операции с его использованием, при этом сохраняя высокое качество обработки согласно метрике пиковое отношение сигнал-шум (PSNR).

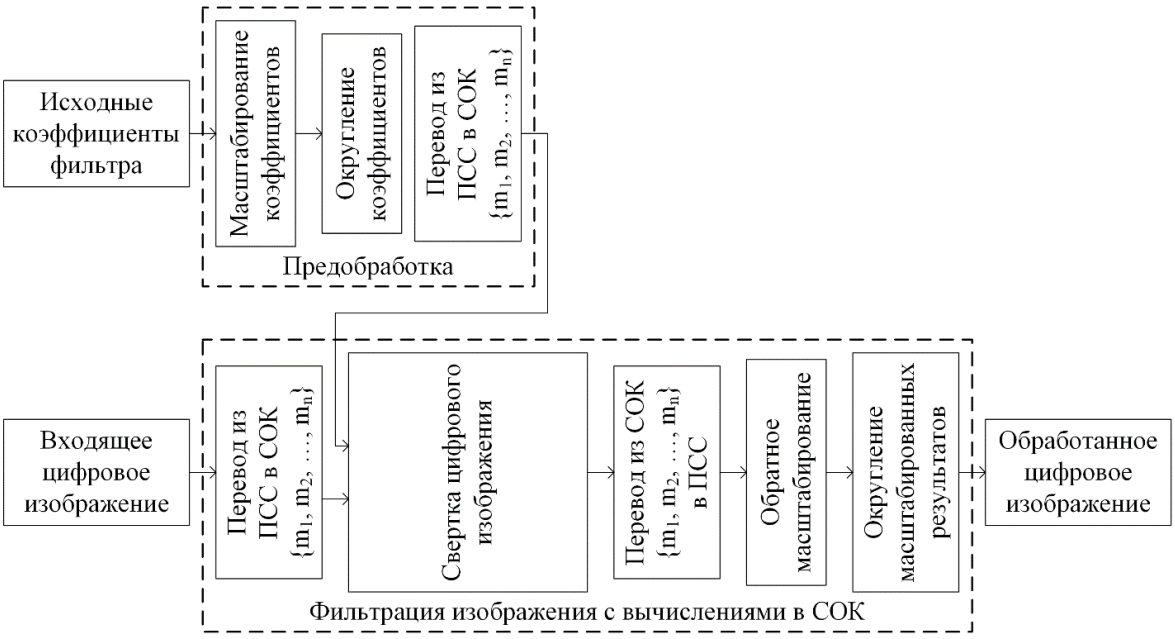


Рисунок 10 – Схема пространственной фильтрации изображения в СОК

Предложен алгоритм масштабирования коэффициентов ВФ для обработки двумерных изображений в СОК (рисунок 11), учитывающий накопительную погрешность многократной последовательной свертки с анализирующими и синтезирующими ВФ при прямом и обратном ДВП изображений и гарантирующий достижение высокого качества восстанавливаемого изображения в терминах PSNR. Данный алгоритм позволяет выполнить предварительное преобразование коэффициентов ВФ, используемых для ВО изображений, и функционирует следующим образом. На вход алгоритма подаются параметры изображений и устройства ЦОИ (максимальное значение яркости пикселей M_{max} и коэффициент качества обработки 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 $k = \log_2\left(M_{max}+1\right) + C_{quality} - 1$. Далее выполняется расчет подходящего значения порога Q высокого качества обработки изображения по формуле $Q = C_{quality} \cdot \log_2\left(M_{max}+1\right)$ и значение характеристики PSNR по формуле $PSNR = 10\log_{10}\left(M_{max}^2 / MSE\right)$. 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 неизбыточным. 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 неизбыточным. Используя рассчитанное значение параметра масштабирования k выполняется масштабирование коэффициентов $f_{F,i}$ и вычисляется их разрядность по формуле $r_{f^*_{F,i}} = \left\lceil \log_2\left(\left| f^*_{F,i} \right| + 1\right) \right\rceil + 1$. 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 устройства обработки изображений, такие как производительность, программные, аппаратные и энергетические затраты.

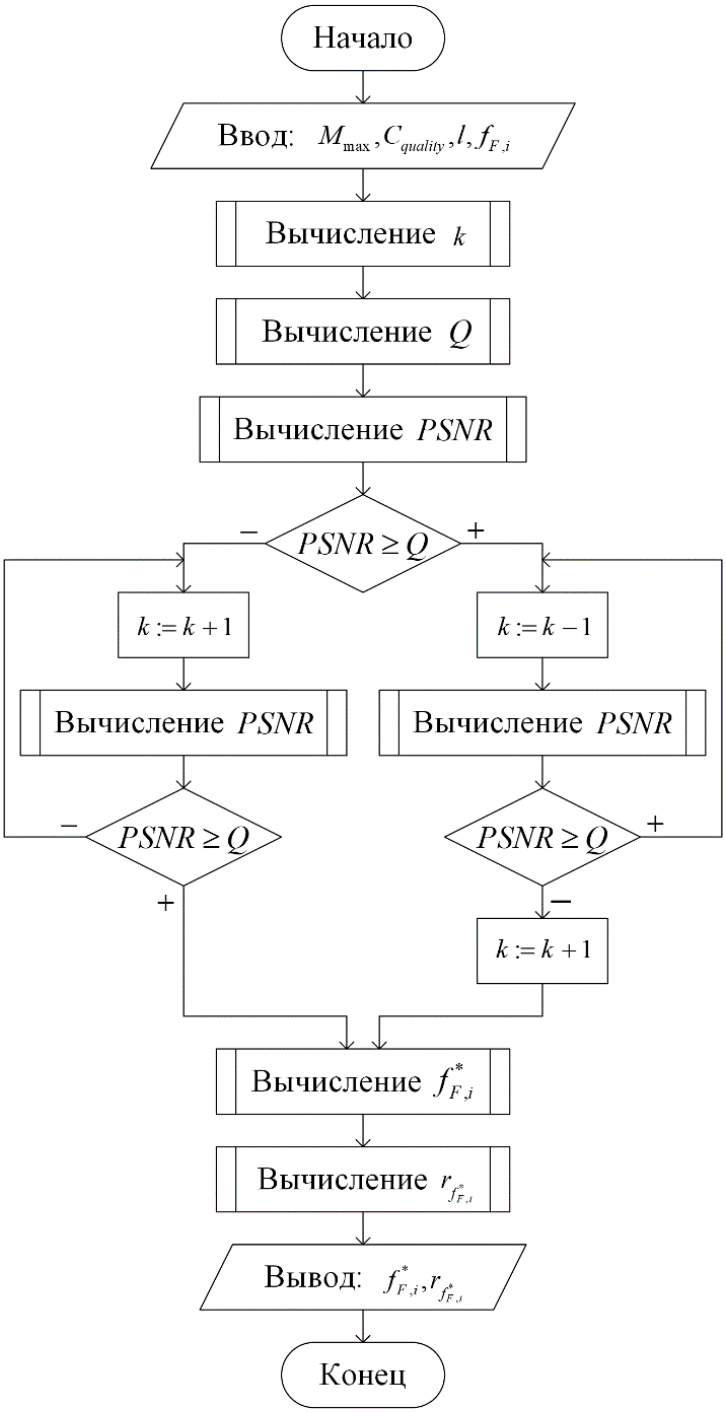


Рисунок 11 – Блок-схема алгоритма масштабирования коэффициентов вейвлет-фильтров для вейвлет-обработки двумерных изображений

