

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ,
МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ
КАМЕНЕЦ-ПОДОЛЬСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ИВАНА ОГИЕНКА**

В. В. БАРАННИК

В. П. ПОЛЯКОВ

А. В. СЛОБОДЯНЮК

**КОДИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ
ВИДЕОКАДРОВ В
ИНФОТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ
СИСТЕМАХ**

Монография

Каменец-Подольский – Харьков
2011

УДК 1.4
004.6 Б87
27

ББК *Утверждено в качестве монографии ученым советом
32.81 Каменец-Подольского национального университета имени
Ивана Огиенка (протокол № 10 от 25. 10. 2011 г.)*

Рецензенты: докт. техн. наук, профессор Федорович Олег Евгеньевич
(Национальный аэрокосмический университет «ХАИ»);
докт. техн. наук, профессор Хаханов Владимир
Иванович (Харьковский национальный университет
радиоэлектроники)

**Кодирование трехмерных моделей видеок кадров в
инфотелекоммуникационных системах:** монография /
В.В. Баранник, В.П. Поляков, А.В. Слободянюк. – Каменец-
Подольский: Калиграф, 2011. – С. 212.

ISBN 978-966-468-045-2

В книге рассматриваются направления, связанные с эффективным представлением трехмерных видеоинформационных моделей цифровых изображений. Строятся информационные модели изображений путем формирования их рельефа в трехмерном пространстве. Разрабатываются методы компактного представления на основе кодирования в непозиционном архитектурном пространстве трехмерного связного рельефа изображений. Излагается методика оценки производительности функционирования инфокоммуникационных систем с использованием разработанных технологий компрессии изображений.

Книга может представлять интерес для специалистов, аспирантов и студентов, проводящих исследования в области систем эффективного кодирования изображений и технологий обработки информации в инфокоммуникационных системах.

ISBN 978-966-468-046-9

© Баранник В. В, Поляков В. П., Слободянюк А.В. 2011.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
РАЗДЕЛ 1. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ВИДЕОШИФРУЕМЫХ МОДЕЛЕЙ	11
1.1. Исследование проблемных сторон функционирования информационно- телекоммуникационных систем	11
1.2. Классификация приложений в зависимости от характеристик компактного представления видеоданных	18
1.3. Модели представления изображений в цифровой форме.....	29
1.4. Представление полноцветных изображений в цветовых пространствах.....	40
Резюме.....	51
РАЗДЕЛ 2. МЕТОДЫ КОМПАКТНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ВИДЕОКАДРОВ	52
2.1. Классификация алгоритмов сокращения объёмов цифровых изображений.....	52
2.2. Методы сжатия изображений с информационной идентичностью	54
2.3. Методы сжатия изображений с искажением качества реконструированных изображений.....	62
2.4. Сравнительный анализ характеристик методов сжатия	74
Резюме.....	80

РАЗДЕЛ 3. МЕТОД РЕЛЬЕФНОГО ИЗОТОПНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ АРХИТЕКТУРНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ	82
3.1. Построение рельефной модели изображений на основе выделения изотопных уровней	82
3.2. Создание архитектуры изотопного представления рельефа изображения	92
3.3. Информационная оценка архитектурного позиционирования высот рельефа с учетом динамических диапазонов изотопных уровней.....	101
3.4. Разработка информационной модели изотопного представления изображения на основе связного архитектурного позиционирования.....	105
3.5. Формирование информационной модели мультиизотопного связного архитектурного представления в полиадическом пространстве	119
Резюме.....	127
РАЗДЕЛ 4. МЕТОД КОМПАКТНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ АРХИТЕКТУРЫ МУЛЬТИИЗОТОПНОГО ОПИСАНИЯ РЕЛЬЕФА ИЗОБРАЖЕНИЙ	131
4.1. Разработка нумерации архитектуры рельефа изображений	131
4.2. Разработка нумерации трехмерных связных двоичных структур в двумерном полиадическом пространстве	138
4.3. Структурное двоичное кодирование в непозиционном пространстве изотопных уровней архитектуры рельефа изображения	146
4.4. Создание метода восстановления изображений на основе структурного двоичного декодирования архитектурных кодовых конструкций	151
Резюме.....	162

РАЗДЕЛ 5. ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ИНФОРМАЦИОННО- ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ_	166
5.1. Оценка эффективности процесса компактного представления изображений в сетях с коммутацией каналов	166
5.2. Оценка роли процесса компактного представления для передачи изображений в телекоммуникационных сетях с коммутацией пакетов	177
5.3. Схемотехническая реализация разработанных методов компактного представления	186
Резюме	190
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	194
ЛИТЕРАТУРА	201

ВВЕДЕНИЕ

Развитие инфраструктуры крупных производств (в области транспорта, нефтегазовой промышленности, энергетической области, в области предоставления населению телекоммуникационных и мультимедийных услуг) неразрывно связано с [3; 4; 20; 21; 22; 34; 50; 53; 57; 65; 71; 76; 83; 87]:

- территориальной распределенностью организационных и технологических процессов;
- обработкой и передачей больших объемов информации (в том числе видеоинформации);
- автоматизацией функций относительно обработки, анализа и принятия решений, но с сохранением важной роли человека;
- повышением требований относительно оперативности и достоверности получаемой информации;
- использованием различных информационных и телекоммуникационных технологий для организации функционирования.

Поэтому на первый план выдвигаются вопросы, состоящие в обеспечении обработки и передачи данных, по существующим телекоммуникационным системам на большие расстояния с заданным уровнем достоверности за требуемые временные сроки (вплоть до реального времени).

В тоже время наибольшей информативностью обладают видеоданные. Это приводит к расширению видеоинформационного взаимодействия. С другой стороны на представление оцифрованных изображений затрачивается большое количе-

ство двоичных разрядов. Отсюда для достоверной обработки и передачи видеоданных в реальном времени требуется использование высокопроизводительных информационно-телекоммуникационных технологий. Однако существующие ИТС имеют ограниченные возможности относительно обработки и передачи данных. Это приводит к:

- увеличению нагрузки на каналы связи;
- росту времени обработки и передачи данных;
- повышению стоимости получаемой информации;
- снижению степени достоверности информации;
- уменьшению оперативности принятия решений.

Следовательно, можно сделать предположение, что научно-прикладное направление исследований, состоящее в сокращении суммарного времени на обработку и передачу в телекоммуникационных системах различных классов статических изображений с сохранением заданного уровня достоверности за счет кодирования источников видеоданных, является весьма перспективным.

Одним из направлений данных исследований является использование методов компактного представления оцифрованных изображений.

Анализ существующих подходов относительно сжатия и восстановления оцифрованных изображений [1; 2; 4 – 7; 20; 21; 23; 24; 27; 29 – 33; 36; 37; 41 – 45; 48; 49; 51; 52; 55; 56; 58 – 63; 68 – 70; 74; 80; 82; 85; 86; 88; 91 – 118] выявил, что:

1) наибольшие степени сжатия обеспечиваются методами, основанными на: предварительной обработке видеоданных по средствам ортогональных и вейвлет преобразований; устранении психовизуальной избыточности. В тоже время методам данного класса характерны следующие недостатки:

– вносятся безвозвратные потери информации в результате накопления ошибки округления вещественных данных и выполнения квантизации компонент трансформант;

– затрачивается большое количество операций. С ростом размеров изображений (более 1Мпикселя) даже быстрые алгоритмы выполнения преобразований не обеспечивают обработку в реальном времени (время обработки превышает несколько десятков секунд). Такие недостатки ограничивают области применения методов данного класса;

2) среди методов сжатия и восстановления изображений, обеспечивающих обработку в реальном времени без внесения погрешности наибольшие степени сжатия достигаются для кодов, основанных на выявлении длин серий одинаковых элементов (сокращается структурная избыточность) и для кодов, базирующихся на сокращении статистической избыточности (арифметические коды). Однако данным методам свойственны такие недостатки как:

– резкое снижение степени сжатия при обработке реалистических изображений (степень сжатия в среднем 1,2 раза);

– снижение помехоустойчивости сжатых данных при их передачи по каналам связи с ошибкой;

– сокращение избыточности изображений проводится за счет выявления локальных закономерностей изображений (длина серия – для реалистических изображений распространяется в среднем на 2 элемента, законы распределения оцениваются для локальных блоков кадра). Это приводит к увеличению времени передачи данных по каналам связи и к снижению степени достоверности восстанавливаемых данных;

3) для различных классов изображений свойственно наличие распределенных областей серий одинаковых элементов. Однако подходы и методы, обеспечивающие сжатия ви-

деоданных, за счет сокращения данных видов избыточности не получили необходимой проработки в теории информации и кодирования.

Первый раздел книги посвящен анализу существующей ситуации в сфере функционирования информационно-телекоммуникационных систем. Приводятся показатели оценки эффективности приложений, связанных с процессом обработки и передачи видеоданных, а также описываются основы представления изображений в цифровой форме. Во втором разделе рассматриваются существующие методы компактного представления видеокладов, выявляются их особенности и недостатки. В третьем разделе строится рельефная модель мультиизотопного описания изображений и для нее разрабатывается информационная модель архитектурного представления. Четвертый раздел посвящен разработке метода структурного кодирования в непозиционном архитектурном пространстве рельефа изображения, а также методу беспогрешностному восстановлению изображений на основе декодирования позиционирующей информации. В пятом разделе проводится сравнительный анализ эффективности разработанного метода кодирования и декодирования с наиболее популярными существующими методами в телекоммуникационных сетях с различными типами коммутаций.

