

На правах рукописи

Быстров Кирилл Сергеевич

**Исследование и разработка видео кодека на основе
многоканального вейвлет преобразования**

Специальность 05.12.13 —
«Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва — 2020

Работа прошла апробацию на кафедре «Мультимедийных технологий и телекоммуникации» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель:

доктор технических наук, член-корр. РАН,
заведующий кафедрой
Дворкович Александр Викторович

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов».

Защита состоится 23.12.2020 в 12:00 на заседании диссертационного совета ФРКТ.05.12.13.007 по адресу 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) <https://mipt.ru/education/post-graduate/soiskateli-tekhnicheskie-nauki.php>

Работа представлена «13» октября 2020 г. в Аттестационную комиссию федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук в соответствии с п.3.1 ст. 4 Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике».

Общая характеристика работы

Актуальность работы. С развитием телекоммуникационных систем и мультимедийных технологий неуклонно растут объёмы передаваемых медиаданных, а вместе с ними повышаются и требования к эффективности работы систем кодирования информации, в том числе к алгоритмам сжатия видеоконтента. Как было показано в отчетах Cisco, прогнозирующих специфику развития телекоммуникационных сетей в период 2017-2022, доля передаваемого видеоконтента в сети интернет увеличится с 75% в 2017 году до 82% в 2022 году.

Кроме того, увеличиваются и средние объёмы передаваемых видео данных в связи с увеличением разрешения изображений в современных форматах цифрового видео. По данным другого отчета Cisco на период 2018-2023 к 2023 году около 66% выпускаемых телевизоров будут иметь разрешение экрана ультра высокой четкости (UHD – Ultra High Definition), против 33% на 2018 год. При этом технология телевидения ультра высокой четкости потребует скорости битового потока около 15-18 МБит/с, что примерно в 2 раза больше, чем для телевидения высокой четкости (HD – High Definition). Также необходимо учитывать, что общий объем видео данных в интернет трафике увеличивается за счет широкого использования сервисов потокового телевидения, систем облачного хранения данных, увеличения числа камер безопасности и других устройств, осуществляющих передачу видео через интернет.

В то же время пропускные способности каналов передачи данных растут не так быстро. В связи с этим для построения сложных информационных систем критически важно кодировать видео данные как можно компактнее, что позволяет передавать больше данных по тому же самому информационному каналу, увеличивая скорость работы таких систем.

Одним из способов понижения объемов выходного битового потока при кодировании визуальных данных является использование дискретных ортогональных преобразований. Дискретные ортогональные преобразования активно используются во всех современных стандартах сжатия изображений и видео, например, в таких как H.264, H.265, JPEG и многих других. Одним из дискретных ортогональных преобразований, позволяющих достигать значительных степеней сжатия, является дискретное вейвлет-преобразование, которое используется в таких стандартах сжатия, как JPEG2000, видео кодеках Dirac и Schrodinger.

Использование многоканальных схем дискретного вейвлет-преобразования в системах видеокодирования является новым и перспективным подходом, который позволяет увеличить степень сжатия при сохранении качества восстановленных изображений, однако практически во всех существующих исследованиях рассматривается лишь двухканальная схема, уступающая по эффективности кодирования многоканальному аналогу. Таким образом, раз-

работка видеокодирующих систем на базе многоканального вейвлет-преобразования является актуальным направлением исследований.

Степень разработанности темы. Исследование свойств вейвлет-преобразования и особенностей его использования в задачах сжатия изображений является достаточно глубоко изученной темой, однако исследование способов построения видеокодирующих систем на базе многоканального вейвлет-преобразования является открытой задачей. Исследованиям вейвлет-преобразования и смежных проблем в задачах сжатия изображений посвящено значительное количество работ, среди которых стоит отметить российских и зарубежных ученых: I. Daubechies, S. G. Mallat, Y. Meyer, J. Morlet, A. Grossmann, A. Haar, N. Ahmed, С.В. Умняшкина, В.П. Дворковича, А.В. Дворковича, В.И. Воробьёва, В.Г. Грибунина, Ю.А. Романюка, и др. Среди этих работ часть посвящена методам построения банков фильтров многоканального вейвлет-преобразования. Однако, на момент публикации результатов диссертации не было реализовано ни одной видеокодирующей системы на базе многоканального вейвлет-разложения изображений, а значит и не было возможности на практике оценить перспективность предложенного подхода по сравнению с использованием дискретных ортогональных преобразований.

Также необходимо отметить, что видео кодек – сложная система, состоящая из множества блоков, выполняющих разнородные операции, однако их действия должны быть согласованы, а параметры выбираться таким образом, чтобы получить максимальную эффективность для совокупной системы, поэтому разработка системы сжатия должна затрагивать сразу все аспекты. Особый интерес представляет разработка специфичных для вейвлет-коэффициентов операций внутрикадрового предсказания и энтропийного кодирования, так как именно они используются в дополнение к дискретным преобразованиям для понижения энтропии выходных данных.

Хотя внутрикадровое предсказание является в настоящее время распространенной техникой сжатия изображений, применяемой к яркостной и цветоразностной компоненте изображения, которая используется в стандартах сжатия изображений H.264 и H.265, вопросы ее применения к коэффициентам вейвлет-разложения изображений почти не были исследованы. Также еще не было исследований по использованию внутрикадрового предсказания на разных уровнях вейвлет-разложения изображений (на разном уровне преобразований в пирамиде Малла), как и для результатов многоканального вейвлет-разложения изображений. Поэтому актуальным является разработка техники внутрикадрового предсказания в пространстве вейвлет-коэффициентов и исследование особенностей ее применения к разным пространственно-частотным областям вейвлет-разложения изображений.

Другой важной составляющей видеокодирующих систем является энтропийный кодер. В последние годы появился новый и пока еще слабо изученный метод энтропийного кодирования – *асимметричные системы сличения* (ANS), преимуществами которого являются быстрота кодирования и высокие степени сжатия данных. Автором этого метода энтропийного кодирования является польский математик Ярек Дуда. Также ANS кодирование уже используется в ряде систем сжатия для визуальной информации: в компрессоре полигональных сеток и 3D информации Draco (Google), в формате сжатия изображений PIK-compressor (Google), в новом стандарте сжатия изображений JPEG XL (пока в разработке). Тем не менее, данный метод до сих пор не используется непосредственно для видеокодирования, и еще не было исследований по применению ANS для энтропийного кодирования вейвлет-коэффициентов. Также, еще не было исследований по построению контекстных моделей для ANS кодирования коэффициентов пространственно-частотных областей вейвлет разложения изображения. Предполагается, что предложенные подходы позволят повысить степень сжатия изображений при использовании дискретного вейвлет-преобразования. Поэтому исследование способов применения ANS в качестве энтропийного кодера в системах видеокодирования, основанных на вейвлет-разложении изображений, представляется новым и актуальным.

Результаты исследования соответствуют пунктам 2 и 12 паспорта научной специальности 05.12.13 — Системы, сети и устройства телекоммуникаций:

2. Исследование процессов генерации, представления, передачи, хранения и отображения аналоговой, цифровой, видео-, аудио- и мультимедиа информации; разработка рекомендаций по совершенствованию и созданию новых соответствующих алгоритмов и процедур.
12. Разработка методов эффективного использования сетей, систем и устройств телекоммуникаций в различных отраслях народного хозяйства.

Объектом исследования является процесс сжатия цифровой визуальной информации с использованием дискретного вейвлет-преобразования.

Предметом исследования являются:

1. подход к построению систем видеокодирования на основе дискретного многоканального вейвлет-преобразования;
2. методы и алгоритмы компрессии коэффициентов вейвлет-разложения изображений.

Цель работы и задачи исследования. Целью работы является разработка высокоэффективного с точки зрения сжатия данных видео кодека, основанного на многоканальном вейвлет-разложении изображений. Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. разработать программную реализацию многоканального вейвлет-видеокодека;

2. разработать технику внутрикадрового предсказания в пространстве вейвлет-коэффициентов, а также исследовать результаты ее использования в задачах сжатия изображений;
3. разработать алгоритм энтропийного кодирования вейвлет-коэффициентов.

Методы исследования. В диссертации используются методы теории цифровой обработки сигналов, теории информации, теории видеокодирования, методы квадратичной и кубической интерполяции, методы статистического кодирования. Для разработки и отладки программного обеспечения, использовавшегося для получения результатов диссертации, использовались языки программирования C и OpenCL, среды разработки CLion и Visual Studio Code. Для расчета банков фильтров многоканального вейвлет-разложения и их характеристик использовались система компьютерной алгебры Wolfram Mathematica и пакет прикладных программ MATLAB.

Научная новизна заключается в том, что:

1. Разработана новая методика внутрикадрового предсказания в пространстве вейвлет-коэффициентов, основанная на режимах внутрикадрового предсказания H.264. Впервые исследованы свойства внутрикадрового предсказания для разных пространственно-частотных областей вейвлет-разложения изображения.
2. Разработаны новые контекстные модели для коэффициентов пространственно-частотных областей вейвлет-разложения изображения, используемые при энтропийном кодировании.
3. Впервые построен алгоритм энтропийного кодирования коэффициентов вейвлет-разложения изображений на основе асимметричных систем счисления.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная программная реализация многоканального вейвлет видео кодека позволяет достичь до 31% снижения битрейта на уровне качества восстановленного изображения PSNR, равного 40 дБ, по сравнению с использованием кодека h264.
2. Разработанный новый метод внутрикадрового предсказания в пространстве вейвлет-коэффициентов позволил достичь до 6% уменьшения энтропии визуальных данных при качестве восстановленного сигнала в интервале PSNR от 36 до 42 дБ в полу-низкочастотных областях вейвлет-разложения изображений, а при использовании контекстов позволяет достичь до 55% уменьшения энтропии от исходной в низкочастотных областях вейвлет-разложения изображений.
3. Разработанный метод энтропийного кодирования результатов вейвлет-разложения изображений позволяет снизить битрейт до 6%, при среднем качестве восстановленного видео в диапазоне PSNR от 36 до 42 дБ, по сравнению с использованием арифметического кодера.

Теоретическая и практическая ценность. Использование теоретических результатов, полученных в диссертации, позволит построить видеокодирующие системы с большими степенями сжатия визуальных данных.

