

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, доцента, проректора по научной работе
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»,

Рабина Алексея Владимировича

на диссертационную работу Ляхова Павла Алексеевича, выполненную на
тему «Методы высокопроизводительной цифровой обработки сигналов на
основе вычислений в системе остаточных классов», представленную на
соискание ученой степени доктора технических наук по специальности
2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем,
комплексов и компьютерных сетей

1. Актуальность избранной темы диссертационной работы

Проблема повышения производительности систем цифровой обработки сигналов (ЦОС) приобретает всё более острый характер в связи с непрерывным ростом объёмов обрабатываемых данных, увеличением размерности и цветовой глубины изображений, а также возрастающими требованиями к быстродействию в задачах, решаемых в режиме реального времени. Особую актуальность данная проблематика приобретает в контексте методов искусственного интеллекта (ИИ) и свёрточных нейронных сетей (СНС), где подавляющая часть вычислительных ресурсов расходуется на реализацию свёрточных операций. Традиционные позиционные системы счисления (ПСС), унаследованные от процессоров ранних поколений, в значительной степени исчерпали свой потенциал по наращиванию производительности, а приближение к физическим пределам миниатюризации кремниевых технологий требует поиска принципиально новых подходов к организации вычислений на арифметико-логическом уровне.

Система остаточных классов (СОК) представляет собой одну из наиболее перспективных альтернативных вычислительных парадигм, обеспечивающих естественное распараллеливание модульных операций сложения, вычитания и умножения. Однако практическое применение СОК в прикладных задачах ЦОС до настоящего времени сдерживалось рядом системных ограничений: высокой сложностью немодульных операций, ресурсоёмкостью обратного преобразования в ПСС, а также отсутствием целостной методологии комплексной оптимизации вычислительных процессов. В этой связи разработка моделей, методов и технологии высокопроизводительной ЦОС с вычислениями в СОК является своевременной и практически востребованной задачей, имеющей существенное значение для обеспечения технологического суверенитета РФ в области микроэлектроники, медицинской диагностики, систем компьютерного зрения и телекоммуникаций.

Таким образом, избранная тема исследования полностью актуальна и соответствует приоритетным направлениям развития вычислительной техники. В рамках исследования соискателем рассматривается задача

обеспечения требуемого уровня производительности систем ЦОС при сохранении показателей точности и качества восстановления данных за счёт разработки научно обоснованных математических моделей, методов и программного обеспечения параллельной обработки данных на основе СОК. Поставленная научная задача декомпозирована на 7 частных задач: от аналитического обзора и разработки обобщенной модели до создания архитектуры цифрового фильтра, методов блочной обработки, архитектур немодульных операций, алгоритмов вейвлет-обработки и, наконец, сквозной технологии создания программно-аппаратных систем ЦОС.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Диссертационная работа содержит последовательное изложение научных результатов, объединённых единой методологической концепцией. Каждый из шести основных научных результатов, выносимых на защиту, имеет строгое математическое обоснование и подтверждён результатами моделирования.

Обоснованность обеспечивается корректностью математической постановки задачи, включающей ограничения на динамический диапазон СОК, качество обработки в терминах пикового отношения сигнала к шуму (ПОСШ) и аппаратные ограничения платформ. Теоретический фундамент работы составляют строгие доказательства на основе аппарата теории чисел. В частности, соискателем доказаны теоремы 4.1 и 4.2, определяющие минимально необходимую разрядность дробных бит для гарантированно точного обратного преобразования и определения знака числа на базе Китайской теоремы об остатках с дробными величинами (КТОд), что исключает появление зон неопределённости. Доказано утверждение 2.1 о бесконечности множества попарно взаимно простых чисел специального вида, что гарантирует возможность построения СОК с любым требуемым динамическим диапазоном. Теоретический анализ ресурсозатрат выполнен на основе unit-gate модели (UGM).

Теоретические выкладки надёжно верифицированы масштабным аппаратным моделированием. Синтез и верификация разработанных архитектур проведены в современных системах автоматизированного проектирования (САПР) Xilinx Vivado, Xilinx ISE, Yosys, OpenLane и Synopsys Design Compiler на широком спектре платформ: программируемых пользователем вентильных матрицах (ППВМ) семейств Artix-7, Spartan-6, Virtex-6/7, Kintex-7, Kintex UltraScale, а также на интегральных схемах специального назначения (ИССН) с использованием библиотеки стандартных ячеек.

