

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

**доктора технических наук, доцента Ручая Алексея Николаевича**

на диссертационную работу Бергермана Максима Валерьевича

«Моделирование высокоскоростного сжатия и восстановления изображений на основе дискретного вейвлет-преобразования с вычислениями по методу Винограда», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки).

### **1. Актуальность темы диссертационного исследования**

Введение цифровых методов обработки изображений (ЦОИ) и сигналов (ЦОС) стало критически важным для развития технологий в таких сферах, как телекоммуникации, электроника и медицина. Стремительное распространение этих технологий ставит актуальной задачу повышения производительности вычислений соответствующих аппаратно-программных комплексов. Особую значимость приобретает оптимизация алгоритмов сжатия визуальных данных, так как существующие объёмы и требования к скорости их обработки превышают возможности традиционных методов. Современные методы сжатия опираются на два подхода: сжатие с потерями (высокий коэффициент сжатия за счёт удаления наименее визуально воспринимаемых данных) и сжатие без потерь (гарантирует сохранение высокого качества исходного изображения, но с умеренной степенью сжатия).

Наиболее эффективным математическим аппаратом для выполнения сжатия является дискретное вейвлет-преобразование (ДВП). Посредством вейвлет-фильтров ДВП выполняется многомасштабный анализ изображения, эффективно разделяя значимые компоненты и избыточные данные, что позволяет достигать высокой степени сжатия при сохранении приемлемого визуального качества. Такие принципы используются в стандарте JPEG XS, разработанном для приложений, критичных к задержкам, вычислительным

ресурсам и энергопотреблению. В отличие от других стандартов, JPEG XS обеспечивает сжатие с сохранением высокого визуального качества, что делает его стандартом для видеовещания, IP-трансляций, телемедицины, а также для систем AR/VR, автономные транспортные средства и БПЛА.

## **2. Структура и основное содержание диссертационной работы**

Диссертация имеет логичную структуру, что даёт возможность последовательно и полно исследовать предложенные в работе методы и алгоритмы. Она состоит из введения, четырех глав, заключения, списка обозначений и сокращений, списка литературы и 10 приложений. Объем основного текста работы составляет 189 страниц, включая 36 рисунков и 16 таблиц.

**Введение** содержит обоснование актуальности темы диссертационного исследования, сформулированы его цель и научная задача, определены объект и предмет. Здесь же представлены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведён анализ существующих методов сжатия и восстановления цифровых изображений. В качестве перспективного направления выделен современный стандарт JPEG XS, основанный на ДВП. Рассмотрены классические подходы к реализации ДВП, основанные на операциях свёртки и лифтинговых схемах, предполагающих последовательную обработку пикселей. Проанализированы основные способы повышения быстродействия алгоритмов сжатия и восстановления. В качестве наиболее эффективного метода для достижения высокой скорости вычислений идентифицирован метод Винограда. На основе проведённого анализа сформулирована общая научная задача исследования и осуществлена её декомпозиция на три частные задачи.

**Вторая глава** посвящена разработке математической модели сжатия и восстановления изображений на основе ДВП с вычислениями по методу Винограда, что составляет первый научный результат, выносимый на защиту.

В отличие от стандартного матричного умножения, метод Винограда обладает более низкой вычислительной сложностью. Его ключевое преимущество — возможность обработки группы пикселей с сокращением количества трудоёмких операций умножения за счёт увеличения числа операций сложения в расчёте на один пиксель. Приведена формула для выполнения одномерной свёртки по методу Винограда. Разработаны схемы прямого и обратного ДВП с использованием данного метода. На основе этих архитектур построены математические модели сжатия и восстановления изображений, опирающиеся на матричные вычисления Винограда.

