

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе, доктор
технических наук, профессор

Воротилин Михаил Сергеевич

08.10.2026 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет» на диссертацию Ляхова Павла Алексеевича «Методы высокопроизводительной цифровой обработки сигналов на основе вычислений в системе остаточных классов», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей

1. Актуальность темы исследования

По оценке ведущей организации, проблематика диссертационного исследования обусловлена фундаментальным разрывом между экспоненциальным ростом объёмов цифровых данных и линейным наращиванием вычислительных мощностей традиционных архитектур. Данный разрыв усугубляется приближением кремниевых технологий к физическим пределам миниатюризации, что подтверждает стратегическую значимость поиска альтернативных вычислительных парадигм, к числу которых относится система остаточных классов (СОК). Ведущая организация отмечает, что исчерпание потенциала масштабирования кремниевых технологий, зафиксированное в отраслевых аналитических отчётах, делает переход к непозиционным вычислительным парадигмам не просто желательным, но объективно необходимым для обеспечения технологического суверенитета Российской Федерации в области микроэлектроники.

Эксперты ведущей организации констатируют, что, несмотря на значительный теоретический задел в области модулярной арифметики, накопленный отечественными и зарубежными научными школами, до настоящего времени отсутствовала целостная методология, объединяющая параллельную модулярную арифметику, блочную обработку данных и эффективные методы выполнения немодульных операций в единую технологию высокопроизводительной цифровой обработки сигналов (ЦОС). Именно восполнение данного пробела составляет основную научную заслугу автора. Широкое практическое применение СОК сдерживается ограничениями вычислительного диапазона и высокой сложностью реализации немодульных операций. Для разрешения данного противоречия в

науке автором сформулирована и решена научная проблема, заключающаяся в необходимости разработки моделей и методов параллельной обработки данных в СОК для создания технологии высокопроизводительной ЦОС. Поставленная цель исследования, а именно обеспечение требуемого уровня производительности систем ЦОС при сохранении показателей точности и качества восстановления данных, достигнута за счет разработки научно обоснованных математических моделей, методов и программного обеспечения параллельной обработки данных на основе СОК.

2. Оценка содержания диссертации

Диссертационная работа обладает четкой структурой и последовательной организацией материала, включая вводную часть, 6 глав, заключение, список литературы из 427 источников и 3 приложения. Общий объем основного текста исследования составляет 433 страницы печатного текста, включающего 54 таблицы и 116 иллюстраций. Во введении изложены актуальность темы, степень ее разработанности, цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы диссертационного исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов. В первой главе исследованы современные проблемы и подходы к улучшению эксплуатационных характеристик систем ЦОС, обоснован выбор СОК в качестве перспективной вычислительной базы. Вторая глава посвящена разработке обобщенной модели усовершенствованной ЦОС в СОК и архитектуры цифрового фильтра с использованием модулей специального вида. Третья глава описывает метод высокоскоростной вейвлет-фильтрации на основе блочной обработки данных с уменьшением количества операций умножения. В четвертой главе разработаны методы и архитектуры реализации немодульных операций в СОК, а именно обратного преобразования, определения знака, сравнения чисел и коррекции ошибок на основе аппарата дробных величин. В пятой главе предложен алгоритм масштабирования коэффициентов вейвлет-фильтров и метод пространственной вейвлет-обработки многомерных сигналов, включая трехмерные медицинские томограммы. В шестой главе представлена технология создания программно-аппаратных систем ЦОС в СОК, а также результаты их программного моделирования и верификации на платформах FPGA и ASIC. В заключении изложены результаты проведенного исследования, сформулированы рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. В приложениях представлены копии патентов, свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и акты внедрения результатов.