В книге исследуются актуальные направления обработки изображений, представленных трехмерными информационными моделями. Строится рельефная модель изображений в непозиционном архитектурном пространстве. Это позволяет разработать новый метод компактного представления, базирующийся на формировании кодовых конструкций для мультиуровневой связанной архитектуры в трехмерном непозиционном пространстве. В процессе устранения избыточности изображений учитываются связанные интегрированные

структурные закономерности их фрагментов. Обосновывается повышение производительности информационно-телекоммуникационных систем в результате обработки изображений на основе созданных методов.

РАЗДЕЛ 1

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ВИДЕОИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

1.1. Исследование проблемных сторон функционирования информационно- телекоммуникационных систем

Особенности функционирования крупных производств (в области транспорта, нефтегазовой промышленности, энергетической области, в области предоставления населению телекоммуникационных и мультимедийных услуг) заключаются в [2; 20; 43]:

- территориальной распределенности организационных и технологических процессов;
- обработке и передаче больших объемов информации (в том числе видеоинформации);
- автоматизации функций относительно обработки, анализа и принятия решений, но с сохранением важной роли человека;
- обеспечении требований относительно оперативности и достоверности получаемой информации;
- использовании различных информационных и телекоммуникационных технологий для организации функционирования.

Для обеспечения эффективности производительных процессов их информационно-техническая инфраструктура строится на основе: интеграции информационно-вычислительных и телекоммуникационных технологий [3; 21; 47; 61].

В зависимости от класса и важности решаемых задач функционирование ИТС осуществляется в условиях связанных с:

- необходимостью обработки и передачи большого объема различной информации;
- наличием большого количества различных видов источников и получателей информации;
- обеспечением заданной степени достоверности и полноты передаваемой и получаемой информации;
- существованием большого количества объектов контроля и учета;
- необходимостью обеспечения решения задач управления в условиях дефицита времени;
- большим взаимным пространственным расположением элементов (подсистем) с учетом их внутренних и внешних связей.

В то же время эффективность решения многих технологических и управленческих задач для большинства практических приложений связана с:

- дополнительным (резким) увеличением объемов обрабатываемых, передаваемых и анализируемых данных от различных источников информации;
- выдвиганием требования относительно повышения степени достоверности получаемой информации.

Данные условия выдвигаются факторами, обусловленными наличием:

1) Зависимости своевременности и правильности принятия решения от полноты и достоверности получения информации. Это приводит к развитию и расширению внедрения видеоинформационного способа информационного обеспечения.

Видеоданные (статические и динамические изображения)

представляются в исходном виде на основе различных моделей цветопредставления и графических форматов. На основе видеоинформационного обеспечения осуществляется получение следующей информации о [2; 31; 32; 41; 73]:

– границах и размерах облачных и атмосферных фронтальных зон, зонах осадков и их интенсивности, зарождении и эволюции циклонов, состоянии моря, зонах штормов, радиационном балансе Земли, температуре морской поверхности и поверхности суши, высоте и направлении волн;

– скорости и направлении приводного ветра, а также о положении, размерах и характеристиках облачных структур; о тропических циклонах, штормах, выделении атмосферных фронтов, зонах осадков; положении, размерах и характеристиках снежного и ледового покровов; тепловых аномалий на поверхности суши; видах лесной и сельскохозяйственной растительности и динамики их изменения;

– состоянии и динамике развития лесных массивов, информация о пожарной опасности в лесах;

– состоянии искусственных строений на ЖД транспорте, переездах, состоянии транспортных магистралей;

– состоянии участков нефтегазопровода, состоянии зоны Чернобыльской АЭС.

2. Роста степени важности информации, доводимой от различных источников, что обусловлено повышением технологической сложности и автоматизацией таких кризисных приложений как нефтегазовая отрасль, энергетика, транспорт.

3. Улучшение информационно-технических характеристик вычислительных и мультимедийных систем как следствие – рост потребительского спроса населения на различные информационные услуги.

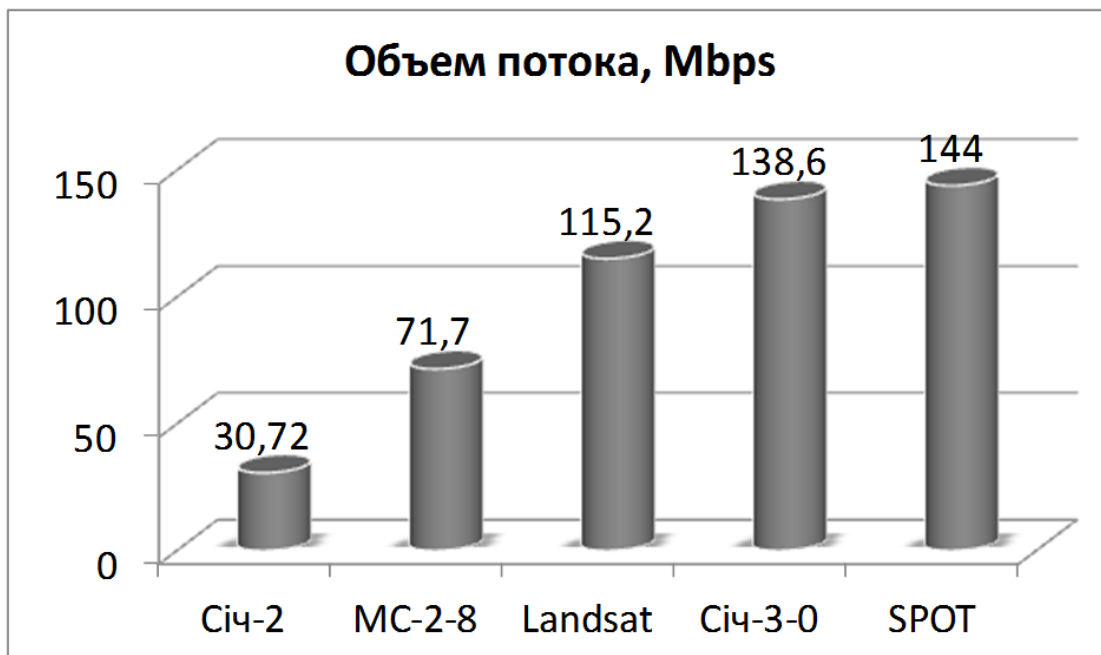


Рис. 1.2. Информационные потоки, формируемые системами аэрокосмического мониторинга

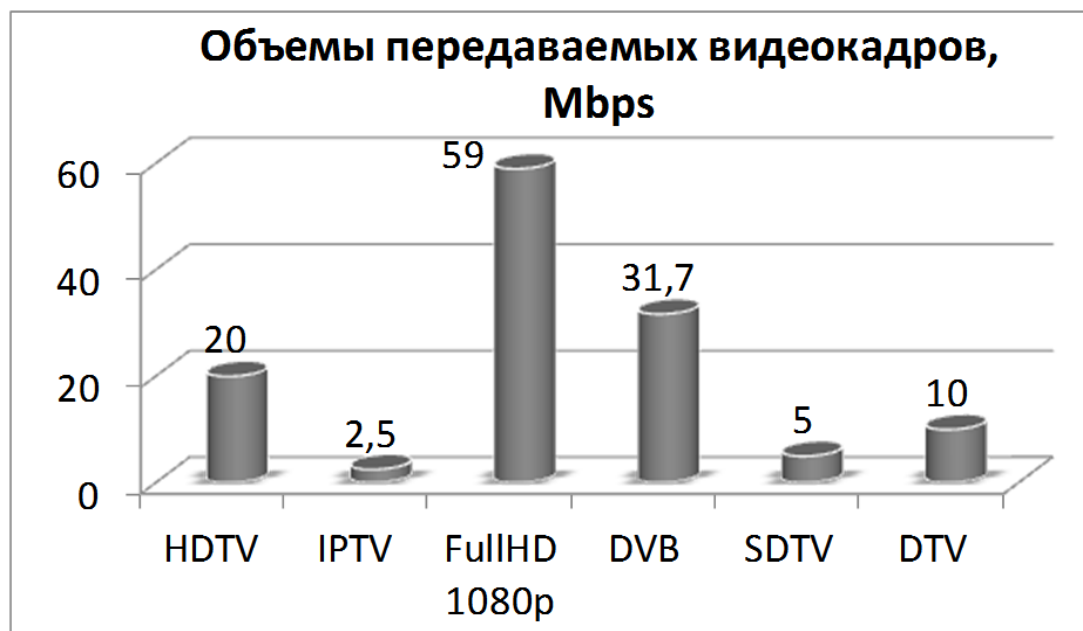


Рис. 1.3. Величина информационных потоков, характерных для различных стандартов систем передачи цифровых видеоданных

Данные тенденции являются причиной резкого увеличе-

ния информационных потоков цифровых данных (рис. 1.2 и рис. 1.3.), которые необходимо перераспределять на между многочисленными пользователями на большие территориальные расстояния.

Анализ графиков на рисунках 1.2. и 1.3. показывает, что величина цифровых потоков передачи видеоданных колеблется в пределах от 30 до 144 Мбит/с для систем аэрокосмического мониторинга (системы, обеспечивающие высокое качество передаваемых изображений) и от 2,5 до 60 Мбит/с для систем цифрового телевидения.

Отсюда следует, что основной функцией телекоммуникационных систем является обеспечение передачи и обработки необходимых объемов V данных с заданной степенью достоверности h_z за требуемые временные сроки $T(V)_{mp}$.