Результаты работы внедрены и используются на практике, что подтверждено соответствующими актами. В частности, теоретические и практические результаты диссертационной работы, а именно, программная реализация многоканального вейвлет видео кодека, была использована в рамках выполнения НИР по проекту ПНИЭР «Разработка программных и технических средств для эфирных видеоинформационных систем вещания и связи массового и специального применения с использованием ограниченного частотного ресурса» рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы», соглашение о предоставлении субсидии № 14.581.21.0015 от 16 октября 2015 г. между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и МФТИ.

Достоверность результатов исследований подтверждается численным моделированием в среде Matlab и серией экспериментов с помощью программных модулей, написанных в рамках данного исследования, и сравнения их результатов с опорными методами. Во всех экспериментах, кроме связанных с техникой внутрикадрового предсказания в пространстве вейвлет-коэффициентов, в качестве объективной оценки качества сжатия изображений используется метрика «битрейт – PSNR», характеризующая соотношение степени сжатия данных и качества восстановленных изображений. PSNR широко и активно используется в задачах обработки изображений как объективная мера искажений сигнала, в то время как битрейт характеризует объем данных в битах, необходимый для передачи сжатых изображений с заданной частотой кадров. В экспериментах, связанных с разработкой техники внутрикадрового предсказания в пространстве вейвлет-коэффициентов, в качестве объективной оценки качества сжатия используется метрика «энтропия – PSNR», где энтропия характеризует объем данных в битах, минимально необходимый для восстановления без потерь исходной информации.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях и семинарах:

1. 19-ая Международная Конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение» (DSPA-2017): Москва, 29-31 марта 2017 г. - ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН
2. 20-ая Международная научная конференции «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь» (DCCN 2017), Москва, 25-29 сентября 2017 г.

3. IV Международная конференция «Инжиниринг и Телекоммуникации– En&T 2017»: Москва, 29-30 ноября 2017 г.
4. 61-ая Всероссийской научной конференции МФТИ: Долгопрудный, 19–25 ноября 2018 года.
5. 22-ая Международная научная конференции «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь» (DCCN 2019), Москва, 23-27 сентября 2019 г.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 4 рецензируемых научных изданиях, индексируемых в Scopus [1, 2, 3, 4], а также в 7 трудах конференций [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Все работы были опубликованы в соавторстве. Личный вклад соискателя в работах с соавторами заключается в следующем: в работах [5, 6, 7, 1, 2, 9] – разработка многоканального вейвлет видео кодека и методов его оптимизации, исследование свойств многоканального вейвлет-разложения изображений; в работах [11, 4] — разработка метода энтропийного кодирования коэффициентов вейвлет-разложения изображений с помощью асимметричных систем счисления, его программная реализация и проведение экспериментов на видео последовательностях; в работах [3, 8, 10] — разработка метода внутрикадрового предсказания в пространстве вейвлет-коэффициентов, его программная реализация и проведение экспериментов на статических изображениях.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографии и приложения с актами использования результатов диссертационной работы. Общий объем диссертации 146 страниц, включая 105 рисунков и 13 таблиц. Библиография включает 122 наименования.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, ее теоретическая и практическая значимость, сформулированы цель и задачи исследования.

Первая глава посвящена обзору классических подходов к сжатию визуальной информации, большинство из которых используют дискретные ортогональные преобразования. Было рассмотрено дискретное вейвлет-преобразование как альтернатива дискретным ортогональным преобразованиям, его свойства и особенности применения в задачах сжатия изображений. Была рассмотрена многоканальная схема вейвлет-разложения изображений. Были сформулированы цели и задачи исследования, а также методы оценки эффективности решений, предложенных в данной работе.

Современные технологии компрессии изображений и видео включают как методы сжатия информации без потерь, такие как энтропийное кодирование, межкадровое и внутрикадровое предсказание, так и методы сжатия информации с потерями, например совместное использование дискретных преобразований и квантования. Первые методы позволяют однозначно восстановить сжатые данные, но они уступают по степени сжатия вторым, которые, тем не менее, вносят неустранимые при восстановлении потери исходной информации.

Сжатие визуальной информации с потерями основано на несовершенстве человеческого зрения — им в среднем лучше воспринимаются изменения в низких частотах яркостных и цветоразностных составляющих изображения, чем в высоких. При этом большая часть энергии изображения обычно концентрируется в низких частотах, что позволяет более компактно представлять сигнал. Эти особенности восприятия визуальной информации используются для уменьшения выходного потока бит при условно незначительном перцептуальном ухудшении качества восстановленного изображения, что достигается за счет более грубого квантования высокочастотной информации по сравнению с низкочастотной. Для этого необходимо перевести данные из яркостного и цветоразностного пространственного представления изображений в частотное. Именно с этой целью используются дискретные ортогональные преобразования в задачах сжатия изображений.

Как правило, используются блочные версии дискретных ортогональных преобразований: изображение или его составляющие разделяются на пространственные блоки, над каждым из которых по отдельности совершается выбранное преобразование. Среди ортогональных преобразований наибольшей популярностью пользуются дискретные косинусные (ДКП) и псеводокосинусные преобразования. Различные вариации блочных преобразований, чьи базисные функции являются масштабированными под определенный размер блока аппроксимациями базисных функций ДКП, используются во многих стандартах сжатия видео, например в H.264 и H.265, а также в таких стандартах сжатия статических изображений как JPEG. К преимуществам данного типа преобразования можно отнести ортогональность и хорошие декоррелирующие свойства, близкие по эффективности к преобразованию Кархунена-Лоэва, а также возможность целочисленных аппроксимаций, ускоряющих процесс вычисления результатов преобразования. На сегодняшний день есть много программных и аппаратных реализаций “быстрого” ДКП.

С другой стороны, такое использование ДКП ведет к артефактам в виде блочности восстановленного изображения: наблюдаются резкие переходы на границах блоков. С данным эффектом можно частично бороться с помощью деблокинг-фильтров или блочных дискретных преобразований с перекрытием, но это требует дополнительных вычислительных затрат,

что ухудшает производительность кодирующего и декодирующего устройств. Также стоит отметить другой характерный тип помех, связанный с квантованием результатов ДКП — mosquito шум: это проявление неровностей и “дребезга” на резких границах объектов при сильном сжатии изображения. Другим ограничением блочной версии ДКП является фиксированный порядок обработки блоков изображения при гибридном кодировании.

Далее в главе проводится краткий обзор других линейных дискретных ортогональных преобразований, использующихся в задачах сжатия изображений, хотя и имеющих не такое широкое применение как ДКП, среди которых: дискретное преобразование Фурье (ДПФ), дискретное синусное преобразование (ДСП), преобразование Кархунена-Лоэва, преобразование Уолша-Адамара.

Одной из главных альтернатив всем вышеперечисленным подходам выступает использование дискретного вейвлет-преобразования (ДВП). Это дискретное преобразование, в качестве базисных функций которого выступают вейвлеты — семейство математических функций определенной формы, локальных как во временной, так и в частотной областях. Оно обладает рядом достоинств:

- Преобразование сохраняет локальные особенности исходного изображения и обладает хорошим пространственным разрешением.
- ДВП позволяет не вносить эффект блочности за счет применения ко всему изображению сразу и при этом сохранить хорошее пространственное разрешение. Также применение ДВП ко всему изображению позволяет избежать ограничений на порядок обработки отдельных блоков, что упрощает процедуру распараллеливания вычислений преобразования.
- ДВП предоставляет гибкость в выборе уровня детализации на заданных частотах: можно получить хорошие разрешения по частоте на низких частотах, а на высоких — по времени. Это особенно актуально, так как информация в изображениях распределена неравномерно по частотам: большая часть энергии сконцентрирована в области низких частот, которые содержат сглаженную аппроксимацию исходного изображения, в то время как высокие частоты содержат мелкие детали. При этом на выходе каскадного вейвлет-разложения изображения (см. рис. 1) такое же число коэффициентов, как и при простом однократном, за счет децимации необязательных для восстановления коэффициентов, что важно с точки зрения сжатия информации.
- Нивелирование вычислительной сложности подсчета ДВП всего изображения за счет удобства преобразования для распараллеливания, особенно на GPU, вычислительная мощность которых резко выросла в последние годы.