**В третьей главе** представлен численный метод и соответствующие алгоритмы формирования матриц преобразования Винограда, что составляет второй научный результат, выносимый на защиту. Размерность и значения элементов матриц определяются на основе следующих параметров: количество пикселей обрабатываемого изображения, размер вейвлет-фильтра и выбор произвольных точек для интерполяционного многочлена Лагранжа. В зависимости от заданных параметров производится оценка требуемого количества операций умножения и сложения при различном числе одновременно обрабатываемых пикселей. Показано, что увеличение размера обрабатываемого фрагмента пикселей приводит к снижению среднего числа операций умножения и росту количества операций сложения.

**В четвёртой главе** разработан программный комплекс сжатия и восстановления изображений на основе ДВП с применением метода Винограда, что составляет третий научный результат, выносимый на защиту. Разработанный метод продемонстрировал превосходство в производительности по сравнению с существующими аналогами. Результаты программно-аппаратного моделирования продемонстрировали прирост производительности на 109,07% для прямого ДВП и на 144,43% для обратного ДВП, что, однако, сопровождается увеличением аппаратных и энергетических затрат. Высокая скорость обработки изображений достигнута при

использовании метода Винограда при обработке фрагмента из 3 пикселей для прямого ДВП и при обработке фрагмента из 4 пикселей – для обратного ДВП.

**Заключение** содержит основные теоретические выводы проведённого исследования, а также обобщены полученные практические результаты.

### **3. Достоверность результатов диссертации, публикации и апробация по работе**

Достоверность научных положений, результатов и выводов диссертации обеспечивается корректным и обоснованным применением классических методов исследования, строгими математическими доказательствами и верификацией разработанных моделей и метода посредством анализа их эффективности на вычислительных платформах FPGA и ASIC в средах Xilinx Vivado Design Suite и OpenLane. Теоретические выводы исследования находят полное подтверждение в результатах проведенных экспериментов.

Основные результаты научного диссертационного исследования отражены в 12 работах, среди которых: 2 журнальные статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Высшей Аттестационной Комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации; 3 статьи в журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science; 3 публикации тезисов докладов конференций в научных изданиях Scopus и Web of Science. Соискателем получены 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Внедрение разработок подтверждено актами от компаний ООО «Стилсофт» и в ООО «Онлайн патент». Результаты исследования использованы в рамках научного проекта АПУ-131/МК, а также в образовательном процессе по программе 01.03.02 «Прикладная математика и информатика» ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет».

### **4. Новизна и значимость исследования**

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что

1. Разработанные математические модели сжатия и восстановления изображений на основе ДВП с вычислениями по методу Винограда отличаются от известных моделей групповой обработкой фрагментов изображений.

2. Разработанный численный метод составления матриц метода Винограда в задачах сжатия и восстановления изображений отличается от известных методов выбором произвольных параметров размера фрагмента изображения и вейвлет-фильтров.

3. Разработанный программный комплекс моделирования сжатия и восстановления изображений на основе ДВП с вычислениями по методу Винограда отличается от известных комплексов высокой скоростью выполнения прямого и обратного ДВП для сжатия и восстановления изображения.

Практическая значимость работы подтверждается результатами моделирования, показавшими повышение вычислительной производительности предложенных методов по сравнению с известными аналогами. Разработанные математические модели, численный метод и программный комплекс для сжатия и восстановления изображений представляют ценность для внедрения в области телемедицины, телевидения, а также в устройствах VR/AR, работающих с изображениями сверхвысокого разрешения (вплоть до 8K).

## **5. Характеристика работы в целом**

Диссертация М.В. Бергермана отличается четкой структурой и логичной последовательностью изложения материала. Каждая глава завершается содержательными выводами, обобщающими полученные результаты.

Автор демонстрирует глубокую теоретическую подготовку в ключевых для исследования областях: разработка математических моделей сжатия и восстановления изображений на основе ДВП с применением метода Винограда, методы составления соответствующих матриц, а также

фундаментальные знания в области цифровой обработки сигналов, теории алгоритмов, алгебры, численных методов и математического моделирования.

