

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, доцента, временно исполняющего должность
начальника научно-исследовательского центра Федерального
государственного казенного военного образовательного учреждения высшего
образования «Военная орденов Жукова и Октябрьской Революции
Краснознаменная академия защиты информации имени генерала армии
С.М.Штеменко» Министерства обороны Российской Федерации»,
Сергея Александровича Диченко
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.

Актуальность избранной темы

Современные системы цифровой обработки сигналов (ЦОС) сталкиваются с критическим противоречием: с одной стороны, стремительное увеличение объемов многомерных данных (изображений, видео) и повсеместное внедрение ресурсоемких технологий искусственного интеллекта требуют все более высокой скорости и качества вычислений, с другой стороны, существующие вычислительные мощности и традиционные подходы к обработке не успевают за этим ростом, что приводит к снижению производительности и ограничивает практическое применение таких систем. Противоречие между нарастающей практической потребностью в быстрой и качественной обработке сигналов и недостаточной эффективностью существующих средств обуславливает острую актуальность темы диссертационного исследования, которое направлено на разработку новых или существенное усовершенствование уже известных методов ЦОС, способных удовлетворить современные требования и быть внедренными в различные сферы человеческой деятельности.

В диссертации отмечено, что существует множество перспективных теоретических решений для повышения производительности систем ЦОС, в том числе приближенные вычисления, учет неявной информационной избыточности и использование вычислительных блоков с упрощенной структурой. Большинство из них по-прежнему опираются на традиционные позиционные системы счисления, что в условиях приближения к пределу миниатюризации кремниевых технологий существенно сдерживает вычислительные возможности, особенно для встраиваемых проблемно-ориентированных процессоров. Важным направлением является развитие высокопроизводительных реконфигурируемых архитектур, а среди альтернативных числовых систем особого внимания заслуживает система остаточных классов (СОК). СОК является непозиционной системой счисления, что позволяет за счет оперирования малыми остатками реализовать

распараллеливание вычислений на арифметико-логическом уровне и существенно ускорить выполнение арифметических операций, лежащих в основе методологии ЦОС.

Таким образом, тема диссертационного исследования, направленная на обеспечение требуемого уровня производительности систем ЦОС при сохранении требуемых показателей точности и качества восстановления данных за счет разработки научно-обоснованных математических моделей, методов и программного обеспечения параллельной обработки данных на основе СОК, является актуальной и имеет важное научное значение для обеспечения требуемого уровня производительности в современных вычислительных системах.

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

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, представленных в диссертационной работе, обеспечивается следующим:

1. Корректностью постановки задач исследования. Автор четко формулирует цель работы – обеспечение требуемого уровня производительности систем ЦОС при сохранении требуемых показателей точности и качества восстановления данных за счет разработки научно обоснованных математических моделей, методов и программного обеспечения параллельной обработки данных на основе СОК. Определяет научную проблему, заключающуюся в необходимости разработки моделей и методов параллельной обработки данных в СОК для создания технологии высокопроизводительной ЦОС, 7 последовательных задач, решение которых приводят к разрешению научной проблемы и достижению поставленной цели. Математическая постановка задачи в разделе 1.5 включает исходные данные задачи, вводимые ограничения, ожидаемые результаты и критерии оптимальности.

2. Глубоким анализом предметной области. В главе 1 приведен аналитический обзор современных проблем, а также перспектив вычислительных подходов к улучшению эксплуатационных характеристик систем ЦОС, структурных решений для улучшения их технических характеристик и вычислительные платформы для аппаратной реализации программных решений в области ЦОС. Выявлено, что многие актуальные подходы к улучшению эксплуатационных характеристик систем ЦОС имеют потенциал комбинирования с модулярными вычислениями. Также определена эффективность программируемых пользователем вентильных матриц (ППВМ) и интегральных схем специального назначения (ИССН) в качестве вычислительных платформ для проектирования и эксплуатации систем ЦОС. Результаты анализа позволили автору сформулировать направления собственных исследований.

3. Применением известного математического аппарата. В работе использованы математический аппарат теории чисел, теории алгоритмов, теории модулярной арифметики, высшей алгебры, системного анализа, математического моделирования и программного моделирования в среде MATLAB.

4. Сравнением с известными результатами. Программное моделирование подтвердило эффективность разработанной технологии: для КИХ-фильтров в СОК достигнуто снижение задержки до 1,8 раза и аппаратных затрат до 4,8 раз; сбалансированный набор модулей позволил сократить аппаратные расходы до 23% и энергопотребление до 22,3%. Разработанные методы на основе дробных величин обеспечили повышение производительности при обратном преобразовании в 1,4-4,7 раза, при определении знака – до 27,14 раз, при сравнении чисел – снижение затрат до 7,07 раз, при обнаружении ошибок – повышение производительности до 13 раз и снижение затрат до 31,63%. Вейвлет-обработка повысила производительность до 66% (ценой роста затрат), ДВП трехмерных сигналов – в 2,89–3,59 раза, нейросетевые вычисления – на 58,89%, а сеть Хопфилда с Китайской теоремой об остатках на дробных величинах показала уменьшение задержки в 1,2–3,8 раза и аппаратных ресурсов в 1,5-3,3 раза по сравнению с альтернативными подходами.