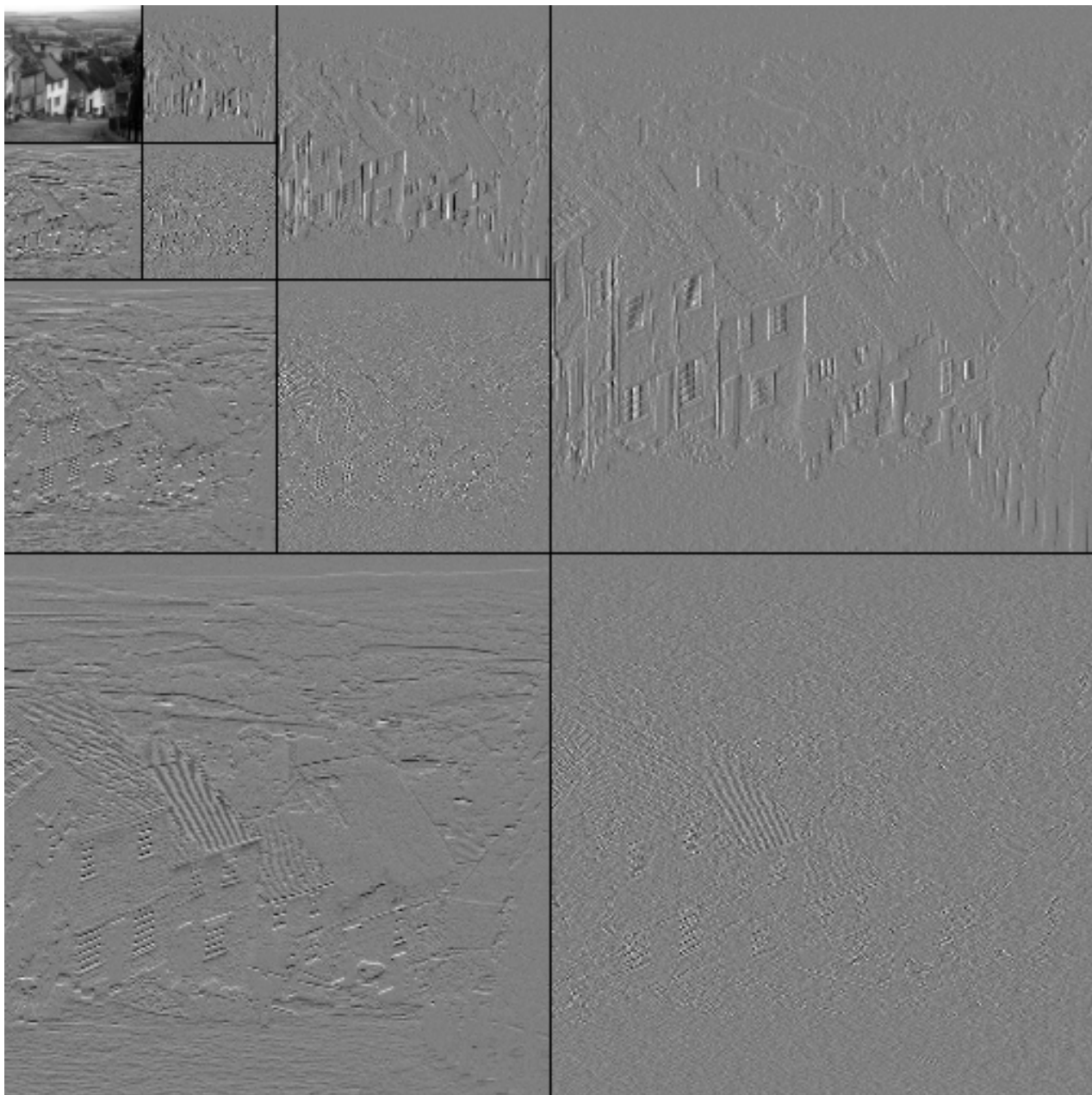


Рисунок 1. Пример многоуровневой (три уровня на рисунке) вейвлет-декомпозиции изображения двухканальным фильтром. Вейвлет-преобразование выполняется по ширине и высоте; операция преобразования итеративно повторяется над самой низкочастотной частью на каждом уровне. Низкочастотная составляющая — уменьшенная по размерам аппроксимация исходного изображения.

Далее рассматриваются классические двухканальные схемы вейвлет-преобразования и особенности их применения в обработке изображений.

В ДВП в качестве базисных функций используются вейвлеты $\psi_{n,l}(t)$. Все вейвлеты из $\{\psi_{n,l}(t)\}$ получаются из **материнского вейвлета** $\psi(t)$, за счет его растяжения/сжатия по параметру масштабирования n и сдвигов по параметру l :

$$\psi_{n,l}(t) = \frac{1}{2^{n/2}} \psi\left(\frac{t - 2^n l}{2^n}\right) \quad (1)$$

Увеличение параметра n ведет к растяжению вейвлета во временной области и сжатию его в частотной и наоборот, а изменение параметра l ведет к его сдвигу во времени. Вейвлеты в частотной области ведут себя аналогично полосовым фильтрам:

$$|\Psi(\omega)|_{\omega=0} = 0 \quad (2)$$

что эквивалентно

$$\int \psi(t) dt = 0 \quad (3)$$

В ДВП также используется **скейлинг-функция** $\phi_{n,l}(t)$, которая служит дополнением к заданной **вейвлет-функции** $\psi_{n,l}(t)$ — она выступает аналогом фильтра, пропускающего всю оставшуюся часть спектра в области нижних частот. Таким образом, весь спектр сигнала может быть проанализирован с помощью конечного числа **вейвлет-функций** и дополняющей их **скейлинг-функции**, а набор базисных функций будет состоять из $\{\phi_{n,l}(t)\}$ и $\{\psi_{n,l}(t)\}$, а **дискретное вейвлет-преобразование** (ДВП) на заданном уровне разложения $n = N$ может быть выражено следующим образом:

$$f(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} c_l \phi_{N,l}(t) + \sum_{n=1}^N \sum_{l=-\infty}^{\infty} d_{n,l} \psi_{n,l}(t) \quad (4)$$

где скейлинг-коэффициенты $\{c_l\}$ содержат аппроксимирующую информацию о сигнале на уровне масштаба N , а вейвлет-коэффициенты $\{d_{n,l}\}$ — детализирующую информацию данного уровня n .

Рассматривается метод построения ортонормального базиса вейвлетов, получившего название **кратномасштабного анализа**. Его суть заключается в представлении пространства $L^2(R)$ через последовательность вложенных подпространств V_n , объединение которых в пределе дает $L^2(R)$ (см. рис. 2).

Такой подход кратномасштабного анализа позволяет представить вейвлет-преобразование сигнала как передачу его отсчетов на вход банка полосовых фильтров, построенных на скейлинг и вейвлет функциях, где $\{h_n\}$ и $\{g_n\}$ — импульсные характеристики этих фильтров. Сигнал последовательно делится на две части — низкочастотную и высокочастотную,

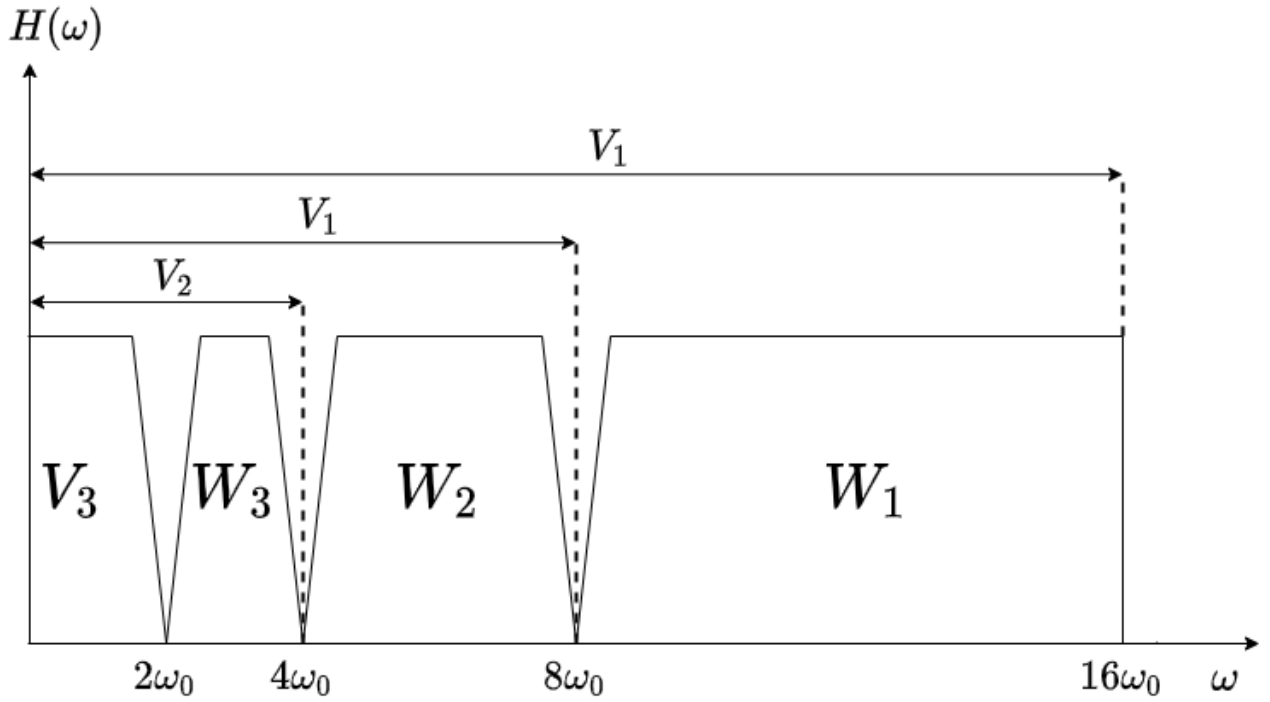


Рисунок 2. Представление вейвлет-разложения сигнала в спектральной области через разделение областей спектра подпространствами V_n и W_n на заданном уровне масштаба n . V_n покрывается скейлинг-функцией заданного уровня преобразования n , а W_n – вейвлет-функцией.

после чего процедура повторяется над низкочастотной частью и т.д. до требуемого уровня разрешения по частоте. Описанный метод реализации ДВП получил название *субполосного кодирования* (см. рис. 3). Подобный подход предоставляет гибкость в выборе уровня детализации на заданных частотах, при приемлемой вычислительной сложности.

После этого рассматриваются многоканальные схемы вейвлет-разложения изображений. В отличие от классических двухканальных схем вейвлет-разложения изображений, в рассматриваемых схемах возможно использование произвольного числа фильтров в банке (но больше одного). Такие схемы требуют. Ряд новых исследований показывает, что при правильном подборе банка фильтров возможно достигать на 50% меньшего битрейта, чем при использовании классических двухканальных схем. Пример вейвлет-разложения изображения с помощью многоканальной схемы представлен на рисунках 4 и 5.

Далее в первой главе формулируются цели и задачи исследования, а также методы оценки эффективности решений, предложенных в данной работе. В качестве главной метрики объективной оценки качества сжатия используется "битрейт – PSNR". Также, в ряде пунктов исследования, где это обоснованно, дополнительно оценивается производительность

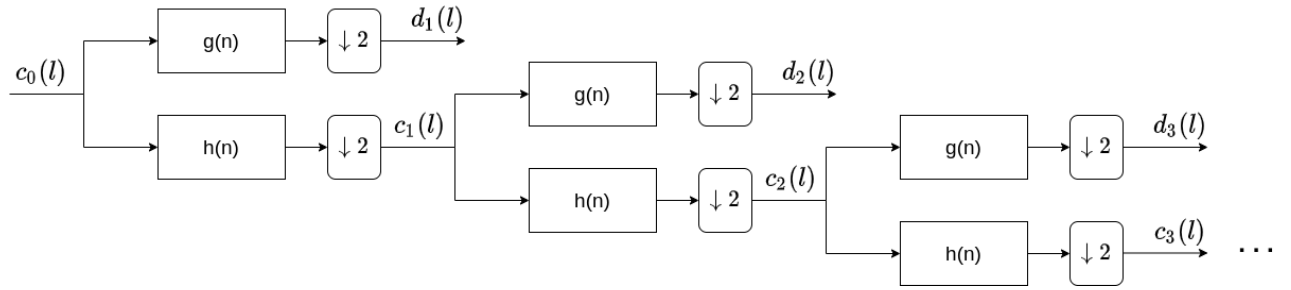


Рисунок 3. Схема вейвлет-декомпозиции сигнала на банках КИХ-фильтров. $\{h(n)\}$ — коэффициенты импульсной характеристики фильтра нижних частот (коэффициенты скейлинг-функции); $\{g(n)\}$ — коэффициенты импульсной характеристики фильтра высоких частот (коэффициенты вейвлет-функции); $c_k(l)$ и $d_k(l)$ — коэффициенты декомпозиции сигнала на заданном уровне масштабирования k и параметре сдвига l . На выходе каждого фильтра анализа сигнал децимируется в 2 раза.

