

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук Ляхова Павла Алексеевича по теме: «Методы высокопроизводительной цифровой обработки сигналов на основе вычислений в системе остаточных классов»

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

Современные тенденции роста объемов многомерных данных (изображений, видео, томограмм) и приближение к физическим пределам кремниевых технологий делают проблему вычислительной сложности систем цифровой обработки сигналов (ЦОС) одной из центральных для вычислительной техники. Особенно остро она проявляется в системах на основе искусственного интеллекта, где затраты на обучение и эксплуатацию моделей растут быстрее, чем производительность вычислительных средств. Представленное исследование, решающее задачу повышения производительности ЦОС за счет параллелизма на арифметическом уровне в системе остаточных классов, является своевременным и актуальным.

Автореферат диссертации Ляхова П.А. посвящен решению крупной научной проблемы – разработке моделей и методов параллельной обработки данных в системе остаточных классов (СОК) для создания технологии высокопроизводительной ЦОС. Проблема сформулирована корректно: при наличии развитой теории вычислений в СОК отсутствовал методологический аппарат, позволяющий системно применять ее при построении практических систем ЦОС с учетом ограничений на вычислительный диапазон и стоимости немодульных операций.

В работе получены следующие основные результаты:

- 1) разработана обобщенная модель усовершенствованной ЦОС в СОК и архитектура цифрового фильтра с использованием усеченных блоков умножения с накоплением (ТМАС) и модулей специального вида;
- 2) предложен метод высокоскоростной вейвлет-фильтрации на основе блочной обработки данных по методу Винограда, снижающий количество операций умножения;
- 3) разработаны ресурсоэффективные методы и архитектуры выполнения немодульных операций (обратное преобразование, определение знака, сравнение, коррекция ошибок) на основе Китайской теоремы об остатках с дробными величинами (КТОд);
- 4) создан алгоритм масштабирования коэффициентов вейвлет-фильтров, обеспечивающий заданное качество восстановления сигнала в терминах PSNR, и метод вейвлет-обработки многомерных сигналов с параллельными вычислениями в СОК;

5) сформирована технология сквозного проектирования программно-аппаратных систем ЦОС в СОК с верификацией на платформах FPGA и ASIC.

К сильным сторонам работы следует отнести следующее.

1) Целостность замысла. Результаты образуют единую линию: выбор наборов модулей специального вида, архитектура фильтра на усеченных блоках умножения с накоплением, блочная обработка по Винограду, немодульные операции на дробных величинах, масштабирование коэффициентов и, наконец, технология проектирования. Каждое звено закрывает одно из известных ограничений СОК, что и составляет методологическую ценность работы.

2) Уровень экспериментальной верификации, редкий для работ по модулярной арифметике. Результаты доведены до RTL-описаний и синтезированы в промышленных маршрутах FPGA и ASIC, а сравнение выполнено не только с позиционной системой счисления, но и с внешними реализациями.

3) Внимание к вычислительной погрешности – традиционно слабому месту применения СОК в ЦОС: анализ шума квантования фильтров, учет накопления ошибки при многоуровневом дискретном вейвлет-преобразовании и алгоритм подбора параметра масштабирования по заданному порогу PSNR.

4) Практическая направленность и завершенность программной части: приложения к трехмерным медицинским томограммам, сверточным нейронным сетям и отказоустойчивым сетям Хопфилда; комплекс программных средств, защищенный 12 свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ, и 5 патентов на изобретения.

5) Высокий уровень публикаций и признание результатов научным сообществом: 129 работ, из них 31 статья в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science, значительная часть – в журналах первого квартиля, 3 монографии, включая главу в издательстве Springer; апробация на ведущих международных конференциях; поддержка исследований 14 научными проектами Минобрнауки России, РНФ, РФФИ и Президента РФ.

6) Качество подготовки автореферата: все обязательные разделы присутствуют, цель, семь задач, шесть пунктов научной новизны, шесть положений и шесть итогов исследования взаимно согласованы, соответствие паспорту специальности обосновано по конкретным направлениям исследований.

Научная новизна и практическая значимость работы не вызывают сомнений. Результаты внедрены в учебный процесс и используются в рамках грантов РНФ и РФФИ, что подтверждает их востребованность. По содержанию автореферата диссертации имеются следующие замечания.