Дополнительную обоснованность практическим рекомендациям придаёт программное моделирование в среде MATLAB на наборах реальных трёхмерных медицинских томограмм. Экспериментально подтверждено отсутствие видимых артефактов и гарантированное достижение пороговых значений ПОСШ при использовании предложенного алгоритма масштабирования коэффициентов вейвлет-фильтров (ВФ).

Выводы и рекомендации диссертанта логически вытекают из полученных результатов и не содержат положений, не подкреплённых доказательствами. Степень обоснованности не вызывает сомнений.

3. Содержание диссертационной работы

Диссертация изложена на 433 страницах, включает введение, шесть глав, заключение, список литературы из 446 наименований и три приложения с патентами, свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ и актами о внедрении. Работа содержит 54 таблицы и 116 рисунков.

В первой главе проведён анализ подходов к улучшению характеристик систем ЦОС. Систематизированы перспективные методы: приближённые вычисления, метод Винограда, проектирование ускорителей на ППВМ и ИССН. Выявлено противоречие между скоростью модульных операций и ресурсоёмкостью немодульных процедур в СОК.

Вторая глава посвящена разработке обобщенной модели усовершенствованной ЦОС в СОК и архитектуры цифрового фильтра с модулями специального вида. Разработаны конструкции усечённых блоков умножения с накоплением (ТМАС), передающих векторы суммы и переноса на следующее звено без промежуточного суммирования, что позволяет использовать лишь один параллельно-префиксный сумматор (KSA) в конце цепочки.

В третьей главе представлен метод высокоскоростной вейвлет-фильтрации на основе блочной обработки данных. Впервые метод обобщён на случай фильтрации с понижающей дискретизацией: выведены аналитические зависимости для реализации свёрточных вычислений при произвольном шаге.

Четвёртая глава решает ключевую проблему СОК – сложность немодульных операций. Предложены методы и архитектуры обратного преобразования, определения знака, сравнения чисел и коррекции ошибок на базе КТОД, обеспечивающие переход от линейной к логарифмической вычислительной сложности.

Пятая глава содержит метод и алгоритм дискретного вейвлет-преобразования (ДВП) многомерных сигналов. Предложен алгоритм итерационного подбора параметра масштабирования коэффициентов ВФ, учитывающий накопительную погрешность и гарантирующий высокое качество восстановления сигнала.

Шестая глава описывает комплексную технологию создания программно-аппаратных систем ЦОС в СОК. Представлены результаты RTL-синтеза и верификации на ППВМ и ИССН. Отдельно продемонстрирована гибридная реализация СНС с аппаратным ускорением свёртки в СОК и архитектура отказоустойчивого модулярного нейрокомпьютера на базе сети Хопфилда.

Структура работы логична и последовательна: от математической постановки задачи к разработке базовых архитектур, преодолению фундаментальных ограничений СОК, адаптации для многомерных сигналов и созданию сквозной технологии проектирования.

4. Достоверность и новизна полученных результатов исследования

Достоверность обеспечивается полным совпадением аналитических оценок (UGM) с данными аппаратного моделирования в пяти САПР на семи типах платформ. Публикационная активность (129 работ, в т. ч. 3 монографии, 28 статей ВАК, 31 статья Scopus/WoS, 5 патентов, 12 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, h -индекс 17 в Scopus) подтверждает апробацию результатов.

Научная новизна заключается в следующем.

1. Впервые предложена *обобщенная модель ЦОС в СОК*, синергетически объединяющая параллельную модулярную арифметику, блочную обработку, немодульные операции на базе КТОд и целочисленное масштабирование.

2. Разработана *архитектура цифрового фильтра с ТМАС-блоками*, исключая использование промежуточных сумматоров KSA, что снижает задержку на 22–29% и аппаратные затраты в 1,7–4,8 раза по сравнению с ПСС.

3. Впервые *метод блочной обработки* обобщён для ДВП с понижающей дискретизацией, снижая вычислительную сложность до 72,9%.

4. Разработаны *архитектуры немодульных операций на базе КТОд*, обеспечивающие логарифмическую вычислительную сложность, ускорение до 27,14 раз при определении знака и снижение затрат до 7,07 раз при сравнении.

5. Выведен *алгоритм масштабирования коэффициентов ВФ*, математически строго решающий проблему накопительной погрешности и шума квантования при многоуровневом ДВП трехмерных сигналов.