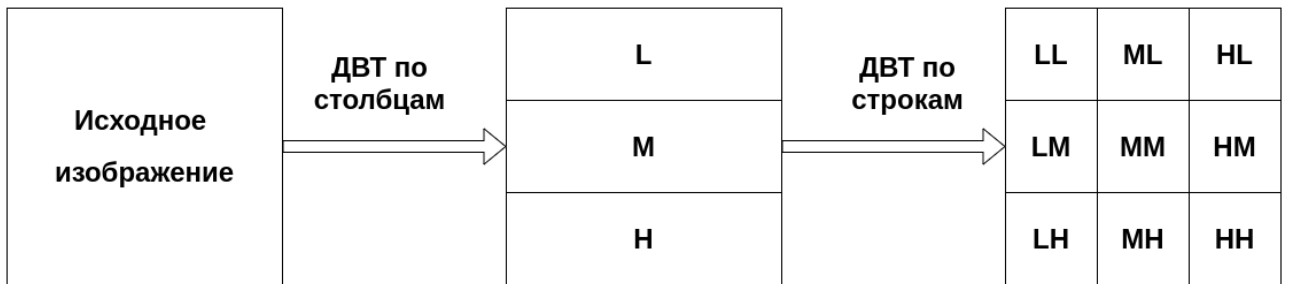


Рисунок 4. Схема трехканального вейвлет-разложения изображения на пространственно-частотные области. Обозначения L соответствует низким частотам по соответствующей оси, M — верхним, а H — верхним.

видеокодирующей системы, оцениваемая в средней скорости кодирования одного кадра для определенной видеопоследовательности.

Во второй главе рассмотрена разработанная в рамках данного исследования реализация многоканального вейвлет видео кодека. Разработка такого видео кодека позволит тестировать эффективность сжатия видео разными банками фильтров ДВП, проверять на практике применимость различных техник видеокодирования, основанных на работе с результатом многоканального вейвлет-преобразования, а также оценить перспективность использования многоканального ДВП в видеокодировании. Что бы не разрабатывать видео кодек с нуля, в качестве основы был выбран видео кодек **Schrodinger**, и в него был интегрирован модуль многоканального вейвлет-преобразования, разработанный в рамках данного исследования. Схема кодера приведена на рисунке 6.

Для оценки эффективности сжатия данных разработанным многоканальным вейвлет видео кодеком было проведено сравнение результатов его работы с **x264** и **x265** на тестовых

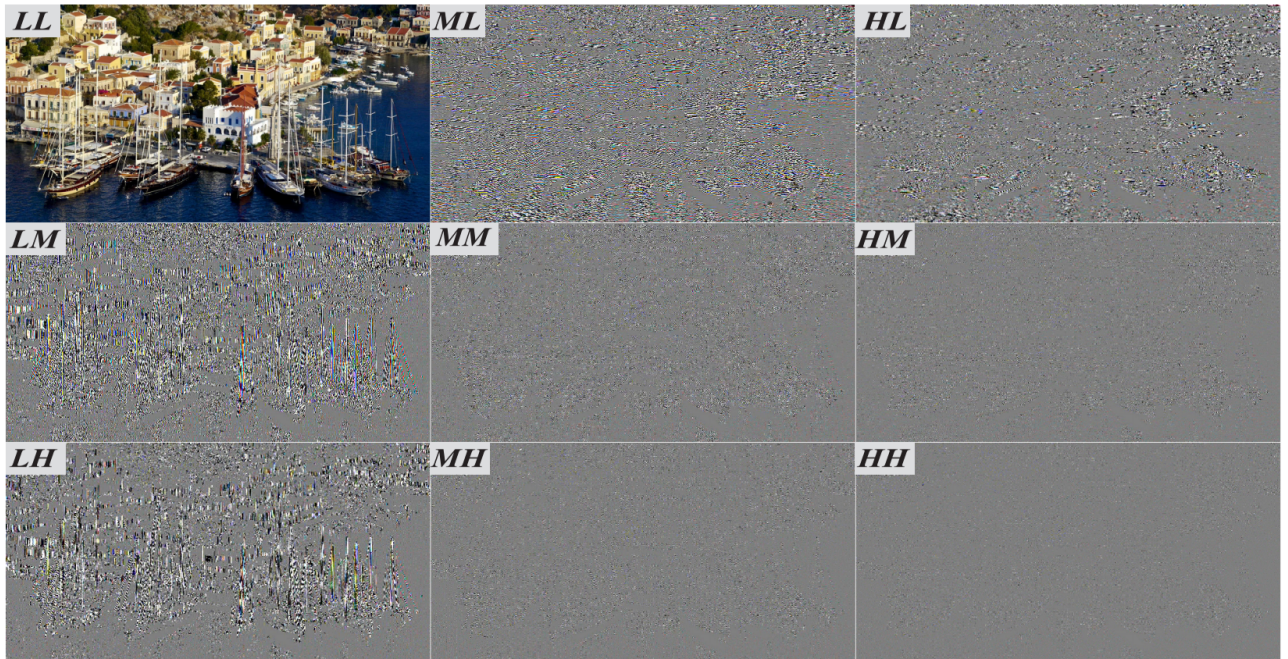


Рисунок 5. Пример многоканального вейвлет-разложения изображения по схеме из рис. 4

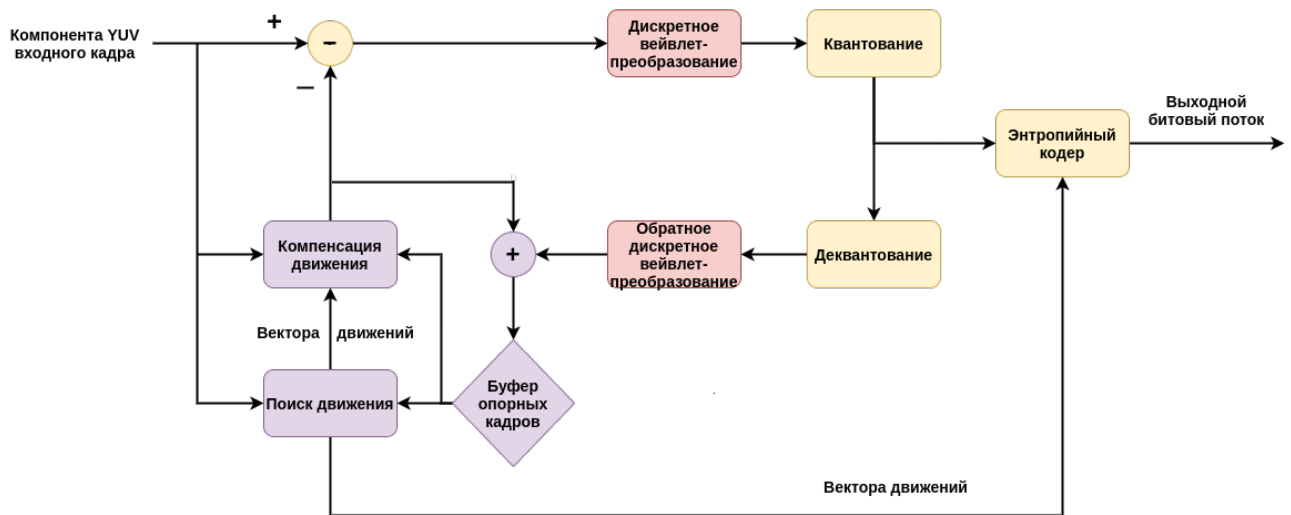


Рисунок 6. Схема кодирующей части (кодера) видео кодека *Schrodinger*. Обозначения: *прямоугольники* — функциональные блоки кодера, *ромб* — специальные буферы данных, *круг* — операция сложения или вычитания данных; *желтые* — обязательная часть исходного кодера, *фиолетовые* — опциональная часть исходного кодера, *красные* — часть кодера, подвергшаяся замене на многоканальное ДВП.

видеопоследовательностях по метрике "битрейт - PSNR". x264 и x265 были выбраны как одни из лучших по сжатию к началу работы над исследованием видео кодеков. Для многоканального ДВП были выбраны трехканальный банк фильтров 23/23/23 – 13/13/13

(см. рис. 7 и табл. 1 и 2) и пятиканальный банк фильтров $5/5/5/5/5 - 5/5/5/5/5$. На графике 8 представлены результаты данной части исследования.