Оценка возможностей телекоммуникационных технологий по выполнению требуемых условий осуществляется на основе построения зависимости времени обработки и передачи данных от быстродействия вычислительных систем и скорости передачи по каналам связи (рис. 1.4. и 1.5).

Оценка суммарного времени $T(V)_{\Sigma}$, включающего в себя время $T(V)_o$ на обработку и время $T(V)_n$ на передачу в телекоммуникационных системах заданного объема информации V , определяется по формуле

$$T(V)_{\Sigma} = T(V)_o + T(V)_n. \quad (1.1)$$

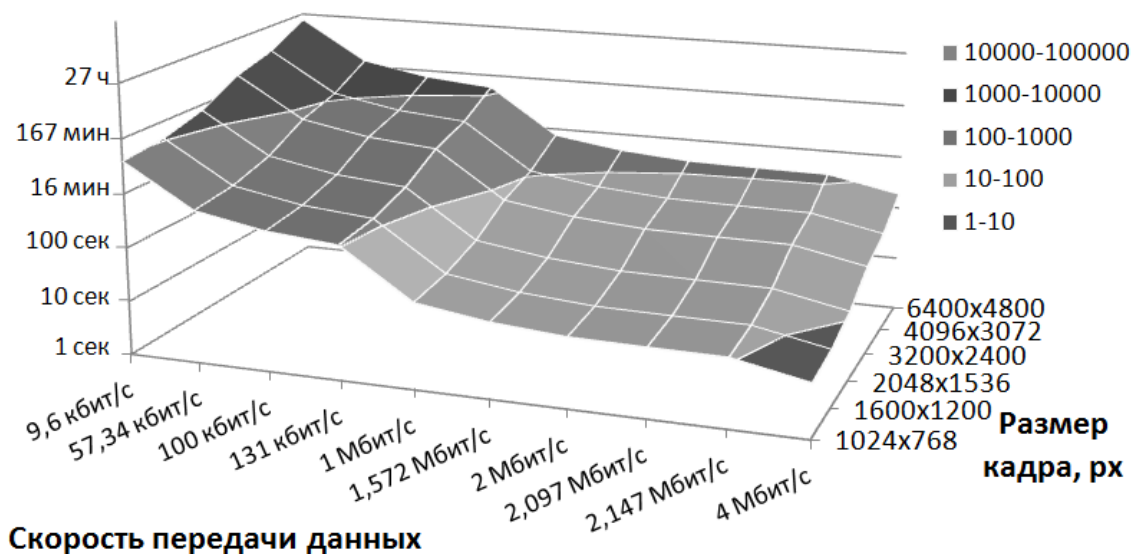


Рис.1.4. Зависимость времени передачи видеоданных в телекоммуникационных сетях с различной скоростью передачи, от размера кадра.

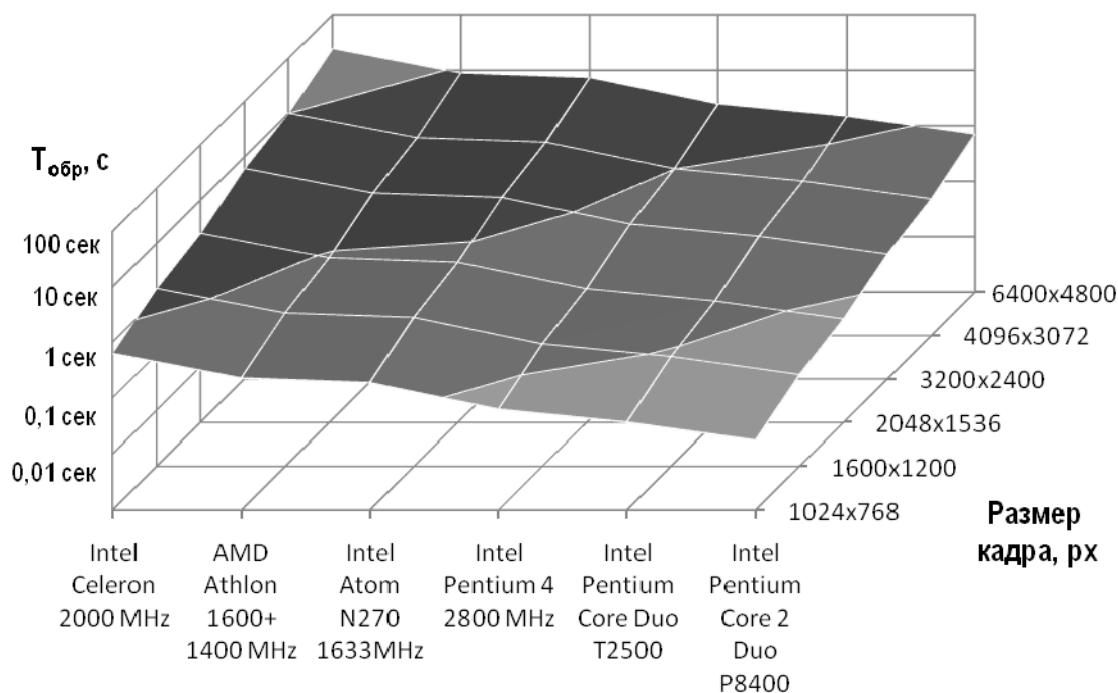


Рис.1.5. Оценка минимального времени обработки видеоданных на различных информационно-вычислительных системах (ИВС).

Из приведенных графиков на рис. 1.4 и 1.5 видно, что время, затрачиваемое на обработку и передачу видеоданных (особенно по низкоскоростным каналам связи), достигает нескольких сотен минут. Это не удовлетворяет требованиям относительно времени передачи и обработки данных с заданной степенью достоверности, которые предъявляются к телекоммуникационным системам, т.е.

$$T(V)_{mp} \lll T(V)_{\Sigma}. \quad (1.2)$$

Следовательно, существует *противоречие*, состоящее, с одной стороны, в необходимости своевременного доведения видеоданных больших объемов, а с другой стороны – ограниченными возможностями вычислительных средств и техническими возможностями телекоммуникационных технологий.

Основные причины проявления данного противоречия вызваны тем, что:

1. Основными видами связи являются радиосвязь и связь по телефонным линиям, которые имеют относительно низкую скорость передачи, что приводит к временным задержкам при доведении видеоинформации.

2. За последние десятилетия резко увеличились объемы видеоданных, которые требуется доводить на большие расстояния.

3. Временные задержки при доведении данных в телекоммуникационных сетях возникают не только при передаче данных по КС, но и при дополнительной обработке на центрах коммутации.

Одним из направлений решения выявленного противоречия состоит в использовании методов компактного представления видеоинформации [4; 19; 20; 28; 48; 72; 79]. Структурная схема системы обработки и передачи данных с подсистемой сжатия приведена на рис. 1.6.

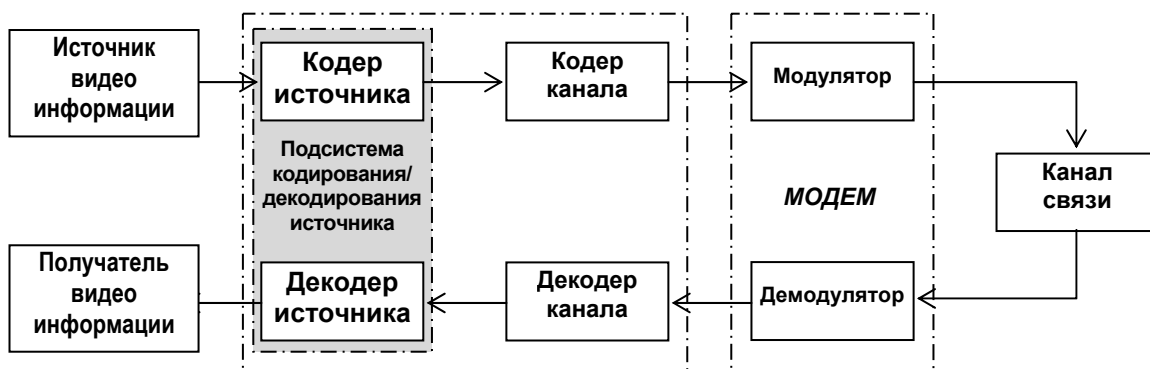


Рис.1.6. Структурно-функциональная схема системы передачи и обработки данных

1.2. Классификация приложений в зависимости от характеристик компактного представления видеоданных

Существующие приложения информационно-телекоммуникационных систем (ИТС) можно разделить на отдельные классы. Первый класс составляют цифровые телевизионные системы.

Упрощенная структурная схема телевизионных систем показана на рисунке 1.1.

Второй класс составляют технологии, обеспечивающие передачу цифровых данных либо с наперед заданным уровнем достоверности, либо гарантирующие нулевую потерю в процессе передачи. Последнее требование является основным для любого приложения передачи данных с точки зрения конечного пользователя. Еще одним требованием являются временные задержки передачи данных. Оно не является основным, хотя сохраняется необходимость синхронизации потоков в процессе передачи мультимедийных данных (например, синхронизация передачи звукового и видеопотоков в онлайн презентациях).