Разработан метод ВО трехмерных изображений с параллельной организацией вычислений в СОК, использующий масштабированные коэффициенты ВФ для понижения вычислительной сложности блоков цифровой фильтрации и улучшения эксплуатационных показателей устройств ЦОИ. Схема ВО трехмерных изображений представлена на рисунке 12, где для ВО используются 4 вида ВФ: низкочастотный анализирующий (НА); высокочастотный

анализирующий (ВА); низкочастотный синтезирующий (НС); высокочастотный синтезирующий (ВС). Распараллеливание вычислений в СОК на арифметико-логическом при проектировании устройств ВО трехмерных изображений уровне согласно схеме на рисунке 8 позволяет распределить вычислительную нагрузку по нескольким каналам, снижая задержку блоков цифровой фильтрации.

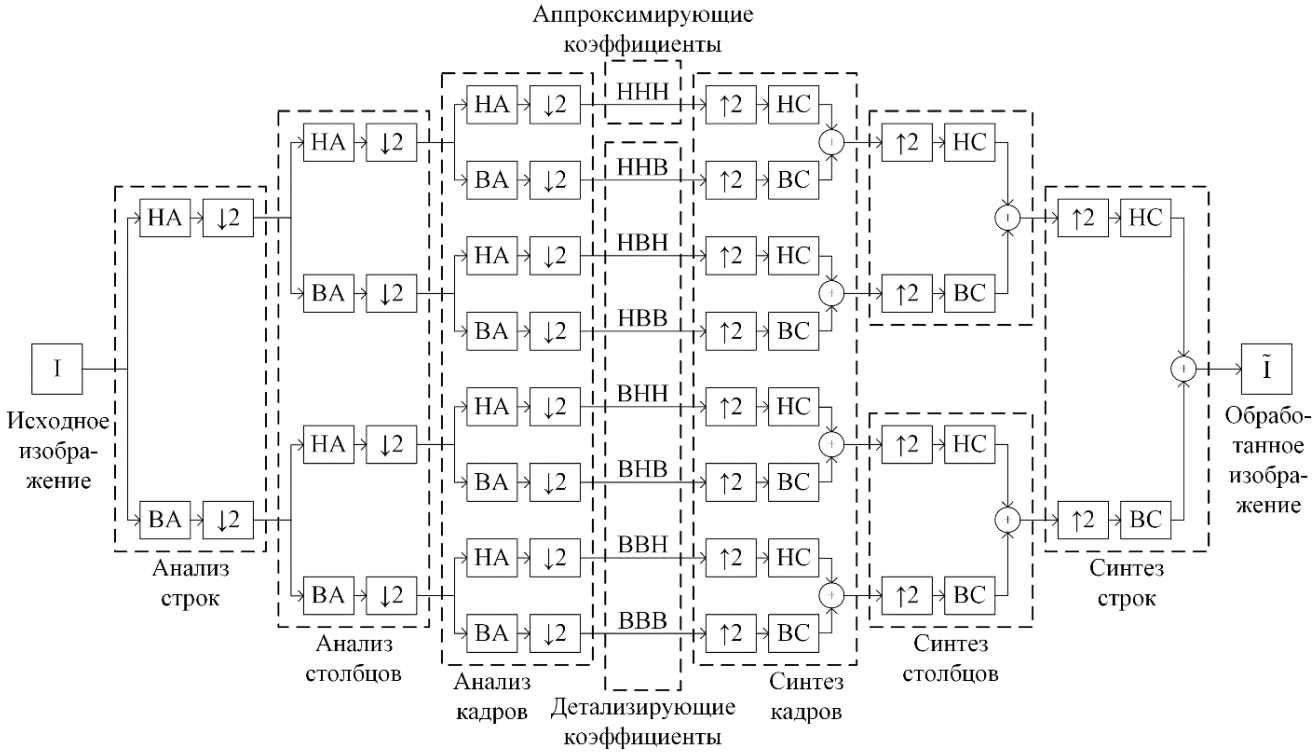


Рисунок 12 – Схема вейвлет-обработки трехмерных изображений

Разработан метод ЦОИ с использованием вейвлетов над полями Галуа, устраняющий влияние ошибок округления и открывающий возможность для проектирования распределенных вычислительных устройств криптографического назначения. Использование модулярных вычислений с ВФ над полями Галуа позволяет усовершенствовать известные и создать новые методы кодирования и декодирования цифровых визуальных данных.

Осуществлена программная и аппаратная реализация предложенных методов и алгоритмов ВО трехмерных медицинских изображений. 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 аппаратной реализации показали, что сочетание разработанного метода ВО изображений с использованием масштабированных коэффициентов ВФ (таблица 3) и параллельных вычислений в СОК (таблица 4) повышает производительность ППВМ в 2,89-3,59 раз при увеличении аппаратных затрат в 1,18-3,29 раз по сравнению с известными подходами в ПСС.

Таблица 3 – Результаты аппаратной реализации вейвлет-обработки трехмерных медицинских изображений 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 4 – Экспериментальные данные по аппаратному проектированию устройства вейвлетной обработки изображений в СОК и ПСС

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

Шестая глава посвящена разработке нейросетевых архитектур для повышения производительности вычислений и отказоустойчивости в процессе эксплуатации на основе СОК, а также программно-аппаратной реализации предлагаемых решений на современных платформах проектирования микроэлектронных устройств. Основные теоретические и практические результаты главы представлены далее.