5. Апробацией и внедрением. По теме диссертации автором было опубликовано 129 работ, в том числе 3 монографии, 28 статей в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, 31 статья в журналах, индексируемых в международных базах Scopus и/или Web of Science, 50 работ – в сборниках трудов российских и международных конференций, получено 5 патентов на изобретения и 12 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Внедрены в реализацию научного проекта АПУ-131/МК «Исследование применения системы остаточных классов для адаптивного фильтра с конечной импульсной характеристикой», в работу ООО НПФ «Модем», ООО «Стилсофт», ООО «Онлайн Патент» и учебный процесс кафедры математического моделирования факультета математики и компьютерных наук имени профессора Н.И. Червякова ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет». Результаты исследования получены при поддержке шести проектов РФФИ, двух проектов РНФ, трех грантов Президента РФ и ряда проектов Минобрнауки России, что подтверждает их востребованность и финансируемую актуальность.

Достоверность и новизна

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается корректным и обоснованным применением классических методов

исследования, строгими математическими доказательствами и результатами анализа эффективности разработанных методов на базе вычислительных платформ FPGA и ASIC в САПР Xilinx ISE, Xilinx Vivado Design Suite, Yosys, OpenLane и Synopsys Design Compiler. Результаты согласуются с проведенными экспериментами.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Разработана обобщенная модель усовершенствованной ЦОС в СОК, отличающаяся от известных системным объединением параллельной модулярной арифметики, блочной обработки данных, методов выполнения немодульных операций на основе дробных величин и масштабированием коэффициентов фильтров, обеспечивающая комплексное повышение производительности систем цифровой обработки сигналов (п. 1 паспорта специальности 2.3.5 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей»).

2. Разработана архитектура цифрового фильтра, отличающаяся от известных параллельной обработкой сигналов в СОК с модулями специального вида на упрощенных вычислительных элементах компонент обобщенной модели, обеспечивающая распределенную обработку данных (п. 7 паспорта специальности 2.3.5 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей»).

3. Предложен метод высокоскоростной вейвлет-фильтрации сигналов, отличающийся от известной блочной обработки данных с уменьшением количества используемых умножений, обеспечивающий ресурсоэффективную реализацию многоуровневых преобразований (п. 7 паспорта специальности 2.3.5 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей»).

4. Разработаны методы и архитектуры для реализации немодульных операций в СОК, отличающиеся от известных использованием аппарата дробных величин для непосредственного вычисления позиционных характеристик без полного восстановления двоичного кода, обеспечивающие существенное снижение вычислительной сложности по сравнению с известными аналогами (п. 7 паспорта специальности 2.3.5 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей»).

5. Разработаны метод и алгоритм дискретного вейвлет-преобразования многомерных сигналов, отличающиеся от известных использованием масштабированных коэффициентов и параллельной обработкой СОК, обеспечивающие комплексную реализацию обобщенной модели для задач обработки изображений (п. 7 паспорта специальности 2.3.5 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей»).

6. Разработана технология создания программно-аппаратных систем цифровой обработки сигналов в СОК, отличающаяся от известных

использованием комплекса специализированных программных средств для автоматизации преобразования математического описания в аппаратную реализацию, обеспечивающая улучшение технических характеристик разрабатываемых систем (п. 8 паспорта специальности 2.3.5 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей»).

Практическая и теоретическая значимость.

Работа имеет как теоретическое, так и практическое значение. Полученные результаты позволяют:

- создавать программно-аппаратные системы высокопроизводительной ЦОС на основе СОК;
- уменьшать вычислительную сложность методов ЦОС;
- улучшать эксплуатационные характеристики систем ЦОС.

Теоретическая значимость полученных результатов подтверждается цитированием опубликованных результатов в международных научных изданиях: 836 ссылок в Web of Science (h -index=13), 1250 ссылок в Scopus (h -index=17).

Практическая значимость результатов диссертации подтверждается наличием патентов, свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и актов о внедрении в учебные, научные и производственные процессы.

Общая характеристика диссертации и автореферата диссертации.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, перечня используемых сокращений, списка литературы с 446 источниками и 3 приложений с патентами, свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ и актами о внедрении результатов диссертационной работы.

В работе получены следующие основные результаты:

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

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

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

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

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

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

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации. Диссертация и автореферат диссертации оформлены в соответствии с установленными требованиями.

К недостаткам работы следует отнести следующие замечания:

1. В работе предложены эффективные методы выполнения немодульных операций и обратного преобразования на основе дробных величин, что существенно снижает аппаратные затраты. Однако любая система ЦОС в СОК требует прямого и обратного преобразования на границах вычислительного тракта. Было бы полезно сформулировать обобщенную инженерную рекомендацию: при каких минимальных порядках цифровых фильтров или разрядностях сигналов накладные расходы на конвертацию между ПСС и СОК полностью нивелируются выигрышем от параллельного конвейера? Наличие такого «порога эффективности» облегчило бы внедрение полученных разработок в индустрии.