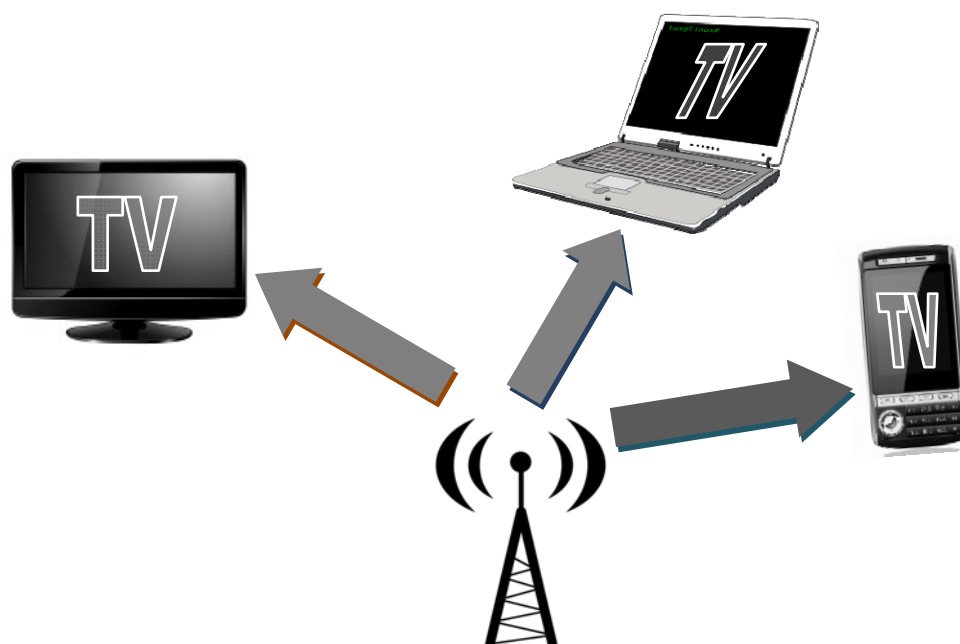


Рис. 1.1. Системы односторонней передачи видеоданных (телевидение).



Рис. 1.2. Системы передачи цифровых данных.

При создании новых приложений разработчики ориентируются, прежде всего, на требования конечного пользователя и стараются обеспечить относительно малые временные задержки при передаче данных с сохранением приемлемого качества.

Структурная схема приложений систем передачи цифровых данных с гарантированием высокого уровня достоверности представлена на рисунке 1.2.

Системы, обеспечивающие *сервис интернет-серфинга* (поиск информации), рассматривают аспекты подачи запросов и получения информации в виде HTML-кодов, а также связанных с ними других объектов (например, изображения, аудио-, видеоклипы). Главным показателем качества здесь является время, прошедшее с момента подачи запроса пользователем и до получения им полного содержания веб-страницы. Приемлемым значением задержки для данного сервиса считается временной интервал порядка нескольких секунд.

Следующая категория предусматривает *передачу больших массивов данных*. Говорить о задержках в данном случае неуместно, поскольку передача продолжается до тех пор, пока не завершится передача последнего бита.

Системы высокоприоритетной передачи данных (приложения электронной коммерции) главным требованием выдвигают обеспечение передачи информации за время, при котором эта информация еще имеет экономическую целесообразность. Задержки при этом не должны превышать нескольких секунд.

Категория технологий *передачи изображений* включает разнообразие форматов кодирования, некоторые из них могут допускать информационную потерю до тех пор, пока их будет распознавать человеческий глаз. Существуют и такие, которые предназначены обеспечивать нулевую потерю информации при передаче, и возникновение ошибки даже в одном бите мо-

жет повлечь за собой необратимые потери. Однако, требования к временным задержкам для передачи изображений не строги и их можно сравнить с категорией передачи больших массивов данных. Другими словами, формирование изображения на приемной стороне продолжается до тех пор пока не получен сигнал подтверждения о передаче последнего бита информации.

В *интерактивных онлайн-играх* требовательность ко временным задержкам при обмене данными клиентских приложений с серверами в первую очередь зависят от типа самой игры. Однако сами задержки для того чтобы обеспечить эффект интерактивности должны быть порядка нескольких десятых секунды.

Сервис Telnet весьма требователен ко временным задержкам. Для того, чтобы обеспечить почти мгновенную реакцию на введенную команду (echo-back), допускаются задержки всего в несколько десятых секунды.

Сервис электронной почты (e-mail) в основном предназначен для хранения и пересылки информационных сообщений и, в принципе, каких-либо строгих требований по времени доставки здесь нет. Время доставки может быть от нескольких минут до нескольких дней. Однако, здесь следует четко различать время приема/передачи сообщения от пользователя к почтовому серверу и время обмена данными между почтовыми серверами. В первом случае важно, чтобы отправка письма пользователем на почтовый сервер осуществлялась в пределах нескольких секунд.

Системы интернет пейджинга (обмен мгновенными сообщениями) прежде всего, подразумевают передачу текстовых сообщений, однако они могут дополняться также звуковыми сообщениями, видео потоками и изображениями. В любом случае, это не передача в реальном масштабе времени

и задержки порядка нескольких секунд допускаются.

Еще один класс приложений составляют фоновые низкоприоритетные приложения (Background applications) включающие в себя системы отправки и получения факсимильных сообщений, сервисы низкоприоритетной передачи сообщений (например СМС-сообщения) и сервис электронной почты типа сервер-сервер (когда не выдвигаются условия мгновенной доставки). Теоретически данные приложения не выдвигают особых требований по временным задержкам при передаче данных, однако, существует ограничение по времени, после которого передача сообщения становится уже бесполезной.

Зависимость приложений информационно-телекоммуникационных систем от критичности их характеристик представлены в таблице 1.1.

Из таблицы видно, что при передаче статичных изображений, а также в современных цифровых телевизионных системах, критичными являются такие параметры как суммарное время кодирования, декодирования и передачи данных. Время доставки напрямую зависит от параметров ИТС и объемов передаваемых данных. В процессе кодирования изображений можно сократить объем изображения используя для этого тот или иной алгоритм сжатия. Для того, чтобы корректно оценивать алгоритмы сжатия и восстановления необходимо задать определенные критерии:

– худший, средний и лучший коэффициент сжатия. (Иначе говоря, разброс коэффициента сжатия, если исходные данные будут наихудшими; некий среднестатистический коэффициент для того класса изображений, на который ориентирован алгоритм; и, наконец, лучший коэффициент, причем последний имеет лишь теоретическое значение, поскольку показывает степень сжатия наилучшего изображения);

Таблица 1.1. –

Зависимость приложений от критичности характеристик

Класс приложений	Пример приложений	Критичность характеристик
Системы телевидения	Онлайн-трансляции (Internet TV)	– время доставки; – время декодирования.
	Сервисы вещания для сотовых телефонных систем (GPRS/3G)	– время доставки; – время декодирования.
	Цифровое телевидение (DVB)	– время доставки; – время кодирования; – время декодирования.
	Цифровое телевидение высокой чёткости (HDTV)	– время доставки; – отсутствие потерь; – время кодирования; – время декодирования.
Передача цифровых данных	Передача статических изображений	– время доставки; – отсутствие потерь; – время кодирования; – время декодирования.
	Поиск информации в интернете (web-surfing)	– время доставки.
	Мгновенные сообщения (интернет пейджинг)	– время доставки.
	Передача больших потоковых массивов данных	– отсутствие потерь.
	Интерактивные онлайн игры	– время доставки.
	Электронная почта	– отсутствие потерь.
	Высокоприоритетные сервисы передачи данных (электронная коммерция)	– время доставки; – отсутствие потерь.
	Сервис Telnet	– время доставки; – время передачи.

– класс изображений, на который ориентирован алгоритм (иногда указывают, почему на других классах изображений получаются худшие результаты);

– симметричность – характеризует ресурсоемкость процессов кодирования и декодирования (при этом наиболее важным является отношение времени кодирования ко времени декодирования);

– потери качества (у большинства алгоритмов сжатия с потерей информации существует возможность изменения коэффициента сжатия);

– характерные особенности алгоритма и изображений, к которым его применяют.

Одна из проблемных сторон функционирования телекоммуникационных систем связана с необходимостью снижения времени обработки и доведения информации. Отсюда основным показателем технологии компактного представления видеоданных является способность обеспечить снижение величины $T(V)_{\Sigma}$ [3; 20; 21; 47; 55]:

$$T(V)_{\Sigma} \rightarrow \min. \quad (1.3)$$

При оценке величины $T(V)_{\Sigma}$ необходимо учитывать дополнительные временные затраты $T(V)_c$ и $T(V)_g$, отводимые соответственно на сжатие и восстановление изображений. С учетом этого величина $T(V)_{\Sigma}$ рассчитывается по формуле

$$T(V)_{\Sigma} = T(V)_c + T(V_c)_n + T(V)_g, \quad (1.4)$$

где $T(V_c)_n$ – время, требуемое на передачу сжатых данных объемом V_c .

Для заданных характеристик информационно-телеком-

муникационных технологий (скорости U_n передачи данных по каналу связи и быстродействия $U_{обр}$ вычислительных средств относительно выполнений количества арифметических операций в единицу времени) оценки величин $T(V)_c$, $T(V)_в$ и $T(V_c)_n$ определяются на основе выражений [19; 42; 43]:

$$T_c = v(V)_k / U_{обр} ; \quad (1.5)$$

$$T_в = v(V)_d / U_{обр} ; \quad (1.6)$$

$$T_n = V_c / U_n , \quad (1.7)$$

где $v(V)_k$, $v(V)_d$ – количество машинных операций (для выполнения операций сложения, вычитания, деления, умножения, сравнения и т.д.), затрачиваемое соответственно процессами сжатия и восстановления; $U_{обр}$ – быстродействие информационно-вычислительных технологий АСУ; U_n – скорость передачи данных в телекоммуникационных системах.