Разработанная новая архитектура сверточной нейронной сети (СНС) представлена на рисунке 13. В данной архитектуре все сверточные вычисления осуществляются аппаратурно на ППВМ в коде СОК. Остальные уровни реализованы на программном уровне. Данные с цифрового устройства поступают по шине в буфер передачи данных FIFO (first in, first out – «первым пришёл – первым ушёл»), который генерирует последовательность пикселей, поступающих на вход СНС. Свертка в СОК чередуется со слоями подвыборки. Затем данные подаются на полносвязный классификатор (персептрон), на выходе которого формируется ответ нейронной сети в виде вероятностей принадлежности изображения к каждому классу. Ответ нейронной сети передается по шине обратно на цифровое устройство.

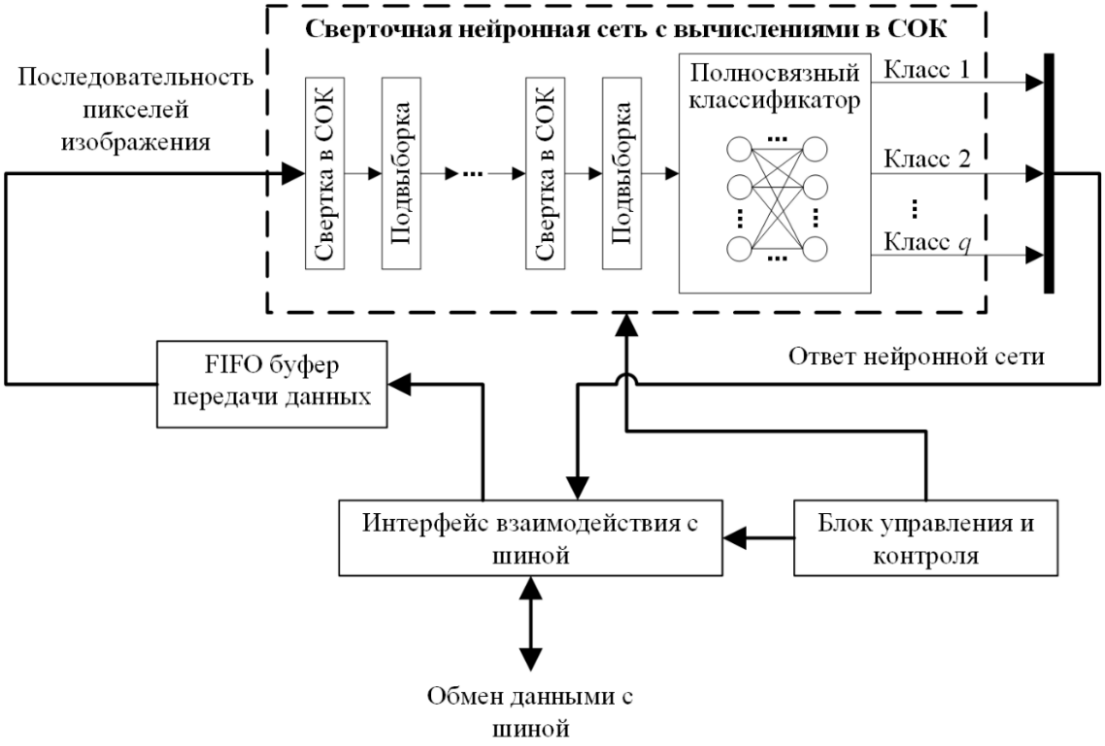


Рисунок 13 – Архитектура сверточной нейронной сети с вычислениями в СОК

Для дальнейшего снижения аппаратных и временны́х затрат на реализацию СНС предложен метод масштабирования коэффициентов сверточных слоев СНС, методика сжатия массива парциальных произведений для аппаратной реализации свертки в СНС. Результаты аппаратной реализации нейросетевой обработки изображений на основе вычислений в СОК продемонстрировали уменьшение аппаратных ресурсозатрат на 32,6% в сравнении с результатами в ПСС. Кроме того, использование предложенной программно-аппаратной архитектуры позволяет сократить среднее время распознавания изображений на 37,06% по сравнению с программной реализацией. Результаты экспериментов позволяют сделать вывод, что предложенная архитектура СНС на основе вычислений в СОК более эффективна, чем известные аналоги, по аппаратным и временным затратам.

Разработана архитектура отказоустойчивой сети Хопфилда с организацией арифметической обработки данных в СОК и использованием модифицированной

КТОд. Благодаря их интегрированному применению предложено решение по замене операции преобразования смешанного основания, процедуры расширения модулей СОК и метода проекции модульных чисел относительно простыми операциями сложения в сочетании со свойствами обнаружения ошибок нейронных сетей Хопфилда. Данная архитектура представлена на рисунке 14 и включает в себя следующие компоненты.

1. Мульти-нейрокомпьютер с n нейронами по модулям m_i $(i=1,2,\ldots,n+2)$, реализующий вычисления модульных и немодульных операций.
2. Преобразователь ПСС→СОК, который производит перевод из ПСС в СОК.
3. Элементарные нейропроцессоры (ENP).
4. Преобразователь СОК→ПСС, который производит перевод из СОК в ПСС.
5. Просмотровые таблицы LUT_{m_i} для $i=1,2,\ldots,n+2$, которые предназначены для табличных вычислений произведений $x_i\alpha_i$.
6. Блок обнаружения и коррекции единичной ошибки, основанный на КТОд и нейронной сети Хопфилда.