3. Научная новизна работы и полученных результатов, положений, выводов и рекомендаций

К положениям диссертационной работы, обладающим научной новизной, следует отнести:

- впервые разработанную обобщенную модель усовершенствованной ЦОС в СОК, отличающуюся системным объединением параллельной

модулярной арифметики, блочной обработки данных, методов выполнения немодульных операций на основе дробных величин и масштабирования коэффициентов фильтров;

- предложенную архитектуру цифрового фильтра в СОК с модулями специального вида, обеспечивающую распределенную параллельную обработку сигналов на упрощенных вычислительных элементах;

- разработанный метод высокоскоростной вейвлет-фильтрации с понижающей дискретизацией, сокращающий вычислительную сложность за счет блочной обработки и априорного масштабирования;

- созданные методы и архитектуры для реализации немодульных операций в СОК с использованием аппарата дробных величин для непосредственного вычисления позиционных характеристик без полного восстановления двоичного кода, что существенно снижает аппаратные затраты по сравнению с традиционными подходами;

- разработанные метод и алгоритм дискретного вейвлет-преобразования многомерных сигналов с использованием масштабированных коэффициентов и параллельной обработкой в СОК;

- впервые предложенную технологию создания программно-аппаратных систем ЦОС в СОК, использующую комплекс специализированных программных средств для автоматизации перехода от математического описания к аппаратной реализации.

Работа выделяется оригинальными решениями и методами, что подтверждает научную новизну исследования.

4. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность

Эксперты ведущей организации отмечают высокий уровень теоретической подготовки соискателя, проявляющийся в системном владении аппаратом теории чисел, модулярной арифметики и теории цифровой обработки сигналов. Математическая строгость доказательств, корректность применения методов моделирования и обширная экспериментальная база, включая верификацию на платформах FPGA и ASIC в средах MATLAB, Xilinx Vivado, Xilinx ISE, Synopsys Design Compiler, Yosys и OpenLane, позволяют заключить, что основные научные положения, выводы и рекомендации диссертации обоснованы и достоверны.

5. Значимость полученных автором диссертации результатов для развития соответствующей отрасли науки

Научная значимость для развития соответствующей отрасли знаний заключается в формировании нового методологического базиса высокопроизводительной ЦОС на основе СОК. Ляховым П. А. впервые разработана обобщенная модель усовершенствованной ЦОС в СОК, системно объединяющая параллельную модулярную арифметику, блочную обработку данных и аппарат дробных величин, что расширяет теорию непозиционных вычислений и устраняет фундаментальные ограничения

традиционных позиционных архитектур. Предложенные методы реализации немодульных операций на основе Китайской теоремы об остатках с дробными величинами решают многолетнюю научную проблему высокой сложности немодульных процедур в СОК, открывая новые направления исследований в области энергоэффективных и отказоустойчивых вычислительных систем. Разработанная технология сквозного проектирования программно-аппаратных комплексов ЦОС в СОК, включая алгоритм масштабирования коэффициентов фильтров с гарантированным качеством восстановления сигнала, формирует основу для дальнейшего развития отечественной элементной базы и специализированных процессоров обработки сигналов.

Полученные результаты создают инструментальную базу для решения прикладных инженерных задач в критически важных областях техники. Внедрение разработанных архитектур цифровых фильтров и методов вейвлет-обработки позволяет повысить производительность систем цифровой обработки сигналов в 2-4 раза при снижении аппаратных затрат до 4,8 раз, что подтверждено верификацией на платформах FPGA и ASIC. Практическая готовность разработанных решений подтверждена актами о внедрении, представленными в Приложении 3 диссертации, а также свидетельствами о государственной регистрации 12 программ для ЭВМ и 5 патентами РФ на изобретения. Это имеет прямое значение для развития технических систем медицинской диагностики, компьютерного зрения, беспилотного транспорта и спутниковой навигации, где требования к скорости и энергоэффективности определяют технический облик изделий.

6. Публикации апробация результатов работы

Основные положения и научные результаты работы достаточно полно изложены автором в 129 научных трудах, из них 3 монографии, 28 статей в рецензируемых научных изданиях ВАК, 31 статья в журналах, индексируемых в информационно-аналитических системах научного цитирования Web of Science и/или Scopus, 50 работ в сборниках трудов российских и международных конференций. Получено 5 патентов РФ на изобретения и 12 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Результаты диссертационного исследования подтверждены актами о внедрении в учебный процесс и научно-исследовательскую деятельность, копии которых представлены в Приложении 3 диссертации. Результаты работы апробированы на семинарах и конференциях различного уровня в России и за рубежом, включая мероприятия IEEE, FRUCT, MECO, SIBCON, TSP и другие. Высокая научная ценность работы подтверждается цитируемостью результатов (h -index=17 в Scopus, h -index=13 в Web of Science).