Обоснованность выводов о высокой эффективности разработанных методов подтверждается результатами вычислительного эксперимента. Автором показано, что предложенный подход обеспечивает превосходящую производительность при моделировании прямого и обратного ДВП по сравнению с известными аналогами.

## **6. Замечания по диссертации**

1. Непонятно, зачем в рамках исследования проводится теоретический анализ количества сложений и умножений, необходимых для свертки без децимации, если речь идет о вейвлет-преобразовании изображений.

2. Неясно, как определяется набор точек для составления многочлена Лагранжа. Почему это не учитывается в разработанном методе составления вспомогательных матриц преобразования согласно рисункам 3.1 и 3.3 диссертации?

3. Эксперименты проведены только на статичных изображениях, отсутствует моделирование на видеопоследовательностях, хотя метод ориентирован на стандарт JPEG XS, включающий видео.

4. Хотя в Приложениях В, Г, Д, Е, Ж, И, К упомянуты программные и аппаратные реализации, для полной воспроизводимости и обобщаемости результатов необходимо более детальное описание условий проведения экспериментов. Это включает версии используемого программного обеспечения, характеристики аппаратных платформ (FPGA/ASIC) и наборы данных.

5. Исследование нацелено на повышение скорости обработки изображений, и результаты аппаратного моделирования показывают улучшение производительности. Однако, для всесторонней оценки, необходимо более глубокое теоретическое и эмпирическое сравнение вычислительной сложности предложенного метода с другими известными

методами ускорения ДВП, помимо общего заявления о значительном улучшении производительности.

6. В диссертационной работе не представлено явное указание на ограничения разработанного метода в виде отдельного подраздела. Однако, результаты аппаратного моделирования демонстрируют компромиссы между производительностью и ресурсными затратами, что является по сути ограничениями. Также, снижение битовой глубины входного изображения накладывает ограничения на точность. Ограничения, которые необходимо было указать:

Результаты аппаратного моделирования показывают, что увеличение размера фрагмента обрабатываемых пикселей значительно увеличивает затраты на оборудование (от 3,83 до 55,62 раза) и энергопотребление (от 7,85 до 3250,69 раза), при этом задержка вычислений также возрастает. Отсутствие явного обсуждения компромисса между достигнутой производительностью и увеличением аппаратных затрат (площадь кристалла, энергопотребление) при масштабировании метода, особенно для больших размеров изображений.

Влияние уменьшения битовой глубины входного изображения на общую точность вычислений и качество восстановления, а также на применимость метода в сценариях, где визуальная оценка качества человеком критична.

Если метод Винограда имеет специфические ограничения при работе с определенными типами данных или в условиях высокого шума, это следует явно обозначить.

Сравнение с более широким спектром современных методов сжатия и восстановления изображений (включая основанные на нейронных сетях) может выявить дополнительные ограничения в применимости предложенного метода.

Вышеперечисленные замечания не снижают общей ценности работы.

## 7. Заключение по диссертационной работе

Представленную к защите диссертационную работу соискателя Бергермана М.В. оцениваю положительно. Автореферат в достаточной степени отражает основное содержание диссертационного исследования.

Диссертация Бергермана Максима Валерьевича «Моделирование высокоскоростного сжатия и восстановления изображений на основе дискретного вейвлет-преобразования с вычислениями по методу Винограда» является законченной научно-квалификационной работой и соответствует пунктам 6, 8, 9 паспорта научной специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки).

Диссертационная работа удовлетворяет требованиям пунктов 9-11, 13 и 14 постановления Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 года «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, Бергерман Максим Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки).

### ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ

Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой компьютерной безопасности и прикладной алгебры математического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Челябинский государственный университет»



**Ручай Алексей Николаевич**

«30» декабря 2025 г.

Ручай Алексей Николаевич  
заведующий кафедрой  
компьютерной безопасности и  
прикладной алгебры