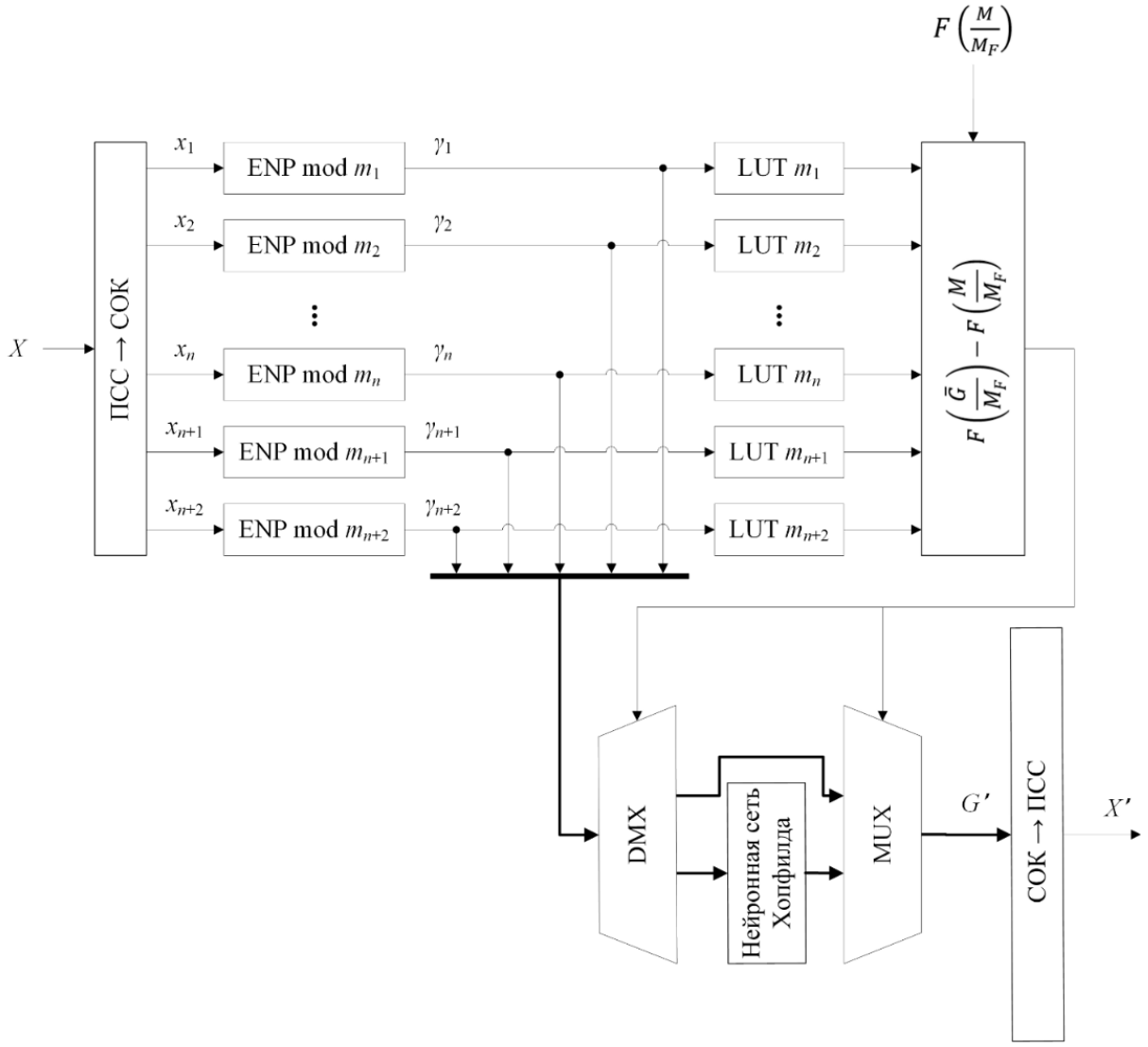


Рисунок 14 – Архитектура отказоустойчивой сети Хопфилда с организацией арифметической обработки изображений в системе остаточных классов

На вход устройства поступает изображение X и преобразуется из ПСС в СОК с модулями $\{m_1, m_2, \ldots, m_n, \ldots, m_{n+2}\}$ с помощью преобразователя ПСС→СОК. Полученное представление числа $(x_1, x_2, \ldots, x_n, \ldots, x_{n+2})$ обрабатывается параллельно мульти-нейропроцессором по заданной программе и формирует сигналы $G = (\gamma_1, \gamma_2, \ldots, \gamma_n, \ldots, \gamma_{n+2})$ на выходах ENP и преобразуется в выходное изображение X' с помощью преобразователя СОК→ПСС. Вычислительное ядро (мульти-нейропроцессор) может быть реализовано в форме независимых ENP с параллельной обработкой данных по модулю m_i, где $i = 1, 2, \ldots, n+2$. В общем случае размер матриц, используемых в нейропроцессорах, зависит от динамического диапазона и величины оснований СОК. Операция коррекции единичных ошибок производится с помощью блоков обнаружения и коррекции ошибки по основаниям КТОд и нейронной сети Хопфилда. Обнаруженные с помощью n LUT и сумматоров ошибки корректируются в нейронной сети Хопфилда. Результаты работы мультипроцессора подаются на входы LUT_{m_i}, которые имеют объем памяти $O(n2^n \log n)$ бит. Для сравнения, перевод, основанный на ОПСС, требует $O(n^2 2^n)$ бит, учитывая предположение, что $b_i = b$, где b_i – количество бит по модулю m_i. Вычисление $F(\bar{G}/M_F)$ производится по методу КТОд. Сперва производится умножение на константы α_i с помощью LUT_{m_i}, затем результат суммируется деревом сумматоров. Аналогично производится вычисление $F(M/M_F)$. Если $F(\bar{G}/M_F) < F(M/M_F)$ (нет ошибки), то знак числа содержит 0. В данном случае на адресные входы демультиплексора (DMX) и мультиплексора (MUX) поступает 0, а эти блоки передают правильное значение на преобразователь СОК→ПСС. Если $F(\bar{G}/M_F) \geq F(M/M_F)$, тогда информация содержит ошибку. В этом случае информация передается на вход нейронной сети Хопфилда для исправления. Предположим, что контролируемое число $\bar{G} = (\overline{\gamma_1}, \overline{\gamma_2}, \ldots, \overline{\gamma_{n+2}})$ поступает на адресные входы блоков LUT_{m_i}. Данные блоки записывают округленные значения умножения на константы, затем полученные произведения подаются на сумматор. Константа M, соответствующая динамическому диапазону, подается на вход сумматора. Следовательно, если в информации не была обнаружена ошибка, они передаются на выход нейрокомпьютера и затем в преобразователь СОК→ПСС. Иначе информация поступает на вход нейронной сети Хопфилда для коррекции, а потом исправленные данные подаются на вход преобразователя СОК→ПСС. Аппаратная реализация предложенной архитектуры продемонстрировала значительное улучшение эксплуатационных характеристик устройства нейросетевой обработки данных (рисунок 15).