Оценка цифрового объема V_c сжатых видеоданных является абсолютным показателем эффективности процесса сокращения избыточности изображений. Для относительной оценки используется величина коэффициента $k_{сж}$ сжатия. Величина $k_{сж}$ определяется как отношение объема V исходных видеоданных к объему V_c сжатых видеоданных

$$k_{сж} = V / V_c . \quad (1.8)$$

Отсюда объем V_c сжатых видеоданных находится по формуле

$$V_c = V / k_{сж} . \quad (1.9)$$

Из сравнения выражений (1.7) и (1.9) вытекает, что

время передачи данных $T(V_c)_n$ зависит от значения $k_{сж}$:

$$T_n = V/U_n k_{сж} . \quad (1.10)$$

Дополнительным требованием, которые выдвигает процесс функционирования ТС к технологии сжатия, является показатель достоверности получаемых данных.

Качество теряется при оцифровке, при переводе в ограниченную палитру цветов или в другое цветовое пространство, а так же при сжатии изображений с потерями.

Несмотря на то, что работа в области алгоритмов сжатия изображений проведена уже довольно значительная, до сих пор не выработана общая модель надежного определения качества сжатия изображений. Существует целый ряд подходов решения данной проблемы. Основные потери качества происходят при дискретизации изображений, при конвертации из одной модели цветопредставления в другую, при передаче в канале связи, при использовании алгоритмов сжатия с потерями.

Пусть есть два изображения: $I(x; y)$ – оригинал, и $I'(x; y)$ – восстановленное изображение размером $M \times N$, тогда одним из простых критериев оценки потери качества является среднеквадратическое отклонение значений пикселей сжатого изображения от оригинала:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{x,y}^{M,N} I(x,y) - I'(x,y)}{M \cdot N}} \quad (1.11)$$

Согласно этого критерия, изображение будет сильно испорчено при изменении яркости всего на 5%. В то же время изображение со «снегом» (резкими скачками значений цветов отдельных точек) будут трактоваться как «почти не

изменившиеся».

Другим критерием является максимальное отклонение от оригинала:

$$\sigma = \max_{x,y} |I(x,y) - I'(x,y)| \quad (1.12)$$

Данная мера крайне чувствительна к биению отдельных пикселей, т.е. в изображении может измениться только один пиксель, и данный критерий признает изображение сильно испорченным.

На практике используемой мерой качества изображения является критерий пикового соотношения сигнал/шум (PSNR – peak-to-peak signal-to-noise ratio).

$$\sigma = 10 \log_{10} \frac{255^2 \cdot M \cdot N}{\sum_{x,y} (I(x,y) - I'(x,y))^2} \quad (1.13)$$

Эта мера аналогична среднеквадратическому отклонению, но пользоваться ей удобнее из-за логарифмического масштаба шкалы.

Лучше всего потери в качестве оценивает человеческий глаз. Сжатие изображения можно считать отличным, если на глаз невозможно отличить оригинал от сжатого изображения. Но на практике при сжатии с потерями в изображение всегда вносятся какие-либо искажения заметные при сравнении оригинала и сжатого изображения.

К другим наиболее употребляемым критериям оценки качества изображения относятся [28; 72; 74]:

– Коэффициент кросс-корреляции:

$$K = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [I(x,y) \times I'(x,y)]}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [I(x,y)]^2}$$

– Верность изображения (image fidelity):

$$AD = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [I(x, y) - I'(x, y)]^2}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [I(x, y)]^2}$$

Среди большого числа критериев оценки качества изображения в работе для оценки качества восстановленного изображения в теории информации используется показатель σ среднеквадратической погрешности восстановленного изображения и отношение сигнал/шум h .

В соответствии с требованиями, выдвигаемыми особенностями решения задач с использованием ТС к технологии сжатия, критерием их эффективности будет:

1) в случае известного времени t , необходимого для передачи объема V – соответствие между требуемой величиной t и временем $T(V)_{\Sigma}$, которое обеспечивается технологией компактного представления

$$T(V)_{\Sigma} \rightarrow t; \quad (1.15)$$

2) в общем случае – минимизацией времени обработки и передачи данных

$$T(V)_{\Sigma} \rightarrow \min. \quad (1.16)$$

При этом на выполнение соотношений (1.15) и (1.16) накладываются ограничения по скорости обработки, скорости передачи данных по ТС и требование по степени достоверности. Тогда, подставив в соотношение (1.15) выражения (1.4) и (1.10), получим систему, задающую критерий эффективности технологий компактного представления

$$T(V)_{\Sigma} = \frac{v(V)_k}{U_{обр}} + \frac{V}{U_n k_{сж}} + \frac{v(V)_d}{U_{обр}} \rightarrow \min; \quad (1.17)$$

$$\begin{cases} h \leq h_3; U_n \leq U_{зад,n}; \\ U_{обр} \leq U_{зад,обр}; W_{взу} \leq W_{зад,взу}, \end{cases} \quad (1.18)$$

где h_3 – заданное значение отношения сигнал/шум; $U_{зад,обр}$, $U_{зад,n}$, $W_{зад,взу}$ – соответственно заданные для конкретной ИТС скорость выполнения машинных операций, скорость передачи данных и объем ВЗУ.

1.3. Модели представления изображений в цифровой форме

В компьютерной графике типы изображений условно можно разделить на два класса в зависимости от количества представленных на них измерений. Соответственно они называются двухмерные, трехмерные и многомерные.

Для указания местоположения графического объекта в плоскостной или 2D-графике используются математические координаты, но т.к. устройство отображения – это реальный физический объект, то существует различие между физическими и логическими пикселями.

Физические пиксели – реальные точки, отображённые на устройстве вывода, т.е. это наименьшие физические элементы поверхности отображения, которые можно обрабатывать аппаратным и программным способом. Так как физические пиксели занимают определённую площадь поверхности отображения, то на расстояние между двумя соседними пикселями вводятся ограничения.

Логические пиксели – это математические координаты, которые имеют местоположение, но не занимают физическое

пространство. Поэтому при отображении значения логических пикселей в физические пиксели экрана должны учитываться реальный размер и расположение физических пикселей.

Количество цветов (глубина цвета) — важная характеристика любого изображения, не только растрового. В соответствии с психофизиологическими исследованиями глаз человека способен различать 350 000 цветов. При этом он способен одновременно воспринимать 224 цвета. Фактически термин «глубина цвета» используется для обозначения количества необходимых бит для хранения информации о цвете графического пикселя. Объем памяти в байтах, необходимый для хранения растрового изображения, можно легко получить из соотношения $V = m \times n \times D / 8$, где m — количество столбцов, n — количество строк, D — глубина цвета.

Различают несколько типов графических изображений в соответствии с глубиной цвета: бинарные (bitmap), полутоновые, палитровые (indexed), полноцветные (high color и true color).

Двухцветные (бинарные, битовые). Для задания цвета используется всего 1 бит на пиксель. Среди двухцветных изображений наиболее часто встречаются черно-белые (рис. 1.7).

Полутоновые — градации серого (Grayscale) или другого цвета. Например, 256 градаций. Обычно предполагается, что в полутоновом изображении хранятся градации серого цвета от черного до белого. Глубина цвета полутоновых изображений обычно составляет 8 бит/пиксель. Но могут быть изображения и с глубиной от 2 до 16 бит на пиксель. Пример полутонового изображения в градациях серого показан на рисунке 1.8.



Рис.1.7. Пример двухцветного изображения



Рис.1.8. Пример полутонового изображения

Полутоновые и бинарные изображения представляют собой двумерные массивы целого типа, где координате точки соответствует определенный номер градации цвета.

Палитровые изображения (индексированные) – используют ограниченный набор цветов, который, как правило, позволяет отобразить графическая система компьютера. В палитровых изображениях значения пикселей являются номера-указатели на ячейки ограниченного набора цветов, который принято называть палитрой цветов. Палитра представляет собой двумерный массив, в столбцах которого расположены интенсивности цветовых составляющих, а в строках – цвета. Количество строк равно 2^D .

Для описания цветов цифровых изображений наиболее часто используется цветовая система, состоящая из красной, зеленой и голубой составляющей цвета. Столбцы палитры представляют в этом случае значения интенсивностей каждой составляющей.

Получили распространение палитровые изображения с 16 и 256 цветами (глубина цвета соответственно 4 и 8 бит/пиксель). На рисунке 1.9. тестовое изображение было конвертировано в индексированное отображение с палитрой в 8 цветов.

Палитровые изображения хранятся в виде двумерных массивов индексов (номеров цветов из палитры). Для каждого палитрового изображения существует двумерный массив палитры, в трех столбцах которого расположены значения R,G,B. Так для изображения приведенного на рисунке 1.9 матрица палитры цветов будет иметь вид представленный на рис. 1.10.