Таблица 1. Банк фильтров анализа $23/23/23$ трехканального вейвлет-преобразования.

$$h_n = h_{-n}; b_n = -b_{-n}; g_n = g_{-n}.$$

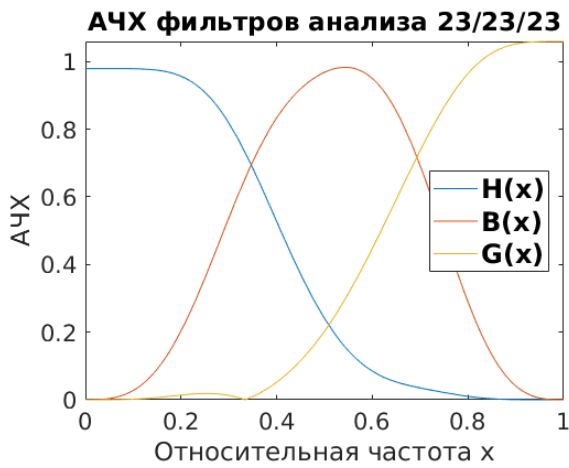
n	h_n	b_n	g_n
0	0.717215	0	0.685303
1	0.482119	-0.687905	-0.499947
2	0.100785	0.052845	0.146139
3	-0.0572617	0.192827	0.0322635
4	-0.0434293	-0.0239495	-0.0249847
5	-0.00257065	0.0337432	0.00924183
6	0.00762182	-0.00319313	-0.00460337
7	0.0016123	-0.00829397	-0.000219346
8	0.00091449	0.000815896	-0.000671062
9	0.000107057	-0.0000712195	-0.0000620485
10	-0.000411828	0.000273966	0.000238688
11	0.0000812236	-0.0000540336	-0.0000470757

Таблица 2. Банк фильтров синтеза $13/13/13$ трехканального вейвлет-преобразования.

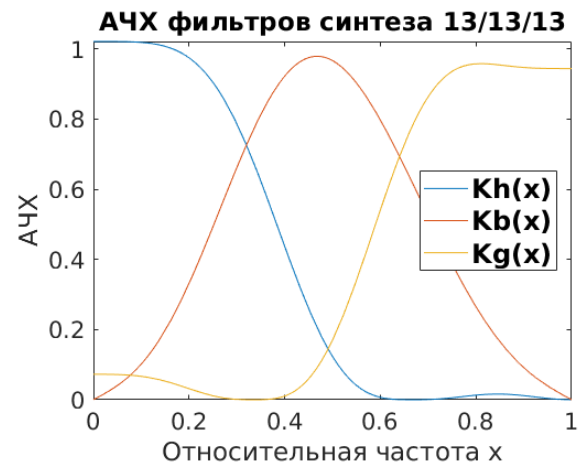
$$kh_n = kh_{-n}; kb_n = -kb_{-n}; kg_n = kg_{-n}.$$

n	kh_n	kb_n	kg_n
0	0.663679	0	0.662462
1	0.499683	0.688063	-0.509985
2	0.155318	0.0473184	0.0954987
3	-0.0494516	-0.153701	0.0783513
4	-0.0573942	-0.0260899	-0.069081
5	-0.00810589	-0.00475089	-0.00853267
6	0.0123629	0.00151849	0.0195878

В конце главы подводятся итоги данной части исследования: разработанная программная реализация многоканального вейвлет видео кодека позволяет достичь до 31% снижения битрейта при сохранении уровня качества восстановленного видео (PSNR 40 дБ) по сравнению с x264, при этом немного уступая x265. Наилучшие результаты многоканального ДВП



(а) АЧХ фильтров анализа 23/23/23



(б) АЧХ фильтров синтеза 13/13/13

Рисунок 7. АЧХ прямых и обратных фильтров трехканального вейвлет-преобразования, используемые в работе

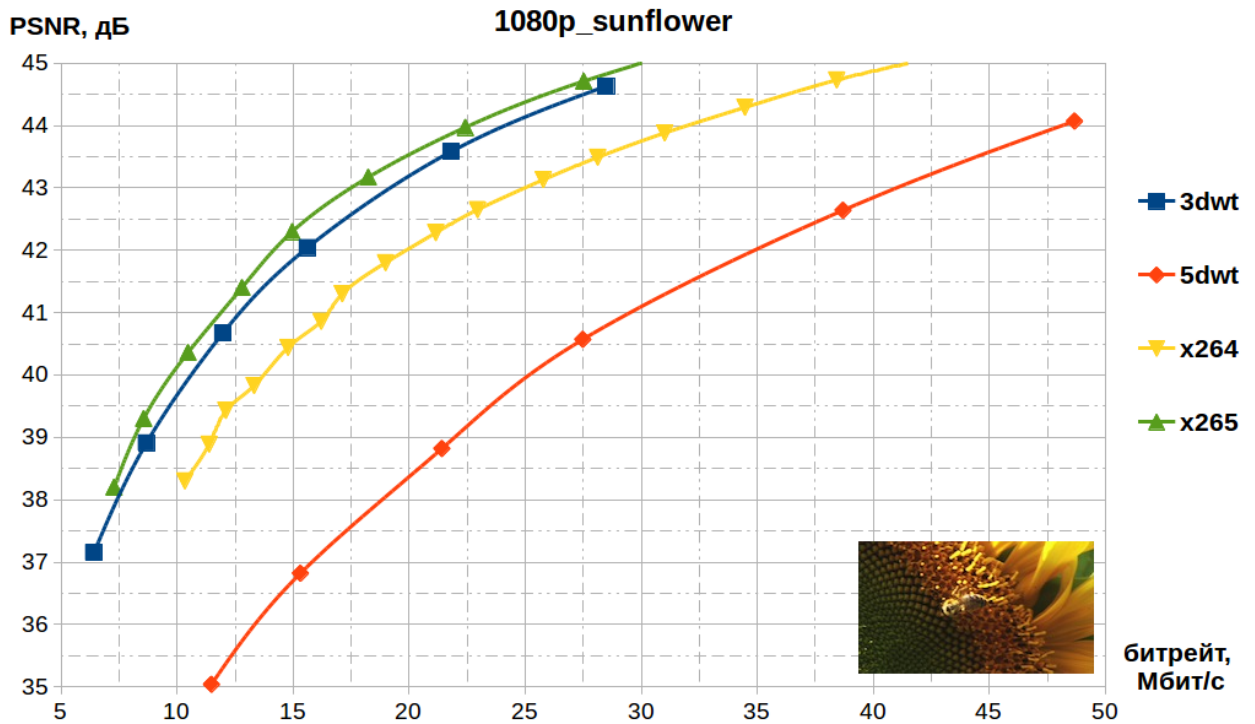


Рисунок 8. Сравнение показателей "битрейт - PSNR" видео кодеков x264/x265 и предложенного вейвлет-кодека для видео sunflower. 3dwt — на базе трехканального вейвлет-преобразования, 5dwt — на базе пятиканального.

были получены при использовании трехканального банка фильтров 23/23/23 – 13/13/13. Делается заключение о перспективности использования многоканального ДВП в видеокодировании и необходимости разработки техник внутрикадрового предсказания и энтропийного кодирования, адаптированных для работы с вейвлет-коэффициентами, для повышения степеней сжатия данных предложенной видеокодирующей системы.

Третья глава посвящена разработке метода внутрикадрового предсказания в пространстве вейвлет-коэффициентов. В рамках этой главы рассматривается метод внутрикадрового предсказания, используемый в стандартах сжатия H.264/H.265, – это техника сжатия данных без потерь, использующая статистическую избыточность изображений, выражаемую в том факте, что значение яркости и цветности соседних пикселей изображения, как правило, сильно коррелированы между собой (однородные участки изображения, определенные геометрические структуры).

Внутрикадровое предсказание сопоставляет каждому значению $s(i; j)$ его предсказываемую величину $\hat{s}(i; j)$, определяемую через некоторые пространственно близлежащие опорные данные по некоторой схеме предсказания. На практике кадр делится на блоки, для которых используются общие опорные значения, занимающие строку сверху и/или столбец слева от текущего блока. На вход энтропийного кодера передается массив ошибок предсказания $e(i; j)$. Если схема предсказания хорошо аппроксимирует распределение коэффициентов текущего блока в зависимости от их положения i, j и значений коэффициентов в соседних блоках, то энтропия ошибок предсказания будет значительно меньше энтропии исходных коэффициентов блока, что позволяет достигать значительных степеней сжатия данных. Процессы прямого и обратного предсказания описываются следующим образом:

$$\begin{cases} e(i; j) = s(i; j) - \hat{s}(i; j) \\ s(i; j) = e(i; j) + \hat{s}(i; j) \end{cases} \quad (5)$$

Далее в главе рассматриваются методы адаптации этой техники для работы с вейвлет-коэффициентами. Так как вейвлет-коэффициенты содержат не только частотные локальные особенности, но и пространственные, то это позволяет предполагать хорошую аппроксимацию распределений вейвлет-коэффициентов с помощью схем внутрикадрового предсказания, используемых в стандартах H.264 и H.265. Вейвлет-коэффициенты имеют особый характер корреляции: в зонах, являющихся низкочастотными по одному из направлений (будем называть их *полу-низкочастотными*), вблизи особенностей исходного изображения наблюдаются линии, имеющие вертикальную или горизонтальную ориентацию, в зависимости от конкретной частотной зоны, — это полосы величин одинакового знака, близких по модулю. Это наводит на предположение о том, что предсказание соответствующей ориентации будет эффективно работать и в применении к полу-низкочастотным областям. Полностью низкочастотная зона подобна исходному изображению, что позволяет предполагать эффективность работы внутрикадрового предсказания в ней.

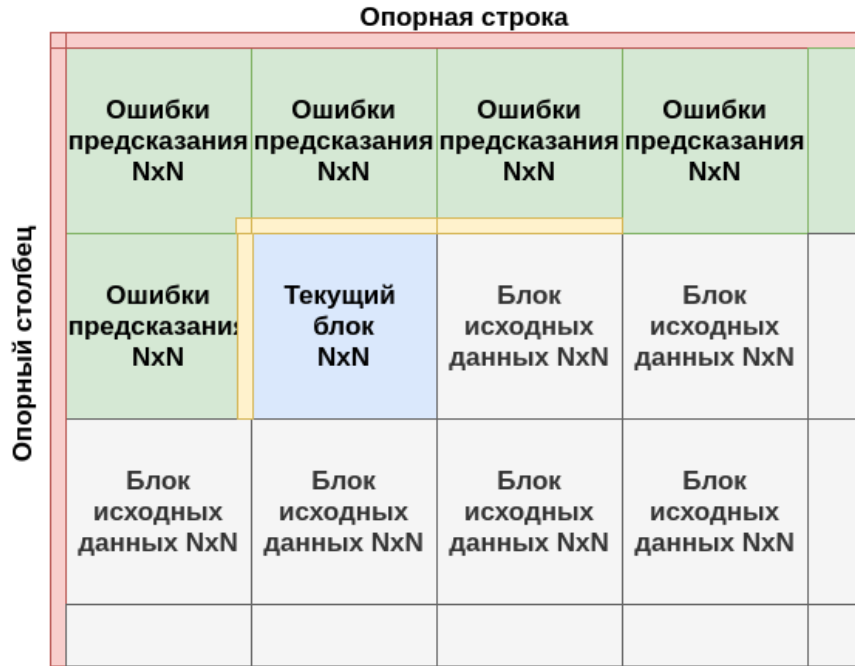


Рисунок 10. Схема разбиения пространственно-частотной области вейвлет-разложения в предложенном алгоритме внутрикадрового предсказания. *Красным* отмечены опорная строка и столбец, использующиеся как опорные значения для предсказания в крайних верхних и левых блоках; *синим* — тот блок, для которого внутрикадровое предсказание выполняется в данный момент; *зеленым* — подвергнутые предсказанию блоки, содержащие в данный момент ошибки предсказания; *желтым* — возможные опорные значения для предсказания текущего блока; *серым* — еще не подвергнутые предсказанию блоки данных. Размер блока N принимает значения 4, 8, 16, 32.