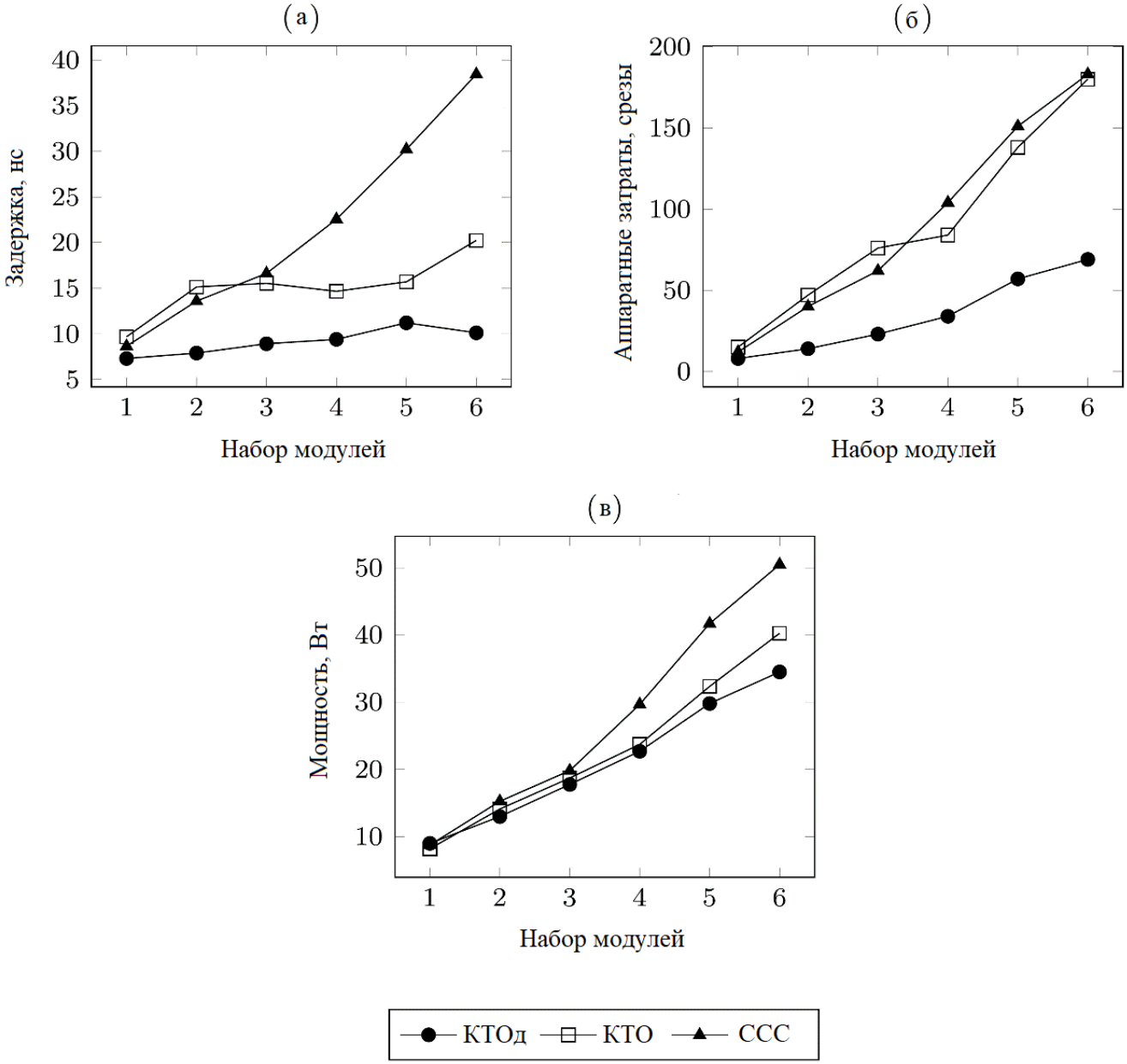


Рисунок 15 – Максимальная задержка (а), аппаратные затраты (б) и потребляемая мощность (в) устройств нейросетевой обработки данных на базе ППВМ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом диссертационной работы является решение крупной проблемы, заключающейся в низкой производительности устройств цифровой обработки изображений. Работа посвящена разработке методов, алгоритмов и архитектур для высокопроизводительной обработки изображений на современных устройствах вычислительной техники. Основной проблемой при проектировании таких устройств является высокая вычислительная сложность реализуемых методов, приводящая к низкой скорости обработки изображений. В качестве главного вычислительного инструмента для повышения скорости работы устройств выбрана система остаточных классов. Основные полученные результаты представлены далее.

1. Разработан метод цифровой фильтрации сигналов с организацией арифметической обработки данных в системе остаточных классов с модулями специального вида, снижающий аппаратные затраты и энергопотребление устройства до 23% и 22,3%, соответственно.

2. Предложен метод высокопроизводительной вейвлет-фильтрации изображений на основе матричных вычислений с уменьшением количества используемых умножений, повышающий производительность устройства до 73,62% и уменьшающий аппаратные затраты до 34,03%.

3. Разработан метод организации матричных вычислений при вейвлет-обработке цифровых изображений с понижающей дискретизацией, повышающий производительность устройства до 66%.

4. Разработан метод обратного преобразования чисел системы из остаточных классов в позиционную систему счисления на основе Китайской теоремы об остатках с дробными величинами, повышающий производительность вычислений до 4,7 раз.

5. Разработан алгоритм определения знака числа, представленного в системе остаточных классов, на основе Китайской теоремы об остатках с дробными величинами, повышающий производительность вычислений до 27,14 раз и уменьшающий аппаратные затраты до 2,45 раз.

6. Разработан алгоритм сравнения чисел в системе остаточных классов на основе Китайской теоремы об остатках с дробными величинами, понижающий аппаратные затраты до 7,07 раз.

7. Разработана архитектура блока обнаружения, локализации и исправления ошибок в системе остаточных классов на основе Китайской теоремы об остатках с дробными величинами, снижающая аппаратные затраты до 31,63%.

8. Предложен алгоритм масштабирования коэффициентов вейвлет-фильтров для обработки изображений в системе остаточных классов, повышающий производительность устройства до 40,9% и понижающий аппаратные затраты до 62,24%.

9. Разработан метод вейвлет-обработки изображений с использованием масштабированных коэффициентов и арифметической обработкой в системе остаточных классов, повышающий производительность устройства до 3,59 раз.

10. Разработан метод цифровой обработки изображений с использованием вейвлетов над конечными полями в системе остаточных классов.

11. Разработана архитектура нейронной сети с реализацией сверточных вычислений в системе остаточных классов, повышающая производительность устройства до 58,89% и понижающая аппаратные затраты до 32,6%.

12. Разработана архитектура отказоустойчивой сети Хопфилда с организацией арифметической обработки данных в системе остаточных классов, повышающая производительность устройства до 3,8 раз и понижающая аппаратные затраты до 3,3 раз.

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, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus

4. 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. Q1 Scopus, Q2 Web of Science.
5. 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. Q1 Scopus, Q2 Web of Science.
6. 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. Q1 Scopus, Q2 Web of Science.
7. 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. Q1 Scopus, Q2 Web of Science.
8. 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.
9. 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. Q1 Scopus, Q2 Web of Science.
10. 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. Q1 Scopus, Q2 Web of Science.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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. – Т. 43. – №. 5. – С. 857-868. Q2 Scopus, входит без квартиля в Web of Science.

17. 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. – Т. 54. – P. 608-616. https://doi.org/10.3103/S8756699018060092

18. 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.

19. 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.

20. 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. Q1 Scopus, Q2 Web of Science.