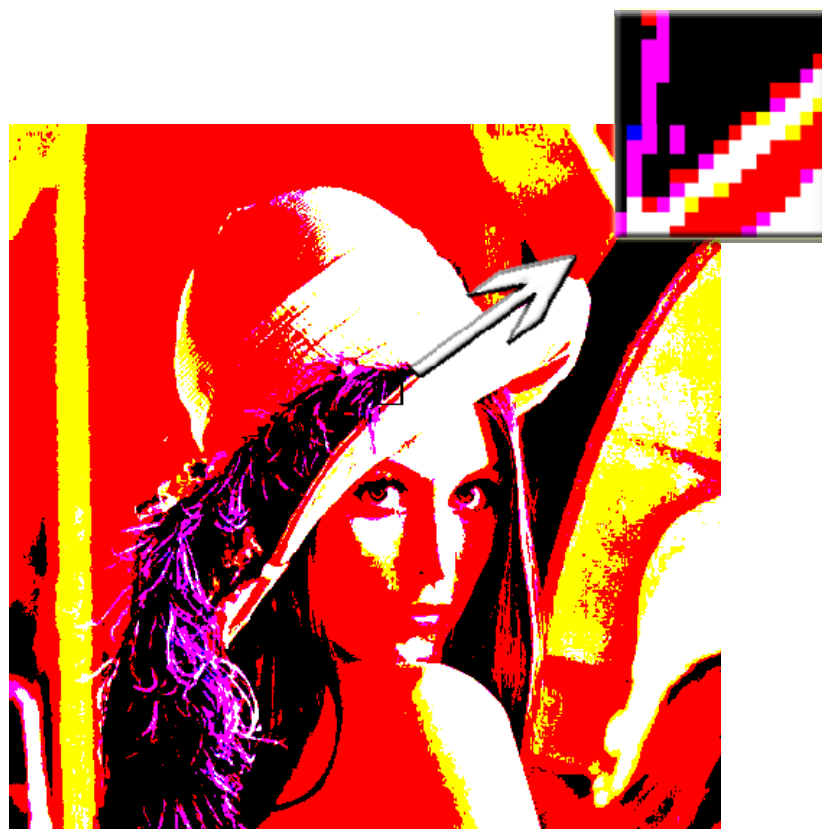


Рис.1.9. Пример индексированного изображения с палитрой на 8 цветов

		R	G	B
0		255	255	255
1		255	255	0
2		255	0	255
3		255	0	0
4		0	255	255
5		0	255	0
6		0	0	255
7		0	0	0

Рис.1.10. Палитра цветов для индексированного изображения

Полноцветные изображения (2 бита на пиксель и больше). Глубина цвета 16 битов на пиксель (65536 цветов) получила название High Color, 24 бита на пиксель (16. 7 млн. цветов) — True Color. В компьютерных графических системах используют и большую глубину цвета — 32, 48 и более битов на пиксель.

Пример полноцветного изображения представлен на рисунке 1.11.

Тот факт, что для интерпретации цветовых характеристик пикселей изображений используется кодированная таблица подстановки (палитра), можно утверждать, что размер индексированных изображений намного меньший, нежели у полноцветных.

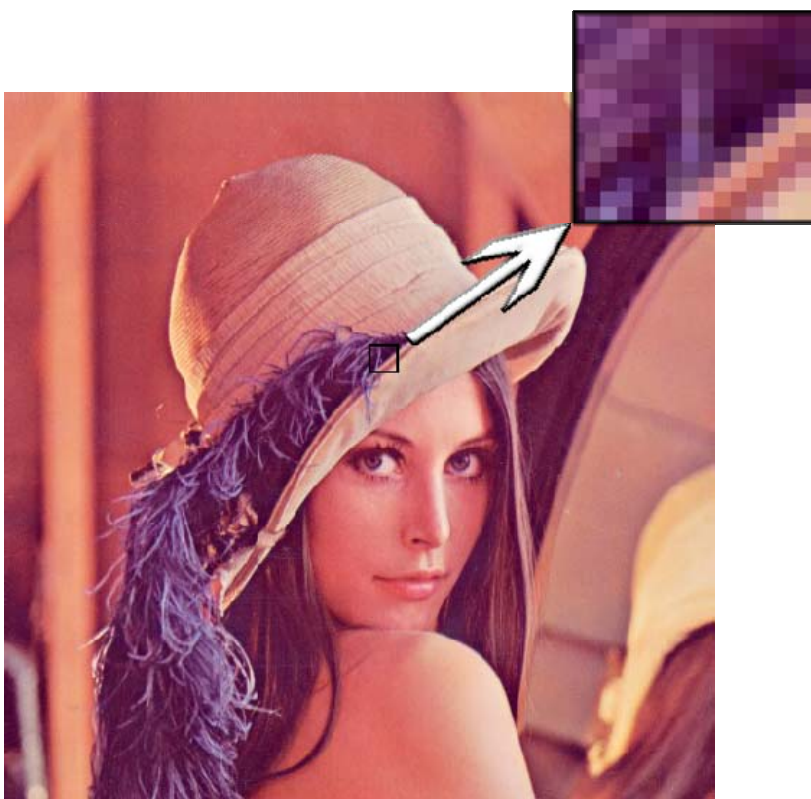


Рис.1.11. Пример полноцветного изображения (True Color)

Всего есть 16777216 различных возможных цветов и каждый пиксель описывается 24 битами или 3 байтами. Так для типичного разрешения VGA (640×480), объем полноцветного изображения без сжатия составляет $640 \times 480 \times 3 = 921600$ байт (900 Кб). При ограниченном количестве цветов изображения (до 256) каждый пиксель описывается всего 8 битами (1 байт). Поэтому для представления изображения теперь необходимо только $640 \times 480 \times 1 = 307200$ байт (300 Кб), плюс $256 \times 3 = 768$ дополнительных байт для хранения палитры цветов (в случае 24-битного цвета RGB), что составляет примерно треть от первоначального размера. Меньшие палитры (4-бита 16 цветов, 2-бита 4 цвета) позволяют еще больше сокращать объем изображения (упаковывать пиксели). Сокращение может достигать 1/6 или 1/12 от первоначального объема. Очевидно, что это влечет за собой уменьшение точности цветопередачи. Хотя это приемлемо для маленьких изображений (иконки и пиктограммы интерфейсов программного обеспечения) или очень простой графики, для воспроизведения реалистических фотографий эта потеря цвета становится значительной проблемой. Существуют методы, позволяющие частично устранять данное явление. К ним относятся такие, как квантование цвета, сглаживание (antialiasing), дизеринг (dithering – подмешивание в первичный сигнал псевдослучайного шума со специально подобранным спектром), а также их сочетания, позволяющие приблизить качество цветопередачи индексированного 256-цветного изображения к оригиналу.

Набор цветов, который задаётся пиксельными значениями в файле, не всегда совпадает с тем, который может быть отображен на физическом устройстве вывода. Задача согласования набора цветов решается программой визуализации,

которая осуществляет преобразование цветов, заданных в файле, в цвета устройства вывода. Существует 2 варианта:

1) если количество цветов, заданных пиксельными значениями в файле, значительно меньше количества цветов, которое способно отобразить устройство вывода;

2) устройство вывода способно отобразить меньше цветов, чем записью в исходных данных.

Глубина цвета, или разрядность битового представления, описывает общее число градаций цвета (света или яркости), которые способно распознать сканирующее устройство. *Диапазон оптических плотностей* (оптический диапазон) определяет гладкость перехода между соседними тонами в оцифрованном изображении.

Оптическая плотность – характеристика обрабатываемого оригинала, которая вычисляется как десятичный логарифм отношения падающего светового потока к потоку, отраженному от непрозрачного сканируемого объекта (для прозрачных объектов, слайдов или фотографических негативов используется сила прошедшего света). Эта величина является численной характеристикой непрозрачности прозрачных оригиналов и отражающей способности непрозрачных объектов.

Предельные значения оптической плотности непрозрачных объектов равны 0 и 4. Совершенно белые непрозрачные объекты, которые отражают весь падающий световой поток, имеют минимальное значение этой величины. Идеально черные объекты и материалы, поглощающие весь попадающий на них свет, обладают максимальной оптической плотностью, равной 4.

Важнейшей характеристикой точечного изображения является его разрешение.

Разрешение – это количество точек (dot) или пикселей (pixel), приходящееся на единицу длины. Как правило, в качестве линейной единицы измерения используются дюймы (inch). Отсюда наименование этого параметра – dpi (dot per inch) или ppi (pixel per inch). Разрешение – логическая единица измерения. Она описывает плотность точек графического изображения. На логическом уровне описания ни сами пиксели, ни результирующее изображение не имеют физических размеров. Они обретают конкретную протяженность только при выводе на определенное техническое устройство – принтер, монитор, проектор и пр.

Трехмерные или 3D-изображения в отличие от плоских изображений характеризуются наличием дополнительного измерения – глубины. Фактически трехмерное пространство является собой совокупность двухмерных пространств.

Существует несколько моделей представления трехмерных изображений [23; 62]: полигональная графика, аналитическая графика, фрактальная графика и сплайновая графика.

Наиболее распространенной на сегодняшний день является *полигональная графика*. Она характеризуется довольно высокой скоростью обработки графических данных. Объекты полигональной графики задаются набором полигонов. *Полигон* – это плоский многоугольник. Простейшим вариантом являются треугольные полигоны, ибо, как известно, через любые три точки в пространстве можно провести плоскость. Каждый полигон задается набором точек. Лучше всего задавать набор точек в том порядке, в каком они расположены относительно внешней нормали полигона, так как в данном случае полностью решается проблема удаления нелицевых граней без дополнительных затрат при последующей обработке. Точ-

ка же задается тремя координатами – x , y , z . Таким образом, 3-мерный объект задается в виде массива или структуры.