2. В главе 5 диссертации отмечается высокая значимость разработанных алгоритмов масштабирования коэффициентов вейвлет-фильтров для обработки 3D-медицинских томограмм. Известно, что медицинская визуализация подвергается строгому нормативному контролю, включая стандарты DICOM и требования регуляторов к отсутствию диагностически значимых потерь. Как предложенный метод целочисленного масштабирования и округления соотносится с требованиями сертифицирующих органов к «обратимости» или «допустимым артефактам» сжатия, и рассматривается ли вопрос программной сертификации комплекса?

3. В главе 6 представлена технология создания программно-аппаратных систем с использованием САПР и языков описания аппаратуры. Тем не менее, современная индустрия все чаще переходит к высокоуровневому синтезу, например, Vitis HLS, где алгоритмы описываются на C/C++. Планируется ли создание открытых библиотек, pragma-директив или плагинов для стандартных HLS-компиляторов, чтобы предложенные ТМАС- и ЕАС-ТМАС-блоки стали доступны широкому кругу разработчиков, не обладающих глубокой экспертизой в модулярной арифметике?

4. В главе 6 демонстрируется аппаратная реализация сверточных нейронных сетей в СОК, что дает выигрыш по площади и скорости. Однако в современной практике ускорения ИИ на edge-устройствах доминируют методы пост-тренировочного квантования и квантования в процессе обучения до форматов INT8 или INT4 в традиционной позиционной системе счисления. В работе не хватает прямого сопоставления предложенного подхода на базе СОК с современными квантованными ускорителями по ключевой для мобильных и встраиваемых систем метрике «производительность на ватт». Добавление такого сравнения позволило бы более объективно определить нишу, которую модулярные вычисления могут занять в эпоху доминирования квантованных архитектур.

5. В диссертации продемонстрирована эффективность СОК на классических ППВМ и ИССН. Однако сейчас стремительно развивается рынок периферийных вычислений и нейроморфных чипов, где энергоэффективность важнее абсолютной тактовой частоты. Насколько легко предложенная обобщенная модель и архитектуры на базе КТОд могут быть адаптированы для импульсных нейронных сетей или аналоговых вычислителей в памяти, где парадигма СОК может дать еще больший синергетический эффект?

6. В выводах к главам диссертации представлены ссылки на рецензируемые научные издания, в которых соискатель единолично или в соавторстве опубликовал полученные основные результаты работы. Однако, принятый автором подход к простановке ссылок при описании самих полученных результатов затрудняет анализ полноты их опубликованности.

Отмеченные замечания не влияют на значимость полученных в диссертационной работе результатов.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней

Диссертационная работа Ляхова Павла Алексеевича на тему «Методы высокопроизводительной цифровой обработки сигналов на основе вычислений в системе остаточных классов» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная проблема – необходимость разработки моделей и методов параллельной обработки данных в СОК для создания технологии высокопроизводительной ЦОС.

По своей актуальности, научной новизне, теоретической значимости, обоснованности и достоверности полученных результатов диссертация полностью соответствует критериям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к докторским диссертациям.

Содержание диссертации соответствует пунктам 1, 7 и 8 паспорта специальности 2.3.5 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей».

Основные результаты работы в достаточной степени опубликованы в рецензируемых научных изданиях и апробированы на научных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Считаю, что 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

Временно исполняющий должность начальника научно-исследовательского центра Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военная орденов Жукова и Октябрьской Революции Краснознаменная академия защиты информации имени генерала армии С.М.Штеменко» Министерства обороны Российской Федерации», доктор технических наук, доцент

С. А. Диченко

«14» 09 2026 г.

Диченко Сергей Александрович.

Доктор технических наук, доцент, временно исполняющий должность начальника научно-исследовательского центра Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военная орденов Жукова и Октябрьской Революции Краснознаменная академия защиты информации имени генерала армии С.М.Штеменко» Министерства обороны Российской Федерации».

Почтовый адрес (рабочий): 350063, г. Краснодар, ул. Красина, д.4

Телефон рабочий: 8 (861) 268-38-05

Эл. почта: vazi@mil.ru

Подпись официального оппонента Диченко Сергея Александровича, доктора технических наук, доцента, временно исполняющего должность начальника научно-исследовательского центра Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военная орденов Жукова и Октябрьской Революции Краснознаменная академия защиты информации имени генерала армии С.М.Штеменко» Министерства обороны Российской Федерации» «ЗАВЕРЯЮ»

Начальник отдела кадров Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военная орденов Жукова и Октябрьской Революции Краснознаменная академия защиты информации имени генерала армии С.М.Штеменко» Министерства обороны Российской Федерации»

Ф. Ковнацкий