21. 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.

22. 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. Q1 Scopus, Q2 Web of Science.

23. 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. Q1 Scopus, Q2 Web of Science.

24. 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. Q1 Scopus, Q1 Web of Science.

25. 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. – Vol. 47. – №. 1. – P. 68-78. Q2 Scopus, входит без квартиля в Web of Science.

26. 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. Q3 Scopus, входит без квартиля в Web of Science.

27. 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

28. 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. Q1 Scopus, Q2 Web of Science.

29. Pettenghi, H. Efficient RNS Reverse Converters for Moduli Sets with Dynamic Ranges Up to (10 n+ 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.

30. 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. Q1 Scopus, Q2 Web of Science.

31. Valueva, M. Digital Filter Architecture with Calculations in the Residue Number System by Winograd Method F (2 × 2, 2 × 2) / M. Valueva, P. Lyakhov, G. Valuev, N. Nagornov // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 143331-143340. – DOI 10.1109/ACCESS.2021.3121520. Q1 Scopus, Q2 Web of Science.

32. 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. Q2 Scopus, Q1 Web of Science.

33. 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. – Т. 46. – №. 5. – С. 752-762. Q2 Scopus, входит без квартиля в Web of Science.

Статьи автора в журналах, рекомендованных ВАК РФ

34. 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.

35. 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.

36. Вейвлетные фильтры третьего порядка в простых полях Галуа / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, Н. Ф. Семенова, К. С. Шульженко // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. – 2015. – № 13(210). – С. 78-84.

37. 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.

38. Ляхов, П. А. Исследование параунитарных матриц для реализации цифровой обработки сигналов в конечных полях / П. А. Ляхов, Н. И. Червяков // Инфокоммуникационные технологии. – 2011. – Т. 9, № 1. – С. 4-8.

39. Ляхов, П. А. Реализация многоканальных фильтров в системе остаточных классов / П. А. Ляхов, Н. И. Червяков // Инфокоммуникационные технологии. – 2011. – Т. 9, № 2. – С. 4-7.

40. 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.

41. 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.

42. 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.

43. 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.

44. 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.

45. 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.

46. 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.

47. 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.

48. 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.

49. 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.

50. 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.

51. 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.

52. Червяков, Н. И. Приближенный метод ускоренного обнаружения и локализации неисправного вычислительного канала в ЭВМ, функционирующей в системе остаточных классов / Н. И. Червяков, М. Г. Бабенко, П. А. Ляхов, И. Н.

Лавриненко // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2011. – № 10. – С. 13-19.

53. 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.

54. 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.

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

56. Червяков, Н. И. Реализация многофазных фильтров в системе остаточных классов / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика – 2011. – № 13(108). – С. 204-210.

57. Червяков, Н. И. Реализация модулярного вейвлет-преобразования в нейросетевом базисе / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2011. – № 11. – С. 18-25.

58. 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.

59. 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.

Патенты на изобретения

60. Патент № 2559771 C2 Российская Федерация, 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; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Северо-Кавказский федеральный университет".

61. Патент № 2503995 C2 Российская Федерация, 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.]; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Северо-Кавказский федеральный университет".

62. Патент № 2559772 C2 Российская Федерация, 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.]; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Северо-Кавказский федеральный университет".

63. Патент № 2503992 C2 Российская Федерация, 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.]; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Северо-Кавказский федеральный университет".

64. Патент № 2483346 C1 Российская Федерация, 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.]; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Северо-Кавказский федеральный университет".

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

65. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023616462 Российская Федерация. 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. Абдулсалямова; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет».

66. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021619007 Российская Федерация. 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; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет».

67. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021619598 Российская Федерация. Среда прогнозирования аппаратной и временной сложности микроэлектронных вычислительных устройств: № 2021618478: заявл. 31.05.2021: опубл. 15.06.2021 / П. А. Ляхов, М. В. Бергерман; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет».

68. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020612962 Российская Федерация. 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; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет».

69. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020612961 Российская Федерация. 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.]; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет».

70. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019612363 Российская Федерация. 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; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет».

71. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018613585 Российская Федерация. 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; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет».

72. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017617504 Российская Федерация. 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; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет». Червяков, Н. И., Ляхов, П. А., Шульженко, К. С., Гладков, А. В., & Царёв, А. П. (2016). Среда моделирования цифровой фильтрации изображений в системе остаточных классов с модулями специального вида.

73. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017613716 Российская Федерация. 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.]; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет».

74. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017613768 Российская Федерация. 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; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет».

75. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016617258 Российская Федерация. 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.]; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северо-Кавказский федеральный университет».

76. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016610061 Российская Федерация. 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; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северо-Кавказский федеральный университет».

Другие публикации автора по теме диссертации

77. Бергерман, М. В. Применение двухступенчатой СОК в системах передачи данных / М. В. Бергерман, П. А. Ляхов, Н. И. Червяков // Естественные науки - основа настоящего и фундамент для будущего: материалы VII ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука - региону», Ставрополь, 03–29 апреля 2019 года / отв. ред. В.И. Шипулин. – Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2019. – С. 62-64.

78. Ляхов, П. А. Дискретное вейвлет-преобразование в системе остаточных классов // Параллельная компьютерная алгебра: материалы всероссийской научно конференции с элементами научной школы для молодежи, Ставрополь. – 2010. – С. 167-175.

79. Ляхов, П. А. Аппаратная реализация устройства обработки видео с использованием системы остаточных классов / П. А. Ляхов, А. С. Ионисян, В. В. Масаева, М. В. Валуева // Современная наука и инновации. – 2021. – № 1(33). – С. 15-21. – DOI 10.37493/2307-910X.2021.1.2.

80. Ляхов, П. А. Вейвлет-обработка изображений при свертке с шагом методом Винограда с низкой задержкой / П. А. Ляхов, Н. Н. Нагорнов, Н. Ф. Семенова, А. Ш. Абдулсалямова // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 11(107). – С. 143-153.

81. Ляхов, П. А. Моделирование алгоритмов обратного преобразования чисел из системы остаточных классов в позиционную систему счисления / П. А. Ляхов, Т. А. Гробова, И. В. Карасев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3, № 7-4(18-4). – Р. 430-433. – DOI 10.12737/15350.

82. 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.

83. Ляхов, П. А., Восстановление позиционной формы числа из системы остаточных классов с тремя сбалансированными модулями специального вида / П. А. Ляхов, М. В. Бергерман, Н. Ф. Семенова //Студенческая наука для развития информационного общества. – 2020. – С. 35-45.