Аналитическая графика заключается в том, что объекты задаются аналитически, т.е. формулами. Комбинируя различные формулы друг с другом, можно получить оригинальные объекты обтекаемой формы. Но вся сложность заключается в нахождении формулы требуемого объекта. Другой способ создания аналитических объектов – это создание тел вращения. Так, вращая круг вокруг некоторой оси, можно получить тор, а, вращая одновременно сильно вытянутый эллипс вокруг собственной и внешней осей, можно получить достаточно красивый рифленый тор.

Алгоритмы *фрактальной графики* могут создавать трехмерные изображения. Ключевое понятие любого фрактала – самоподобие. Объект называют самоподобным, когда увеличенные части объекта походят на сам объект и друг на друга.

Местность относится к «самоподобному» классу. Зазубренный край сломанного горного камня в ладони вашей руки имеет те же самые очертания, что и горный хребет на горизонте. Благодаря этому, мы можем использовать фракталы для генерирования поверхности местности, которая походит на саму себя, независимо от масштаба, в котором она отображена [49].

Чтобы смоделировать случайную поверхность, необходимо использовать двумерный массив значений высоты. Приписывая цвет к каждому значению высоты, можно сопоставить отображение высоты с изображением. После этого полученный массив обрабатывается специальным образом. При этом производится разбивка квадратов образованных координатами массива и в результате проведения определенного количества рекурсивных итераций квадраты разбиваются на

совокупность самоподобных квадратных полигонов. При этом уровень детализации напрямую зависит от количества проведенных циклов вычислений.

Историю *сплайновой графики* принято отсчитывать от момента появления первой работы Шенберга в 1946 году [99]. Сначала сплайны рассматривались как удобный инструмент в теории и практике приближения функций. Однако довольно скоро область их применения начала быстро расширяться, и обнаружилось, что существует множество сплайнов самых разных типов. Сплайны стали активно использоваться в численных методах, в системах автоматического проектирования и автоматизации научных исследований, во многих других областях человеческой деятельности и, конечно, в компьютерной графике.

Сплайном (от англ. Spline) называлась гибкая полоска стали, при помощи которой чертежники проводили через заданные точки плавные кривые. Подобный способ построения плавных обводов различных тел, таких как, например, корпус корабля, кузов автомобиля был довольно широко распространен в практике машиностроения. В результате форма тела задавалась при помощи набора очень точно изготовленных сечений – плазов. Появление компьютеров позволило перейти от плазово-шаблонного метода к более эффективному способу задания поверхности обтекаемого тела. В основе этого подхода к описанию поверхностей лежит использование сравнительно несложных формул, позволяющих восстанавливать облик изделия с необходимой точностью. Для большинства тел, встречающихся на практике, отыскание простых универсальных формул, которые описывали бы соответствующую поверхность глобально, являет собой непростую задачу. Это означает, что при решении задачи построения достаточно

произвольной поверхности обойтись небольшим количеством формул, как правило, не удастся. Вместе с тем аналитическое описание (описание посредством формул) внешних обводов изделия, то есть задание в трехмерном пространстве двумерной поверхности, должно быть достаточно экономным. Это особенно важно, когда речь идет об обработке изделий на станках с числовым программным управлением. Обычно поступают следующим образом: задают координаты сравнительно небольшого числа опорных точек, лежащих на искомой поверхности, а через эти точки проводят плавные поверхности. Именно так поступает конструктор при проектировании кузова автомобиля (ясно, что на этой стадии процесс проектирования сложного объекта содержит явную неформальную составляющую). На следующем шаге конструктор должен получить аналитическое представление для придуманных кривых или поверхностей. Данные примеры являются областью применения сплайнов.

1.4. Представление полноцветных изображений в цветовых пространствах.

Для использования цвета в различного рода технологиях необходимо иметь средства точного описания цветовых параметров. Точное описание цвета требуется при разработке новых аппаратных устройств фиксации и отображения графических данных, для создания программных комплексов обработки, при взаимодействии пользователя с каким-либо устройством.

Описание цвета в терминах и понятиях определенного цветового пространства называется *цветовой моделью* [23]. Каждый цветовой тон и оттенок можно представить в виде совокупности нескольких чисел – цветовых координат. Дан-

ный факт позволяет значительно упростить процесс обмена и обработки цветовой информации в информационно-телекоммуникационных системах.

Все известные цветовые модели в зависимости от их особенностей и области применения структурно можно разделить на 3 группы:

- 1) аппаратно-зависимые модели (применяются в устройствах ввода-вывода графической информации);
- 2) аппаратно-независимые (данные модели не связаны с конкретным устройством и описывают цвет в абстрактных колориметрических терминах);
- 3) интуитивные (строятся на основе субъективности восприятия цвета зрительным органом человека).

В технических средствах обработки графической информации наиболее распространены два типа цветных объектов - самосветящиеся, излучающие объекты (экраны ЭЛТ, плазменные панели, LED-матрицы) и несамосветящиеся объекты, отражающие или преломляющие световые потоки (бумажные оттиски, световые фильтры и т.д.).

По принципу действия, перечисленные цветовые модели можно условно разбить на три класса [62]:

- аддитивные (RGB), основанные на сложении цветов;
- субтрактивные (CMY, CMYK), основу которых составляет операция вычитания цветов (субтрактивный синтез);
- перцепционные (HSB, HLS, Lab, YCC), базирующиеся на особенностях восприятия.

Согласно общим физическим закономерностям, свойственным природе цвета, полноцветное изображение представляет собой комбинацию трех цветов. При использовании RGB цветового пространства формируются три плоскости: красного (R), зеленого (G) и синего (B). Другие цвета и оттенки могут

быть получены смешиванием определенного количества любого из этих трех основных цветов. Каждый из этих цветов обрабатывается независимо от других и для представления каждого из них выделяется столько же разрядов, сколько на представление полутонового изображения.

Аддитивный цвет получается, на основе законов Грассмана, путем соединения лучей света разных цветов. В основе этого явления лежит тот факт, что большинство цветов видимого спектра могут быть получены путем смешивания в различных пропорциях трех основных цветовых компонентов. Этими компонентами, которые в теории цвета иногда называются первичными цветами, являются красный (Red), зеленый (Green) и синий (Blue) цвета. При попарном смешивании первичных цветов образуются вторичные цвета: голубой (Cyan), пурпурный (Magenta) и желтый (Yellow). Следует отметить, что первичные и вторичные цвета относятся к базовым цветам (рис. 1.12).

Базовыми цветами называют цвета, с помощью которых можно получить практически весь спектр видимых цветов.

Аддитивные цвета широко применяются в системах освещения, видеосистемах, устройствах фотофиксации, видеорегистрации и др.

Используемые для построения RGB-модели первичные, или аддитивные, цвета имеют еще одно название. Иногда, чтобы подчеркнуть тот факт, что при добавлении света интенсивность цвета увеличивается, эту модель называют добавляющей.

Цветовое пространство модели RGB можно представить в виде куба в декартовой системе координат (рис 1.13).

Каждый цвет в данном кубе задается точкой и определяется как сумма трех цветовых координат (базовых цветов) красного, зеленого и синего. Главная диагональ представляет ахро-

матические (серые) цвета: черному цвету соответствует точка (0, 0, 0), а белому – точка (1,1,1). Нулевое значение соответствует отсутствию светимости цветовой координаты, единичное значение описывает ее максимальную интенсивность.

Модель RGB – простая цветовая схема, правила синтеза которой полностью согласуются с интуицией человека. Она отличается широким цветовым охватом и корректно описывает механизмы генерации цвета в приборах, излучающих свет.

В отличие от экрана монитора, воспроизведение цветов которого основано на излучении света, печатная страница может только отражать цвет. Поэтому RGB-модель в данном случае неприемлема. Вместо нее для описания печатных цветов используется модель CMY, базирующаяся на субтрактивных цветах (рис. 1.14).

Субтрактивные цвета в отличие от аддитивных цветов (той же RGB-модели) получаются вычитанием вторичных цветов из общего луча света. В этой системе белый цвет появляется как результат отсутствия всех цветов, тогда как их присутствие дает черный цвет.

Данная модель используется для описания цвета при получении изображений на устройствах, которые реализуют принцип поглощения цветов. В первую очередь она используется в устройствах, которые печатают на бумаге. Название данной модели состоит из названий основных субтрактивных цветов: голубого (Cyan), пурпурного (Magenta) и желтого (Yellow).