6. Разработана *сквозная технология проектирования*, в рамках которой впервые предложена архитектура отказоустойчивого нейрокомпьютера, использующая сеть Хопфилда и КТОд для быстрой локализации ошибок без расширения базиса СОК.

5. Реализация результатов исследования

Результаты использованы в образовательном процессе ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», а также в рамках государственных заданий Минобрнауки РФ, грантов Российского научного фонда РФ, Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ и Совета по грантам Президента РФ. Практическая значимость подтверждена 5 патентами на изобретения, 12 свидетельствами о госрегистрации программ для ЭВМ и 5 актами о внедрении.

6. Замечания по диссертационной работе

Диссертация выполнена на высоком научном уровне и содержит значимые результаты, однако считаю необходимым высказать ряд замечаний и пожеланий, не снижающих общей положительной оценки работы.

1. В работе обоснованы преимущества различных наборов модулей системы остаточных классов, однако критерий выбора конкретной архитектуры при противоречивых требованиях к быстродействию, площади и энергопотреблению сформулирован недостаточно чётко. Так, в разделе 6.4

ускорение вейвлет-обработки достигается при увеличении аппаратных затрат, тогда как применение сбалансированного набора модулей в разделе 2.4 сопровождается снижением скорости. Следовало бы яснее показать, как на основе предложенной технологии выбирается решение при заданных ограничениях и где проходит граница его предпочтительности по сравнению с реализацией в позиционной системе счисления.

2. В разделе 5.3 качество обработки медицинских томограмм подтверждается в основном показателем пикового отношения сигнала к шуму и визуальным анализом томограммы «СТ_par_sin». При этом автор отмечает, что искажения особенно заметны на фрагментах костной ткани, представляющих интерес для диагностики. Для более убедительного обоснования заявленной применимости метода в медицинской диагностике целесообразно дополнить оценку исследованием сохранности значимых деталей на томограммах разных типов и экспертной оценкой полученных изображений.

3. В разделе 6.5 слой выбора максимальных элементов свёрточной нейронной сети реализован программно со ссылкой на сложность операции сравнения в системе остаточных классов. Между тем в разделе 4.3 диссертации предложены метод и аппаратная архитектура такого сравнения. Желательно пояснить, почему этот результат не использован в нейросетевой реализации, и оценить, как перенос операции выбора на аппаратный уровень повлиял бы на время обработки изображения, аппаратные затраты и обмен данными между программируемой пользователем вентильной матрицей и рабочей станцией.

Указанные недостатки не являются определяющими в работе и не снижают теоретической и практической значимости полученных результатов.

7. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней (пункты 9-14)

Диссертация Ляхова Павла Алексеевича «Методы высокопроизводительной цифровой обработки сигналов на основе вычислений в системе остаточных классов» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения и практические решения, совокупность которых квалифицируется как крупное научное достижение, имеющее существенное значение для развития теории и практики ЦОС, решающее крупную научную проблему создания технологии высокопроизводительной цифровой обработки одномерных и многомерных сигналов с вычислениями в СОК.

Содержание работы и основные научные результаты, выносимые на защиту, строго соответствуют областям исследований паспорта научной специальности 2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей, в частности, пунктам 1, 7 и 8.

Диссертационное исследование по своей высокой актуальности, уровню научной новизны, теоретической и практической ценности, степени обоснованности и достоверности полученных выводов, а также по полноте апробации и опубликования основных результатов в ведущих рецензируемых научных изданиях в полной мере отвечает критериям, установленным пунктами 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, в действующей редакции, которые предъявляются к докторским диссертациям. Автореферат адекватно отражает основное содержание диссертационной работы.

Таким образом, автор диссертации, Ляхов Павел Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей.

Официальный оппонент

доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

«23» 09 2026 г.

А.В. Рабин

Сведения об оппоненте:

Рабин Алексей Владимирович, гражданин Российской Федерации, доктор технических наук по специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций, проректор по научной работе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

Адрес: 193232, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков д.22, к.1.

Тел: +7 (812) 326-31-63, E-mail: rabin.av@sut.ru.

Адрес сайта организации: <https://www.sut.ru/>.

Подпись официального оппонента Рабина А.В., доктора технических наук, доцента, проректора по научной работе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

«ЗАВЕРЯЮ»