84. Непретимова, Е. В. Сравнительный анализ методов восстановления чисел, заданных на основе модульного представления / Е. В. Непретимова, П. А. Ляхов, А. В. Гладков, В. В. Луценко // Естественные науки - основа настоящего и фундамент для будущего: материалы VII ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука - региону», Ставрополь, 03–29 апреля 2019 года / отв. ред. В.И. Шипулин. – Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2019. – С. 70-73.

85. Семенова, Н. Ф. Построение системы остаточных классов с диагональной функцией специального вида / Н. Ф. Семенова, Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, М.В. Валуева, Г.В. Валуев // Современная наука и инновации. – 2019. – № 4(28). – С. 10-21.

86. Червяков, Н. И. Анализ шума квантования линейных стационарных фильтров обработки изображений / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, Н. Н. Нагорнов // Современная наука и инновации. – 2018. – № 2(22). – С. 27-34.

87. Червяков, Н. И. Влияние ограничения разрядности коэффициентов фильтра на качество вейвлет-обработки изображений в оттенках серого / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, Д. И. Калита, К. С. Шульженко // Наука. Инновации. Технологии. – 2016. – № 2. – С. 61-76.

88. Червяков, Н. И. Высокоскоростной алгоритм деления модулярных чисел на основе Китайской теоремы об остатках с дробями / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, И. Н. Лавриненко, М. А. Дерябин // Современная наука и инновации. – 2018. – № 4(24). – С. 18-28.

89. Червяков, Н. И. Использование СОК в КИХ-фильтрах / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, К. С. Шульженко // Параллельная компьютерная алгебра и её приложения в новых инфокоммуникационных системах: Материалы I международной научной конференции, Ставрополь, 20–24 октября 2014 года / Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северо-Кавказский федеральный университет»; Институт математики и естественных наук. – Ставрополь: Общество с ограниченной ответственностью "Издательско-информационный центр "Фабула", 2014. – С. 343-346.

90. Червяков, Н. И. Метод параллельной реализации вейвлет-преобразования с использованием системы остаточных классов/ Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, Д. И. Калита, К. С. Шульженко // Наука. Инновации. Технологии. – 2017. – № 4. – С. 43-54.

91. Червяков, Н. И. Методы решения задачи распознавания образов с использованием системы остаточных классов / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, К. С. Шульженко // Наука. Инновации. Технологии. – 2014. – № 3. – С. 40-54.

92. Червяков, Н. И. Многоканальные фильтры точного восстановления сигнала в системе остаточных классов / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов //Перспективы развития информационных технологий. – 2011. – №. 6. – С. 215-220.

93. Червяков, Н. И. Применение адаптивных фильтров на основе системы остаточных классов в спутниковой связи / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, К. С. Шульженко // Наука. Инновации. Технологии. – 2015. – № 2. – С. 55-67.

94. Червяков, Н. И. Проектирование КИХ-фильтров в СОК с использованием MATLAB / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, К. С. Шульженко // Параллельная компьютерная алгебра и её приложения в новых инфокоммуникационных системах: Материалы I международной научной конференции, Ставрополь, 20–24 октября 2014 года / Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северо-Кавказский федеральный университет»; Институт математики и естественных наук. – Ставрополь: Общество с ограниченной ответственностью "Издательско-информационный центр "Фабула", 2014. – С. 161-168.

95. Червяков, Н. И. Сравнительный анализ аппаратной реализации сумматоров на FPGA / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, М. В. Валуева, О. В. Криволапова // Наука. Инновации. Технологии. – 2016. – № 4. – С. 99-108.

96. 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.

97. Червяков, Н. И. Цифровые фильтры в двухступенчатой системе остаточных классов с модулями специального вида / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, К. С. Шульженко // Наука. Инновации. Технологии. – 2014. – № 1. – С. 41-55.

98. Червяков, Н. И. Численная реализация метода фильтрации изображений с вычислениями в системе остаточных классов / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, Д. И. Калита, А. В. Васькина // Наука. Инновации. Технологии. – 2017. – № 3. – С. 73-86.

99. Червяков, Н. И. Эффективный алгоритм деления чисел в системе остаточных классов на основе приближенного метода / Н. И. Червяков, М. Г. Бабенко, П. А. Ляхов, И. Н. Лавриненко // Наука. Инновации. Технологии. – 2013. – № 2. – С. 7-26.

100. Червяков, Н.И. Аппаратная реализация системы обработки видео с использованием СОК / Н. И. Червяков, П.А. Ляхов, А.С. Ионисян, М.В. Валуева, Д.И. Каплун, В.В Гульванский, Д.Н. Бутусов// Компоненты и технологии. – 2019. – № 11(220). – С. 110-113.

101. Червяков, Н.И. Архитектура сверточной нейронной сети с извлечением признаков в системе остаточных классов / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, М. В. Валуева, Н.Н. Нагорнов, Г.В. Валуев // Мягкие измерения и вычисления. – 2019. – № 5(18). – С. 15-26.

102. Червяков, Н.И. Основы модулярных вычислений / Н. И. Червяков, В. В. Бережной, М. Г. Бабенко, П.А. Ляхов, М.А. Дерябин, Н.Н. Кучеров// Мягкие измерения и вычисления. – 2019. – № 7(20). – С. 53-79.

103. Червяков, Н.И. Сглаживающая фильтрация изображений в системе остаточных классов / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, Н. Н. Нагорнов, Д.И. Каплун, А.С. Вознесенский, Д.В. Богаевский, В.Ю. Островский, В.В. Кузнецов // Компоненты и технологии. – 2019. – № 12(221). – С. 78-81. (РИНЦ)

104. 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.

105. Abdulsalyamova, A. S. Theoretical Analysis of the Convolutional Neural Networks Acceleration by Organizing Calculations According to the Winograd Method / A. S. Abdulsalyamova, P. A. Lyakhov, D. I. Kalita // 2022 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS). – IEEE, 2022. – P. 58-61.

106. Bergerman, M. CRTF-Based Reverse Converter for RNS with Low-Cost Modules {2 n, 2 n-1, 2 n+ 1-1} / M. Bergerman, P. Lyakhov, N. Semyonova, D. Bogaevskiy, D. Kaplun // International Conference on Mathematics and its Applications in new Computer Systems. – Cham: Springer International Publishing, 2021. – P. 29-39.

107. Bergerman, M. Modulo 2k+ 1 Truncated Multiply-Accumulate Unit / M. Bergerman, P. Lyakhov, A. Abdulsalyamova // International Conference on Actual Problems of Applied Mathematics and Computer Science. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2022. – P. 343-352. https://doi.org/10.1007/978-3-031-34127-4_33

108. Bergerman, M. V. Designing forward converters for data transmission systems in two-level RNS / M .V. Bergerman, P. A. Lyakhov, N. I. Chervyakov, D. I. Kaplun, D. V. Bogaevskiy // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 1352. – №. 1. – P. 012005.