зания к конкретному блоку определялась заданной метрикой искажений. Если применение предсказания обычного типа (все, кроме адаптивного) повышало значение метрики, текущий блок пропускался без предсказания. В случае адаптивного режима последовательно выполняются все режимы предсказания (в том числе с пропуском предсказания) и выбирается тот, который минимизирует метрику искажений. В качестве метрики искажений использовалось SAD (Sum of absolute differences — сумма модулей разностей):

$$SAD = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} |s(i, j) - \hat{s}(i, j)| \quad (6)$$

где $\hat{s}(i, j)$ — предсказанное значение коэффициента $s(i, j)$, а N — размер блока предсказания.

В рамках данного раздела дополнительно проверялось влияние контекстов на предложенную технику внутрикадрового предсказания в пространстве вейвлет-коэффициентов. Контекстное кодирование — техника энтропийного кодирования, основанная на учёте условных вероятностей появления коэффициентов. Так как частотные полосы вейвлет-разложе-

ния изображений обладают специфичным характером корреляции между соседними коэффициентами, то эти статистические свойства можно использовать для построения контекстов вейвлет-коэффициентов. В данном эксперименте в качестве контекста использовались диапазоны значений соседних коэффициентов (см. рис. 11). Также необходимо заметить, что при подсчете энтропии не учитывались данные, необходимые для представления контекстов.

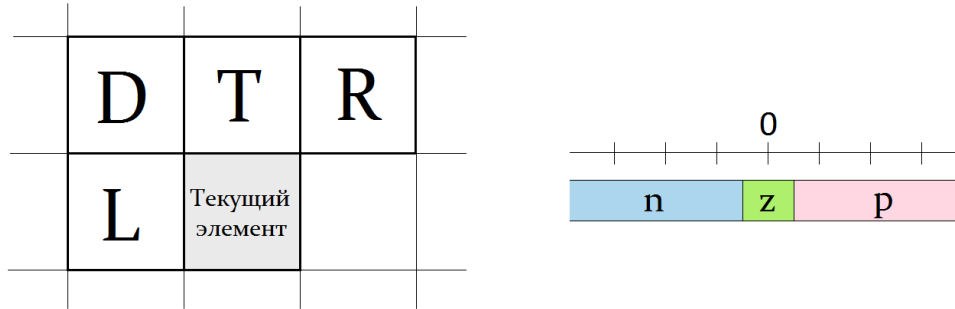


Рисунок 11. Контекстная модель, используемая в главе 3: четыре соседних коэффициента (слева L , слева сверху D , сверху T и справа сверху R) и диапазон их значений: отрицательное n , нулевое z или положительное p значение.

В рамках данного пункта исследования эффективность сжатия предложенной схемы внутрикадрового предсказания в пространстве вейвлет-коэффициентов проверялась на наборе тестовых изображений. Для многоканального ДВП использовался трехканальный банк фильтров $23/23/23 - 13/13/13$ (см. рис. 7 и табл. 1 и 2). В качестве оценки эффективности сжатия предложенного подхода использовалась метрика "энтропия – PSNR". Каждая пространственно-частотная область вейвлет-разложения изображения тестировалась и квантовалась независимо от остальных областей вейвлет-разложения.

Общие результаты приведены в таблице 3. Надо отметить, что выигрыш лучшего режима внутрикадрового предсказания после учета контекстов рассчитывался относительно энтропии исходных данных после учета контекстов. Внутрикадровое предсказание без использования контекстов позволило достичь до 6% уменьшения энтропии при качестве восстановленного сигнала в интервале PSNR от 36 до 42 дБ в полу-низкочастотных областях (LH) вейвлет-разложения изображений. При использовании же учета контекстов применение предложенной техники внутрикадрового предсказания в полу-низкочастотных областях (LH) вейвлет-разложения изображений – нецелесообразно из-за относительно небольшого выигрыша в энтропии. Также при совместном использовании внутрикадрового предсказания и предложенной модели контекстов (см. рис. 11) удалось получить выигрыш до 55% от исходной энтропии в низкочастотной области (LL) вейвлет-разложения изображения. Тем

не менее, необходимо заметить, что выполнение дополнительного вейвлет-разложения самой низкочастотной области позволяет получить близкие результаты по сжатию (см. рис. 12).

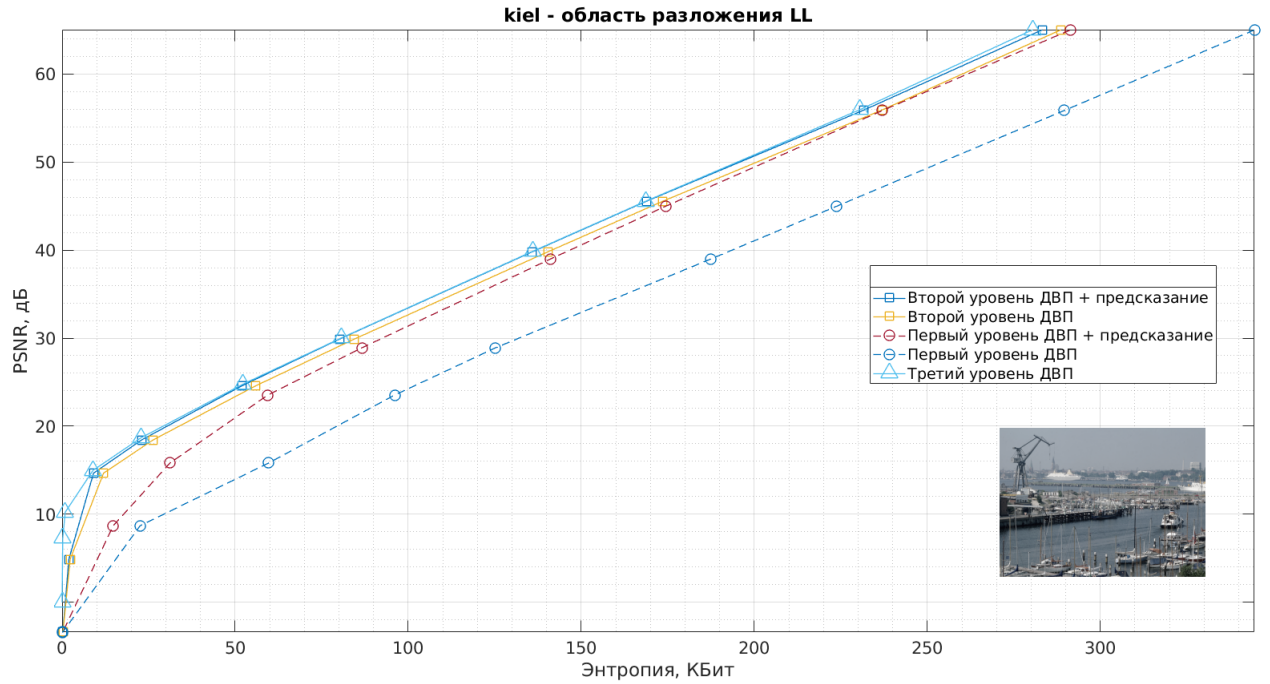


Рисунок 12. Зависимость энтропия-PSNR при применении внутрикадрового предсказания к разным уровням пространственно-частотной области LL вейвлет-разложения изображения *kiel* без использования контекстов. Если используется внутрикадровое предсказание, то размер блока 4x4, а режим адаптивный (*mode 10*).

Таблица 3. Расчет выигрыша в энтропии в зависимости от наличия/отсутствия внутрикадрового предсказания и/или учета контекстов.

Название видео	Область вейвлет-разложения изображения	PSNR, дБ	Выигрыш лучшего режима внутрикадрового предсказания, %	Выигрыш от учета контекстов, %	Выигрыш лучшего режима внутрикадрового предсказания после учета контекстов, %
kiel	LL	38.96	24.69%	0.18%	35.84%
bitmap	LL	38.87	49.74%	0.08%	55.45%
stockholm	LL	38.97	33.98%	1.72%	32.70%
kiel	LH	37.6	3.02%	26.35%	1.82%
bitmap	LH	39.47	5.93%	28.49%	0.62%
stockholm	LH	39.27	0.28%	8.94%	0.79%
kiel	HH	40.93	0.00%	14.75%	3.30%
bitmap	HH	50.24	9.46%	32.43%	-10.00%
stockholm	HH	40.87	0.00%	9.54%	-0.30%

В четвертой главе рассматривается разработанный в рамках данного исследования алгоритм энтропийного кодирования вейвлет-коэффициентов с помощью асимметричных систем счисления (ANS).

Энтропийное кодирование — процесс сжатия данных без потерь, использующий статистическую избыточность входных данных. В основе этого подхода лежит учет вероятностей появления символов некоторого алфавита во входной последовательности данных и присвоение наиболее часто встречающимся символам более коротких кодов. Предел Шеннона определяет минимально необходимое количество бит на символ для представления входного алфавита, состоящего из n символов a_i с вероятностями p_i ($1 \leq i \leq n$):

$$H(a) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \quad (7)$$

Чем ближе алгоритм энтропийного кодирования способен приблизиться к пределу Шеннона для конкретного распределения входных данных, тем меньше избыточность такого представления данных и, следовательно, тем эффективнее этот алгоритм с точки зрения сжатия этих данных.