1. Автор справедливо отмечает высокую эффективность блочной обработки по методу Винограда для вейвлет-фильтрации. Однако в автореферате указано лишь, что наборы точек интерполяции выбраны

«наиболее эффективные с точки зрения вычислительной сложности» (с. 11), без формулировки самого критерия. Желательно пояснить, по какому правилу выбираются точки многочлена Лагранжа при синтезе фильтров высокого порядка, чтобы минимизировать число ненулевых и нетривиальных элементов матриц преобразования, и чем объясняется различие оценок снижения вычислительной сложности – до 84 % и до 72,9 %.

2. Методы выполнения немодульных операций основаны на Китайской теореме об остатках с дробными величинами. Подходы с приближенным вычислением позиционной характеристики известны (работы T. V. Vu, C. Y. Hung и B. Parhami), а первые результаты автора по этому направлению опубликованы в 2012–2014 гг. В автореферате следовало бы более четко выделить, в чем состоит отличие предложенных методов от известных – в выборе разрядности дробной части, в двухэтапной схеме уточнения знака или в архитектурных решениях, – а также привести строгое обоснование минимально необходимой разрядности $\tilde{N}$ и N , гарантирующей корректность обратного преобразования и определения знака для произвольного набора модулей.

3. Алгоритм масштабирования коэффициентов вейвлет-фильтров (рис. 8) подбирает параметр k по значению PSNR, вычисляемому относительно эталонного изображения, то есть представляет собой настройку на данных. Из автореферата неясно, как обеспечивается заявленная «гарантия» качества для изображений, не входивших в тестовый набор, является ли зависимость PSNR от k монотонной (в противном случае цикл на рис. 8 может завершиться в локальной точке) и как именно в аналитической модели учитывается кумулятивный эффект квантования и повышающей дискретизации при многоуровневом обратном синтезе трехмерных сигналов.

4. Результаты представлены преимущественно в форме «до N раз» по отдельным показателям, тогда как по совокупным метрикам картина неоднозначна. Так, по таблице 1 предложенный набор модулей уступает известному набору на сумматорах KSA по произведению площадь $\times$ задержка при всех порядках фильтра, а снижение мощности на 22 % при росте задержки в 1,8–2,3 раза означает рост энергии на один отсчет. Желательно привести единую метрику эффективности, объяснить расхождение теоретических и синтезированных оценок и указать, включены ли в них прямой и обратный преобразователи между позиционной системой счисления и СОК.

5. Актуальность работы во многом мотивирована системами искусственного интеллекта, однако нейросетевая часть представлена одним экспериментом с четырехслойной сетью (таблица 4), в котором аппаратная реализация слоя свертки на FPGA сравнивается с программной реализацией в MATLAB. Полученный прирост 58,89 % обусловлен переносом вычислений на аппаратуру, а не применением СОК; для корректной оценки требуется сравнение с реализацией того же слоя в позиционной системе счисления на той

же плате. Для отказоустойчивой сети Хопфилда (с. 23) приведены только аппаратные показатели блоков КТОД; не указано, какая кратность ошибок обнаруживается и исправляется и ценой какой избыточности. Работу усилило бы сопоставление с современными зарубежными ускорителями нейронных сетей на основе СОК.

6. Имеются отдельные неточности изложения. Утверждение «работа носит теоретический характер» (с. 5) не согласуется с наличием актов внедрения и выводом о «важном хозяйственном значении» (с. 24), а практическая значимость подтверждается в основном наукометрическими показателями. На рисунках 2–3 элементы задержки подписаны как коэффициент b_0 ; в п. 2 метода определения знака упоминаются «константы k_i », не определенные в п. 1; в формуле (10) смешаны обозначения K и N .

Вышеприведенные замечания не умаляют ценности работы, носят преимущественно дискуссионный и уточняющий характер и могут быть обсуждены на защите. Диссертация Ляхова П.А. представляет собой законченное научное исследование, выполненное на высоком научном уровне, обладает существенной научной новизной и практической значимостью и вносит заметный вклад в развитие теории и практики цифровой обработки сигналов на основе модулярных вычислений. Она соответствует паспорту специальности 2.3.5 и требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, 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.

Доктор технических наук, профессор,
руководитель Центра искусственного
интеллекта, заведующая кафедрой
анализа данных и искусственного
интеллекта факультета компьютерных
технологий и прикладной математики
Кубанского государственного университета,
г. Краснодар

350040, Россия, г. Краснодар, ул. Полины Осипенко, 141, 157

Тел.: +7 (918) 980-00-03

E-mail: savanna-05@mail.ru, aicenter@kubsu.ru

Я, Коваленко Анна Владимировна, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Коваленко Анна Владимировна

«21» сентября 2026 г.