109. Bergerman, M. V. Designing reverse converter for data transmission systems from two-level RNS to BNS / M. V. Bergerman, P. A. Lyakhov, A. S. Voznesensky, D. V. Bogaevskiy, D. I. Kaplun //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 1658. – №. 1. – P. 012005.

110. Chervyakov, N. I. Area-efficient FPGA implementation of minimalistic convolutional neural network using residue number system / N. I. Chervyakov, P. A. Lyakhov, M. V. Valueva, G. V. Valuev, D. I. Kaplun, G. A. Efimenko // 2018 23rd Conference of Open Innovations Association (FRUCT). – IEEE, 2018. – P. 112-118. doi: 10.23919/FRUCT.2018.8588106.

111. Chervyakov, N. I. Effect of RNS dynamic range on grayscale images filtering / N. I. Chervyakov, P. A. Lyakhov, D. I. Kalita, K. S. Shulzhenko // 2016 XV International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY). – IEEE, 2016. – P. 33-37, doi: 10.1109/RED.2016.7779323.

112. Chervyakov, N. I. Effect of RNS moduli set selection on digital filter performance for satellite communications/ N. I. Chervyakov, P. A. Lyakhov, D. I. Kalita, K. S. Shulzhenko // 2015 International Siberian Conference on Control and

Communications (SIBCON). – IEEE, 2015. – P. 1-7, doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147268.

113. Chervyakov, N. I. FIR filters in two-stage residue number system / N. I. Chervyakov, P. A. Lyakhov, K. S. Shulzhenko // 2014 International Conference on Engineering and Telecommunication. – IEEE, 2014. – P. 26-29.

114. Chervyakov, N. I. High-performance hardware 3D medical imaging using wavelets in the residue number system / N. I. Chervyakov, P. A. Lyakhov, N. N. Nagornov, M. V. Valueva and D. I. Kaplun // 2020 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). – IEEE, 2020. – C. 1-4. doi: 10.1109/MECO49872.2020.9134123.

115. Chervyakov, N. I. High-speed smoothing filter in the Residue Number System/ N. I. Chervyakov, P. A. Lyakhov, A. S. Ionisyan, M. V. Valueva // 2016 Third International Conference on Digital Information Processing, Data Mining, and Wireless Communications (DIPDMWC). – IEEE, 2016. – P. 121-126, doi: 10.1109/DIPDMWC.2016.7529375.

116. Chervyakov, N. I. Implementation of smoothing image filtering in the residue number system / N. I. Chervyakov, P. A. Lyakhov, N. N. Nagornov, D. I. Kaplun, A. S. Voznesenskiy, D. V. Bogayevskiy // 2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). – IEEE, 2019. – P. 1-4.

117. Chervyakov, N. I. Increasing of convolutional neural network performance using residue number system / N. I. Chervyakov, P. A. Lyakhov, M. V. Valueva //2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – IEEE, 2017. – P. 135-140. doi: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109855.

118. Chervyakov, N. I. On RNS with VLSI-friendly diagonal function / N. I. Chervyakov, P. A. Lyakhov, N. F. Semyonova, M. V. Valueva // 2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – IEEE, 2017. – P. 131-134. doi: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109854.

119. Kaplun, D. I. Hardware Implementation of Video Processing Device using Residue Number System / D. I. Kaplun, N. I. Chervyakov, P. A. Lyakhov, A. S. Ionisyan, M. V. Valueva, V. V. Gulvanskiy // 2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP). – IEEE, 2019. – P. 701-704.

120. Lyakhov, P. A. Improving the Parallelism and Balance of RNS with Low-Cost and 2 k+ 1 Modules // International Conference on Actual Problems of Applied Mathematics and Computer Science. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2022. – pp. 381-390.

121. Lyakhov, P. A. A New Method of Sign Detection in RNS Based on Modified Chinese Remainder Theorem / P. A. Lyakhov, M. V. Valueva, D. I. Kaplun, A. S. Voznesensky // 2021 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). – IEEE, 2021. – pp. 1-4.

122. Lyakhov, P. A. Analysis of the quantization noise of linear time-invariant filters for image processing / P. A. Lyakhov, N. N. Nagornov, N. I. Chervyakov, D. I. Kaplun // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – IEEE, 2019. – P. 1192-1196.

123. Lyakhov, P. A. Increasing the Speed of Wavelet Image Processing with Decimation Using the Winograd Method / P. A. Lyakhov, N. N. Nagornov, N. F. Semyenova and A. S. Abdulsalyamova // 2023 Seminar on Signal Processing. – IEEE, 2023. – P. 79-82. doi: 10.1109/IEEECONF60473.2023.10366139.

124. Lyakhov, P. A. Low-bit hardware implementation of DWT for 3D medical images processing/ P. A. Lyakhov, M. V. Valueva, N. N. Nagornov, N. I. Chervyakov, D. I. Kaplun // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – IEEE, 2020. – pp. 1396-1399.

125. Lyakhov, P. A. On the computational complexity of 2D filtering by Winograd method / P. A. Lyakhov, A. S. Abdulsalyamova, N. F. Semyonova, N. N. Nagornov, A. S. Voznesensky, D. I. Kaplun // 2022 11th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). – IEEE, 2022. – P. 1-4.

126. Lyakhov, P. Comparison of Approaches to the Circuits Design for DWT with CDF 9/7 Wavelet / P. Lyakhov, N. Nagornov, M. Bergerman // International Conference on Mathematics and its Applications in new Computer Systems. – Cham: Springer International Publishing, 2021. – P. 1-9.

127. Lyakhov, P. Design reverse converter for balanced RNS with three low-cost modules / P. Lyakhov, M. Bergerman, N. Semyonova, D. Kaplun, A Voznesensky // 2021 10th mediterranean conference on embedded computing (MECO). – IEEE, 2021. – pp. 1-7.

128. Lyakhov, P. On the Algorithmic Complexity of Digital Image Processing Filters with Winograd Calculations / P. Lyakhov, A. Abdulsalyamova // International Conference on Mathematics and its Applications in new Computer Systems. – Cham: Springer International Publishing, 2021. – P. 71-89.

129. Matos, R. Efficient implementation of modular multiplication by constants applied to RNS reverse converters / R. de Matos, R. Paludo, N.I. Chervyakov, P. A. Lyakhov, H. Pettenghi // 2017 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). – IEEE, 2017. – P. 1-4. doi: 10.1109/ISCAS.2017.8050779.