Наиболее распространенные методы энтропийного кодирования в современных системах сжатия изображений и видео — коды Хаффмана и арифметическое кодирование. К достоинствам кодов Хаффмана можно отнести простоту реализации и быстроту вычислений. С другой стороны, коды Хаффмана кодируют каждый символ целым числом бит, что в общем случае неоптимально с точки зрения сжатия и не позволяет приблизиться к пределу Шеннона. Арифметическое кодирование в свою очередь хорошо аппроксимирует распределения вероятностей входных данных, используя коды переменной длины для входной последовательности символов, и превосходит коды Хаффмана с точки зрения сжатия данных. С другой стороны, недостатком данного алгоритма является его вычислительная сложность.

В 2009 году Яреком Дудой был разработан новый метод энтропийного кодирования — **ANS (Asymmetric Numeral System)**, основанный на *асимметричных системах счисления*. ANS позволяет приблизиться к пределу Шеннона, как и арифметический кодер, а по скорости работы он сопоставим с кодером Хаффмана, как заявлено в работах. Таким образом, ANS вбирает в себя преимущества одновременно и арифметического кодера, и кодера Хаффмана. Данный метод до сих пор не используется непосредственно для видеокодирования, в том числе для сжатия видео с помощью вейвлетразложения изображений. Использование ANS в качестве энтропийного кодера в системах видеокодирования, основанных на

вейвлет-разложении изображений, представляется новым и перспективным с точки зрения сжатия данных подходом.

Далее рассматриваются принципы кодирования методом асимметричных систем счисления. В ANS состояние кодирующей системы в каждый момент времени описывается целочисленной величиной x , для представления которой необходимо $\log_2(x)$ бит. При добавлении во входную последовательность символа s состояние системы изменяется на x' , которое зависит от предыдущего состояния системы x и поступившего на вход символа s и вычисляется по функции кодирования $C(x, s)$, т.е.

$$x' = C(x, s) \quad (8)$$

При этом для представления нового состояния x' необходимо минимум на $\log_2(1/p_s)$ больше бит, где p_s — вероятность появления символа s . Ярек Дуда предлагает *асимметричные системы*, где функция кодирования $C(x, s) \approx x/p_s$ учитывает вероятность появления символа s и вычисляет следующее состояние системы в зависимости от распределения вероятностей символов входной последовательности. С добавлением нового символа кодирующая система увеличивает свое состояние x . При достижении некоторого максимально возможного состояния младшие биты состояния передаются в выходной поток, возвращая состояние системы в допустимый диапазон значений. Асимметричная система кодирует несколько входных символов некоторым количеством выходных бит, т.е. производит коды переменной длины, что позволяет лучше аппроксимировать реальные распределения вероятностей символов входной последовательности, чем симметричные системы, которые кодируют целым числом бит каждый входной символ. Особый интерес представляет табличный вариант ANS (tANS), который хорошо подходит для работы с большими многосимвольными алфавитами, сохраняя все поведение кодирующей системы в относительно малые по размеру таблицы переходов, что позволяет получить более быстрый процесс кодирования, чем коды Хаффмана, при этом сохраняя сжатие арифметического кодера.

Далее в данной главе рассматривается реализация алгоритма ANS кодирования коэффициентов вейвлет-разложения изображений. Для осуществления вейвлет-видеокодирования была выбрана реализация многоканального вейвлет-видеокодека и трехканальный банк фильтров 23/23/23 - 13/13/13 (см. рис. 7 и табл. 1 и 2). Для энтропийного кодирования использовался табличный вариант ANS (tANS), за основу которого была взята реализация Эндрю Полара (Andrew Polar). Этот подход был модифицирован для кодирования вейвлет-коэффициентов и был встроен в программную реализацию многоканального вейвлет видео

кодека. Также для повышения эффективности ANS кодирования вейвлет-коэффициентов в рамках данной работы были предложены две модификации алгоритма кодирования — разделение вейвлет-коэффициентов на знаковые экспоненты и мантиссы, а также использование контекстов в процессе кодирования.

В рассмотренном методе ANS используется коэффициент, отвечающий за точность аппроксимации вероятностей символов и за размер таблицы переходов, так называемый *precision*. Его увеличение ведет как к повышению степени сжатия данных, так и к увеличению времени построения таблиц ANS и процесса кодирования. В данном исследовании результаты ANS кодирования были получены для трех значениях этого коэффициента (10, 12, 15), что должно позволить оценить как сильно изменяются степени сжатия данных и время, затрачиваемое на кодирование, при изменении размера таблиц в tANS.

Хотя ANS является многосимвольным кодером, большое количество символов снижает его эффективность. В рамках данного исследования значения вейвлет-коэффициентов как правило находились в достаточно широком диапазоне. Чтобы сократить этот диапазон, вейвлет-коэффициенты перед процессом кодирования раскладываются на знаковые экспоненты exp_2 (знак коэффициента вместе с длиной битовой записи коэффициента плюс старший бит мантиссы первого порядка) и мантиссы $mant_2$ (все биты бинарного представления коэффициента кроме старшей единицы и следующего за ней бита).

В рамках данного пункта исследования были разработаны и использованы отдельные наборы контекстов, подходящие для работы с коэффициентами вейвлет-разложения изображений. В качестве контекста выступают диапазоны значений (см. рис. 13, б) соседних для кодируемого вейвлет-коэффициентов (см. рис. 13, а). При выборе набора контекстов для энтропийного кодирования необходимо находить компромисс между размерами таблиц частот всех контекстов и размером сжатого потока данных, т.е. подбирать тот, который минимизирует полный размер выходных данных.

В рамках данного пункта исследования ANS кодирование вейвлет-коэффициентов с использованием контекстов осуществляется следующим образом:

1. изображение раскладывается на пространственно-частотные области с помощью дискретного вейвлет-преобразования, после чего работа с каждой областью осуществляется отдельно;
2. все коэффициенты пространственно-частотной области вейвлет-разложения изображения разделяются на знаковые экспоненты и мантиссы;

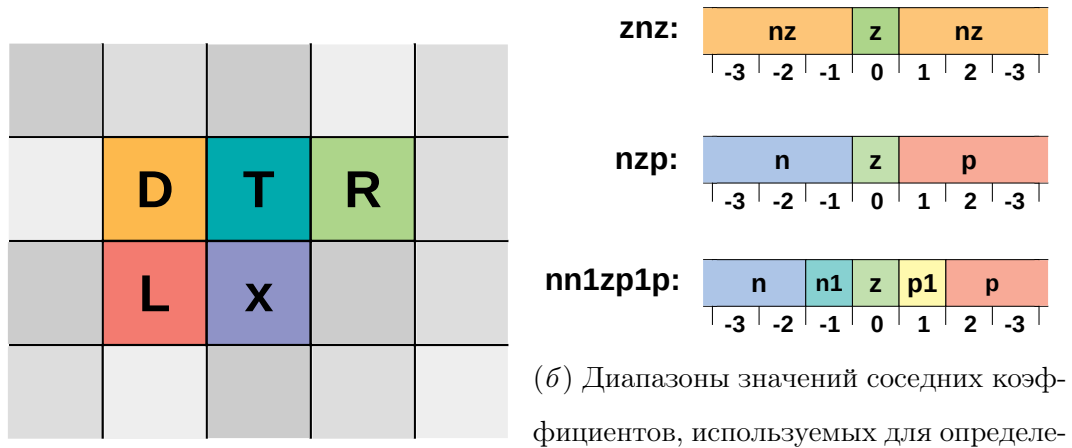


Рисунок 13. Схема формирования используемых в главе 4 контекстов

3. строятся таблицы частот для каждого контекста (таблицы условных вероятностей появления символов): каждой знаковой экспоненте вейвлет-коэффициента сопоставляется свой контекст, и значение экспоненты учитывается в таблице частот этого контекста;
4. в выходной поток друг за другом записываются таблицы частот для каждого контекста, необходимые для декодирования сжатого потока;
5. знаковые экспоненты для каждого отдельного контекста кодируются отдельно с помощью ANS кодера и записываются в выходной поток друг за другом после таблиц частот;
6. в самый конец выходного потока записываются мантиссы вейвлет-коэффициентов данной пространственно-частотной области вейвлет-разложения.

Общая структура выходного потока для каждой отдельной области вейвлет-разложения изображения и алгоритм кодирования представлены на рисунках 14 и 15. В предложенном в данной главе подходе сначала строятся таблицы условных вероятностей для всего блока данных (для пространственно-частотной области вейвлет-разложения изображения) и только потом осуществляется энтропийное кодирование, т.е. алгоритм энтропийного кодирования является неадаптивным.