7. Реализация результатов диссертационного исследования

Основные результаты диссертационного исследования Ляхова П. А. получили фактическое подтверждение эффективности и были использованы

в рамках выполнения научно-технических проектов, финансируемых Министерством науки и высшего образования РФ, Российским научным фондом, Российским фондом фундаментальных исследований и Советом по грантам Президента РФ. Фактическое использование разработанных методов и программных продуктов подтверждено актами о внедрении результатов диссертационной работы, представленными в Приложении 3. В частности, зарегистрированные программы для ЭВМ и аппаратные решения, разработанные в рамках указанных проектов, применяются при решении задач медицинской визуализации, компьютерного зрения и нейросетевой обработки данных, что свидетельствует о высокой степени практической готовности результатов к использованию в реальном секторе экономики.

8. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации

На основании анализа диссертационной работы Ляхова П. А. рекомендуется следующее использование полученных результатов и выводов.

1. В научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах по созданию специализированных процессоров ЦОС, аппаратных ускорителей нейросетевых вычислений и энергоэффективных встраиваемых систем целесообразно использовать разработанную обобщенную модель усовершенствованной ЦОС в СОК, архитектуру цифрового фильтра с модулями специального вида и технологию сквозного проектирования программно-аппаратных комплексов. Указанные решения позволяют сократить время проектирования и обеспечить гарантированное повышение производительности в 2-4 раза при снижении аппаратных затрат до 4,8 раз по сравнению с традиционными позиционными реализациями.

2. В системах медицинской диагностики и телемедицины, требующих высокоскоростной обработки трехмерных томографических данных, рекомендуется внедрение предложенного метода пространственной вейвлет-фильтрации с масштабированными коэффициентами и алгоритма автоматического подбора параметра масштабирования. Применение данных разработок обеспечивает высокое качество восстановления медицинских изображений при существенном снижении вычислительной сложности, что критически важно для систем реального времени и портативного диагностического оборудования.

3. При разработке отказоустойчивых вычислительных систем для космической техники, беспилотного транспорта и критической инфраструктуры рекомендуется использование разработанных методов и архитектур немодульных операций на основе Китайской теоремы об остатках с дробными величинами. Данные методы обеспечивают снижение аппаратных затрат до 7 раз и повышение быстродействия до 27 раз по сравнению с классическими подходами, что позволяет реализовать эффективную избыточность и самодиагностику без значительного ухудшения эксплуатационных характеристик системы.

4. В образовательном процессе высших учебных заведений по направлениям подготовки, связанным с микроэлектроникой, параллельными вычислениями и цифровой обработкой сигналов, рекомендуется использование материалов диссертации и зарегистрированных программных комплексов для формирования компетенций в области альтернативных систем счисления, проектирования FPGA и ASIC-ускорителей и верификации цифровых устройств.

5. В качестве приоритетных направлений дальнейших исследований рекомендуется развитие следующих аспектов, обозначенных в диссертации: вывод аналитических критериев выбора модулей СОК под конкретные классы преобразований; расширение методологии блочной обработки данных на сверточные вычисления с произвольным шагом; углубление анализа накопления вычислительной погрешности при многоуровневых преобразованиях многомерных данных; исследование пределов масштабируемости СОК для данных высокой размерности и построение формальных моделей соотношения между параллелизмом, избыточностью кодирования и надежностью обработки. Реализация указанных направлений позволит вывести СОК на уровень универсального инструмента высокопроизводительной ЦОС.

9. Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует областям исследований паспорта научной специальности 2.3.5 «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей»: 1 – «Модели, методы и алгоритмы проектирования, анализа, трансформации, верификации и тестирования программ и программных систем»; 7 – «Модели, методы, архитектуры, алгоритмы, форматы, протоколы и программные средства человеко-машинных интерфейсов, компьютерной графики, визуализации, обработки изображений и видеоданных, систем виртуальной реальности, многомодального взаимодействия в социкиберфизических системах»; 8 – «Модели и методы создания программ и программных систем для параллельной и распределенной обработки данных, языки и инструментальные средства параллельного программирования».

10. Соответствие автореферата диссертации основному содержанию диссертации

Структура и содержание автореферата диссертации полностью соответствуют основному содержанию диссертации, отражая научные положения, результаты, основные выводы, научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы.

11. Соответствие диссертации и автореферата установленным требованиям

Структура и оформление диссертации и автореферата диссертации соответствуют требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления».

12. Замечания по диссертации

1. Метод Винограда и подход к масштабированию коэффициентов фильтров, разработанные в главах 3 и 5, предполагают априорную известность и неизменность коэффициентов используемых фильтров. Между тем автор упоминает возможность применения адаптивных фильтров (раздел 2.3, стр. 139), для которых коэффициенты изменяются в процессе функционирования. В диссертации отсутствует анализ деградации выигрыша в производительности при необходимости пересчёта вспомогательных матриц преобразования метода Винограда или повторного масштабирования коэффициентов в режиме реального времени. Указанное ограничение сужает область непосредственной применимости предложенных методов к задачам адаптивной фильтрации и обучения нейронных сетей в режиме онлайн, что целесообразно учитывать при практическом внедрении.

2. В диссертации все вычисления реализуются в формате с фиксированной запятой, что является необходимым условием применимости модулярной арифметики. Вместе с тем современные нейросетевые архитектуры обучаются преимущественно в форматах с плавающей точкой (FP32, BF16, FP16), а переход к инференсу в фиксированной точке требует решения отдельной задачи квантования весов и активаций. В работе не раскрыта методология взаимодействия предложенных модулярных ускорителей с конвейером подготовки моделей: не обсуждается влияние ошибки квантования на точность классификации при использовании СОК, не приведены данные о деградации функциональных показателей нейросети при переходе от обучения к модулярной реализации. Данное замечание не умаляет вклада автора, однако указывает на необходимость в будущих работах сформировать сквозную методологию «обучение - квантование - модулярная реализация».

3. Ряд экспериментальных результатов демонстрирует, что выигрыш в скорости и площади при использовании СОК сопровождается ростом энергопотребления. Так, для пятимодульной СОК с 64-битным диапазоном энергопотребление возрастает на 33 % по сравнению с позиционной реализацией (таблица 6.3). Аналогичная тенденция наблюдается для метода блочной обработки данных с децимацией, где рост мощности составляет до 344 % (таблица 6.7). Автор акцентирует внимание на улучшении задержки и площади, однако вопрос энергоэффективности, являющийся критическим для встраиваемых и мобильных приложений, не получил систематического анализа. В рекомендациях по практическому применению целесообразно более явно обозначить классы задач, для которых рост энергопотребления

является допустимым, и классы, где он ограничивает применимость предложенных решений.

Приведенные замечания носят частный характер и не влияют на общую положительную оценку в плане актуальности, научной новизны и полезности представленной работы, не затрагивают существа научных положений, выносимых на защиту, и не отрицают основных выводов, сформулированных в диссертации.

13. Заключение о соответствии диссертации требованиям п.п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении учёных степеней»

Диссертация является завершённой научно-квалификационной работой и отвечает требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Ляхов Павел Алексеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей.

14. Заключительное положение

Диссертация и отзыв на диссертационную работу обсуждены и одобрены на заседании кафедры «Информационная безопасность» Тульского государственного университета, протокол от 1 сентября 2026 г. № 1. Присутствовали 18 чел. Результаты открытого голосования: за – 18 чел., против – нет, воздержавшихся – нет.

Отзыв подготовили:

Директор института прикладной
математики и компьютерных наук,
заведующий кафедрой
«Информационная безопасность»
ФГБОУ ВО ТулГУ
доктор технических наук, доцент

Сычугов Алексей Алексеевич

Секретарь

Кузнецова Ольга Алексеевна