Результаты сжатия данных, полученные для предложенного в работе метода ANS кодирования вейвлет-коэффициентов на наборе тестовых видеопоследовательностей, сравниваются с результатами адаптивного бинарного арифметического кодера, использованного в видео кодеке Schrodinger, по метрике "битрейт – PSNR". Лучшие результаты сжатия вейвлет-коэффициентов ANS кодером были получены с параметром точности построения таблиц, равным

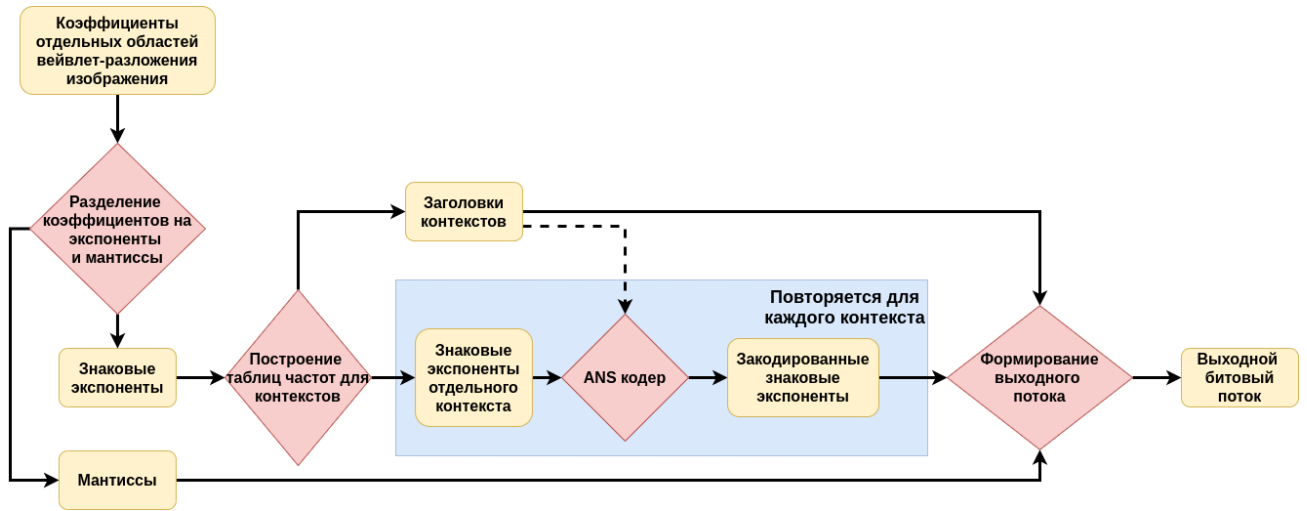


Рисунок 14. Блок-схема предложенного алгоритма ANS кодирования вейвлет-коэффициентов с помощью контекстов. Прямоугольниками обозначаются данные, над которыми совершаются операции; ромбом обозначаются модули алгоритма, осуществляющие операции над данными; пунктирная стрелка — данные не изменяются в ходе операции, но используются; жирная стрелка — данные изменяются в ходе операции и служат входом или выходом модуля. Эта схема соответствует энтропийному кодеру на рис. 6.

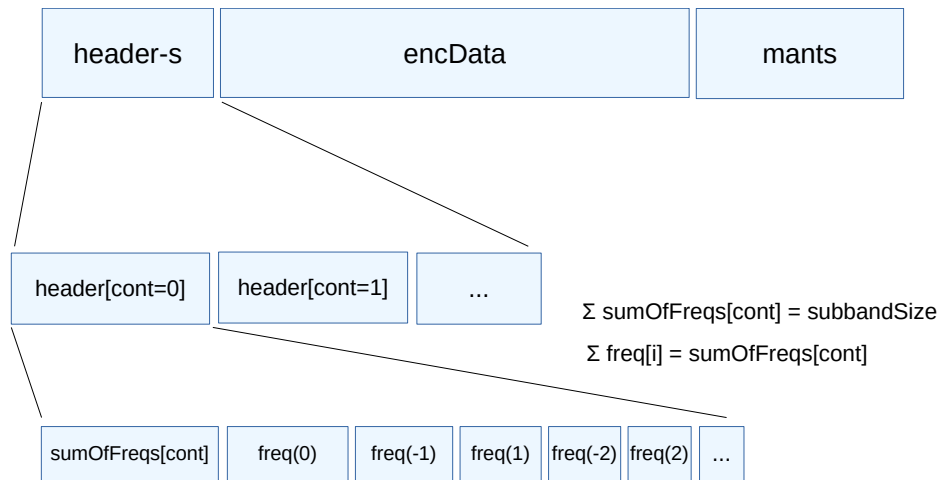


Рисунок 15. Схема разделения данных пространственно-частотной области вейвлет-разложения изображения на таблицы частот (заголовки) **header-s** для каждого контекста **cont**, закодированные знаковые экспоненты **encData** и мантиссы **mants**. В начале заголовка **header[cont]** каждого контекста **cont** записывается его длина **sumOfFreqs[cont]**, равная сумме всех частот **freq(n)** (число коэффициентов со значением **n** в данном контексте) для данного контекста. Сумма всех частот всех заголовков равняется величине **subbandSize** — числу вейвлет-коэффициентов данной области вейвлет-разложения изображения.

15: разработанный метод энтропийного кодирования результатов вейвлет-разложения изобра-

жений позволяет достичь до 6% снижения битрейта при среднем качестве восстановленного видео в диапазоне от 36 до 42 дБ, по сравнению с использованием арифметического кодера.

В заключении подводятся итоги работы, проделанной в рамках диссертации.

В Приложение включены акты о внедрении результатов диссертации.

Основные результаты

В рамках данной научной работы были сформулированы и проверены методы повышения эффективности сжатия визуальной информации за счет использования многоканального вейвлет-разложения изображений, а также исследовались возможности построения эффективных видеокодирующих систем на их основе.

Для достижения этих целей:

- были проанализированы классические методы сжатия изображений на основе ДКП и вспомогательных техник этого дискретного ортогонального преобразования: внутрикадрового предсказания и арифметического кодирования;
- была разработана программная реализация многоканального вейвлет-видеокодека, в рамках которой можно проверять на практике эффективность от использования различных техник работы с вейвлет-коэффициентами и их связь между собой;
- были предложены новые методы сжатия изображений: внутрикадровое предсказание в пространстве коэффициентов вейвлет-разложения изображений, энтропийное кодирование вейвлет-коэффициентов на основе асимметричных систем счисления;
- предложенные методы были реализованы в виде отдельных программных модулей;
- были проведены исследования эффективности сжатия изображений и видеопоследовательностей предложенными методами по сравнению с использованием опорных методов.

В итоге удалось достичь следующих результатов:

1. Разработанная программная реализация многоканального вейвлет видео кодека позволяет достичь до 31% снижения битрейта при сохранении уровня качества восстановленного видео (PSNR 40 дБ) по сравнению с x264, при этом немного уступая x265.
2. Разработанный новый метод внутрикадрового предсказания в пространстве вейвлет-коэффициентов позволил достичь до 6% уменьшения энтропии визуальных данных при качестве восстановленного сигнала в интервале PSNR от 36 до 42 дБ в полу-низкочастотных областях вейвлет-разложения изображений, а при использовании контекстов позволяет достичь до 55% уменьшения энтропии от исходной в низкочастотных областях вейвлет-

разложения изображений при качестве восстановленного сигнала в интервале PSNR от 36 до 42 дБ.

3. Разработанный метод энтропийного кодирования результатов вейвлет-разложения изображений позволяет достичь до 6% снижения битрейта при среднем качестве восстановленного видео в диапазоне от 36 до 42 дБ по сравнению с использованием арифметического кодера.

Список публикаций

1. Usage of Video Codec Based on Multichannel Wavelet Decomposition in Video Streaming Telecommunication Systems / Kirill Bystrov, Alexander Dvorkovich, Viktor Dvorkovich, Gennady Gryzov // Distributed Computer and Communication Networks / Ed. by Vladimir M. Vishnevskiy, Konstantin E. Samouylov, Dmitry V. Kozyrev. — Cham: Springer International Publishing, 2017. — Pp. 108–119. — URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66836-9_10.
2. Wavelet-Based Video Coding: Modern Implementations and Prospects of Coding Efficiency Increase / K. S. Bystrov, G. Y. Gryzov, A. V. Dvorkovich, V. P. Dvorkovich // 2017 IVth International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT). — 2017. — Pp. 38–41.
3. The Use of Intra Prediction Method in Wavelet-Based Video Coding Systems / Gleb Verba, Kirill Bystrov, Viktor Dvorkovich, Gennady Gryzov // Distributed Computer and Communication Networks / Ed. by Vladimir M. Vishnevskiy, Konstantin E. Samouylov, Dmitry V. Kozyrev. — Cham: Springer International Publishing, 2019. — Pp. 77–88.
4. *Konstantinov Fedor, Gryzov Gennady, Bystrov Kirill*. The Use of Asymmetric Numeral Systems Entropy Encoding in Video Compression // Distributed Computer and Communication Networks / Ed. by Vladimir M. Vishnevskiy, Konstantin E. Samouylov, Dmitry V. Kozyrev. — Cham: Springer International Publishing, 2019. — Pp. 125–139.
5. Быстров К.С., Грызов Г.Ю. Реализация многоканального вейвлет видеокодека в реальном времени // DSPA: ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ. Издательство: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова (Москва). 2017. Стр. 71-73.
6. К.С. Быстров, Г.Ю. Грызов, А.В. Дворкович, В.П. Дворкович. Использование видеокодека на основе многоканального вейвлет-разложения в телекоммуникационных системах потокового телевидения // Материалы 20-й Международной научной конференции «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети:

- управление, вычисление, связь» (DCCN 2017), Москва, 25-29 сентября 2017 г. Стр. 68-75.
7. Быстров К.С., Грызов Г.Ю., Дворкович А.В., Дворкович В.П. Вейвлетное видеокодирование: современные реализации и перспективы повышения эффективности кодирования // IV Междун. конф. «Инжиниринг & Телекоммуникации– En&T 2017»: Тезисы докладов. – Москва, 29-30 ноября 2017 г. – МФТИ, 2017. – С. 13-15.
 8. Г.А. Верба, К.С. Быстров. Поиск оптимальных параметров вейвлет-компрессии изображений // Труды 61-й Всероссийской научной конференции МФТИ. 19–25 ноября 2018 года. Радиотехника и компьютерные технологии. — М.: МФТИ, 2018. Стр. 115-116.
 9. В.А. Фургайло, К.С. Быстров. Реализация видеокодирования на базе многоканального вейвлет разложения изображений с использованием параллелизма вычислений в гетерогенных системах // Труды 61-й Всероссийской научной конференции МФТИ. 19–25 ноября 2018 года. Радиотехника и компьютерные технологии. — М.: МФТИ, 2018. Стр.124-125.
 10. Г.А. Верба, К.С. Быстров, В.П. Дворкович, Г.Ю. Грызов. Использование метода внутрикадрового предсказания в системах видеокодирования, основанных на вейвлет-разложении изображений // Материалы 22-й Международной научной конференции «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь» (DCCN 2019), Москва, 23-27 сентября 2019 г. Издательство: Российский университет дружбы народов (РУДН) (Москва). Стр.164-171.
 11. Ф.Г. Константинов, Г.Ю. Грызов, К.С. Быстров. Использование ANS метода сжатия информации в вейвлет-видеокодировании // Материалы 22-й Международной научной конференции «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь» (DCCN 2019), Москва, 23-27 сентября 2019 г. Издательство: Российский университет дружбы народов (РУДН) (Москва). Стр.172-179.