Для перекодировки цвета из модели CMY в RGB используется соотношение

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix}$$

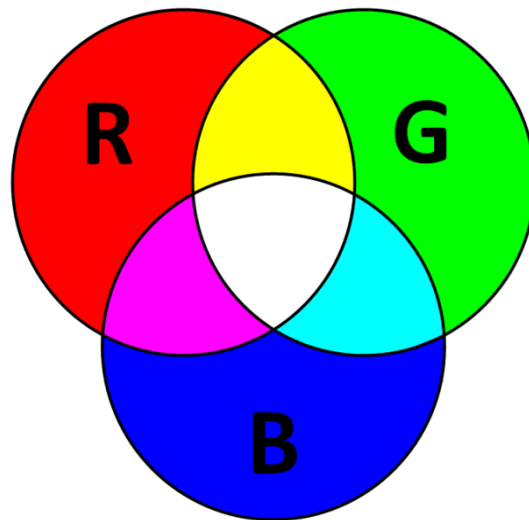


Рис.1.12. Образование цветов в аддитивной модели

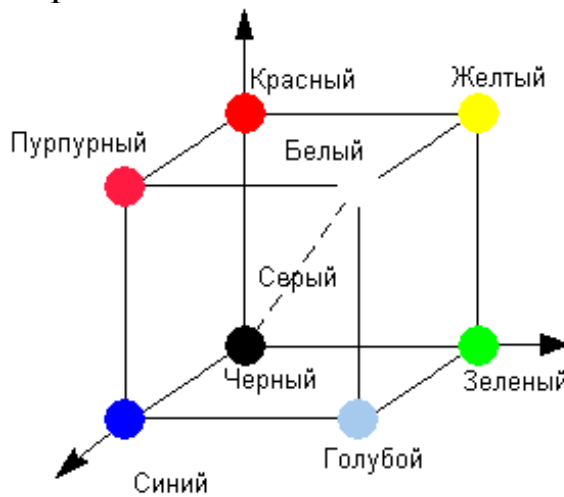


Рис.1.13. Представление модели RGB в виде координатного куба

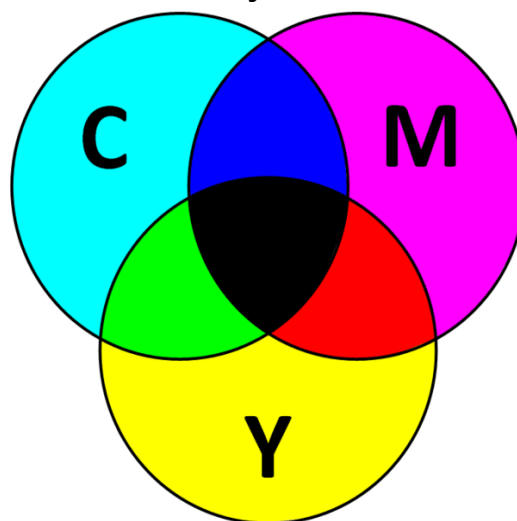


Рис.1.14. Образование цветов в субтрактивной модели

Здесь считается, что компоненты кодируются числами в диапазоне от 0 до 1. Для другого диапазона чисел можно записать соответствующее обратное соотношение.

Существуют две наиболее распространенные версии субтрактивной модели: СМУ и СМУК. Первая из них используется в том случае, если изображение или рисунок будут выводиться на черно-белом принтере, позволяющем заменять черный картридж на цветной (color upgrade). В ее основе лежит использование трех субтрактивных (вторичных) цветов: голубого (Cyan), пурпурного (Magenta) и желтого (Yellow). Теоретически при смешивании этих цветов на белой бумаге в равной пропорции получается черный цвет.

Однако в реальном технологическом процессе получение черного цвета путем смешивания трех основных цветов для бумаги неэффективно по трем причинам.

Невозможно произвести идеально чистые пурпурные, синие и желтые краски. Поэтому цвет получается не чисто черным, а грязно-коричневым.

На создание черного цвета с помощью модели СМУ тратится в три раза больше краски.

В силу перечисленных факторов при печати чистого черного цвета используется добавка дополнительной черной компоненты цвета. Эта технология приводит также к улучшению качества теней и серых оттенков. Интенсивность каждой из четырех компонент цвета может изменяться в диапазоне от 0 до 100 %.

В аббревиатуре модели СМУК используется буква «К» (последняя буква слова Black) для того, чтобы избежать путаницы, поскольку в английском языке с буквы «В» начинается не только слово Black (черный), но и слово Blue (синий).

Встречается еще один вариант трактовки использования этой буквы как аббревиатуры термина Key color (ключевой цвет).

В системе RGB световые потоки суммируются и результирующие цвета получаются яркими. В субтрактивной системе световые потоки вычитаются, производя более темные и менее насыщенные оттенки. Этим объясняется тот эффект, когда яркие и живые цвета картинки, представленной на экране монитора, часто становятся выцветшими и тусклыми после вывода на печать.

Если учитывать только номенклатуру технических устройств, то окажется, что модель CMYK менее распространена, чем модель RGB. Только печатные машины и некоторые типы принтеров высокого класса используют эту модель напрямую. Традиционно в этом ряду упоминают еще и барабанные сканеры, но внутренние сенсоры подобных устройств работают в системе RGB, а считанная с оригинала информация потом преобразуется в CMYK программным или аппаратным способом.

YUV и YIQ – еще одни аппаратно-ориентированные модели, используемые в телевидении и позволяющие сократить передаваемую полосу частот за счет использования психофизиологических особенностей зрения в коротковолновой области. Это модифицированные системы RGB, приспособленные для нужд телевидения.

В моделях YUV и YIQ телевизионный сигнал кодируется посредством трех координат: Y – сигнал яркости, одинаковый во всех моделях, и два сигнала, определяющих цвет пикселя – (U и V) или (I и Q), являющиеся цветоразностными сигналами. При этом зеленый цвет (G), принятый за базовый, отсутствует в составе телевизионного сигнала и восстанавливается в телевизионном приемнике вместе с крас-

ным (R) и синим (B) цветом на основе принятых сигналов. Эти модели позволяют принимать сигналы не только цветного, но и черно-белого телевидения.

В Европе телевидение основывается на модели YUV и использует два способа кодирования сигналов модели – системы PAL и SECAM.

Для расчета координат этой модели по значениям RGB используются следующие выражения:

– модель YUV системы SECAM:

$$Y = 0,299 \times R + 0,587 \times G + 0,114 \times B,$$

$$U = 1,5 (B - Y),$$

$$V = -1,9 (R - Y);$$

– модель YUV системы PAL:

$$Y = 0,299 \times R + 0,587 \times G + 0,114 \times B,$$

$$U = 1,493 (B - Y),$$

$$V = -1,877 (R - Y).$$

В США, Канаде и Японии для передачи цветного телевидения используется система NTSC. Модель описания цветов в этой системе называется YIQ.

Для полноцветного изображения компонент Y, называемый сигналом яркости (luminance), принимает значения между минимальным и максимальным уровнями сигналов R, G, B.

В 1931 г. Международный комитет CIE утвердил несколько стандартных цветовых пространств, описывающих видимый спектр. При помощи этих моделей можно сравнивать между собой цветовые пространства отдельных наблюдателей и устройств на основе единых стандартов.

В предложенных Комитетом трех компонентных моделях для определения цвета используются три независимые цветовые координаты. Модели CIE обладают свойством ап-

паратной независимости и широким цветовым охватом. Диапазон цветов, которые можно определить в этих системах, не ограничивается изобразительными возможностями технического устройства или визуальным опытом определенного наблюдателя.

За основное цветовое пространство, разработанное в CIE, принято пространство XYZ. Оно построено на основе восприятия цвета некоторым стандартным наблюдателем. Это гипотетический персонаж с усредненными зрительными характеристиками, созданными по результатам многочисленных экспериментов с реальными наблюдателями.

Для людей, профессионально работающих с цифровыми изображениями, основным инструментом индикации и воспроизведения цвета служит глаз. Этот естественный «инструмент» обладает цветовым охватом, намного превышающим возможности любого технического устройства, будь то сканер, принтер или фотоэкспонирующее устройство вывода на пленку.

Используемые для описания технических устройств цветовые системы RGB и CMYK являются аппаратно-зависимыми. Это значит, что воспроизводимый или создаваемый с помощью них цвет определяется не только составляющими модели, но и зависит от характеристик устройства вывода. Для устранения аппаратной зависимости был разработан ряд так называемых *перцепционных* (иначе – интуитивных) цветовых моделей. В их основу заложено раздельное определение яркости и цветности. Такой подход обеспечивает ряд преимуществ:

- позволяет обращаться с цветом на интуитивно понятном уровне;

– значительно упрощает проблему согласования цветов, поскольку после установки значения яркости можно заняться настройкой цвета.

Прототипом всех цветовых моделей, использующих концепцию разделения яркости и цветности, является HSV-модель. К другим подобным системам относятся HSI, HSB, HSL и YUV. Общим для них является то, что цвет задается не в виде смеси трех основных цветов – красного, синего и зеленого, а определяется путем указания двух компонентов: цветности (цветового тона и насыщенности) и яркости.

Модель HSB (Hue – цветовой тон, Saturation – насыщенность, Brightness – яркость) или ее ближайший аналог HSL представлены в большинстве современных графических пакетов. Из всех используемых в настоящее время моделей эта модель наиболее точно соответствует способу восприятия цветов человеческим глазом. Она позволяет описывать цвета интуитивно ясным способом.

В HSB-модели все цвета определяются с помощью комбинации трех базовых параметров (рис. 1.15): цветовой тон (H), насыщенность (S), яркость (B).

Цветовым тоном, или оттенком (Hue), называется спектрально-чистый цвет определенной длины волны, например чистый красный или чистый зеленый.

Яркость характеризует интенсивность, энергию цвета. Изменение яркости можно представить как смешение чистого тона и черного цвета. Большое содержание черного делает цвет затененным, неинтенсивным. С уменьшением процента черного освещенность увеличивается. Солнечный луч обладает высокой яркостью света, свечение, исходящее от светлячка – очень низкой яркостью. Черный цвет имеет нулевую яркость, а белый – предельную.

Насыщенность (Saturation) описывает чистоту цвета. Один и тот же тон может быть тусклым или насыщенным. Изменение насыщенности можно представить как разбавление чистого цвета белым или серым. Чем больше содержание белого, тем более блеклым становится цвет. Все цвета естественного происхождения имеют низкую насыщенность, поэтому чистые тона выглядят слишком яркими, ненатуральными.

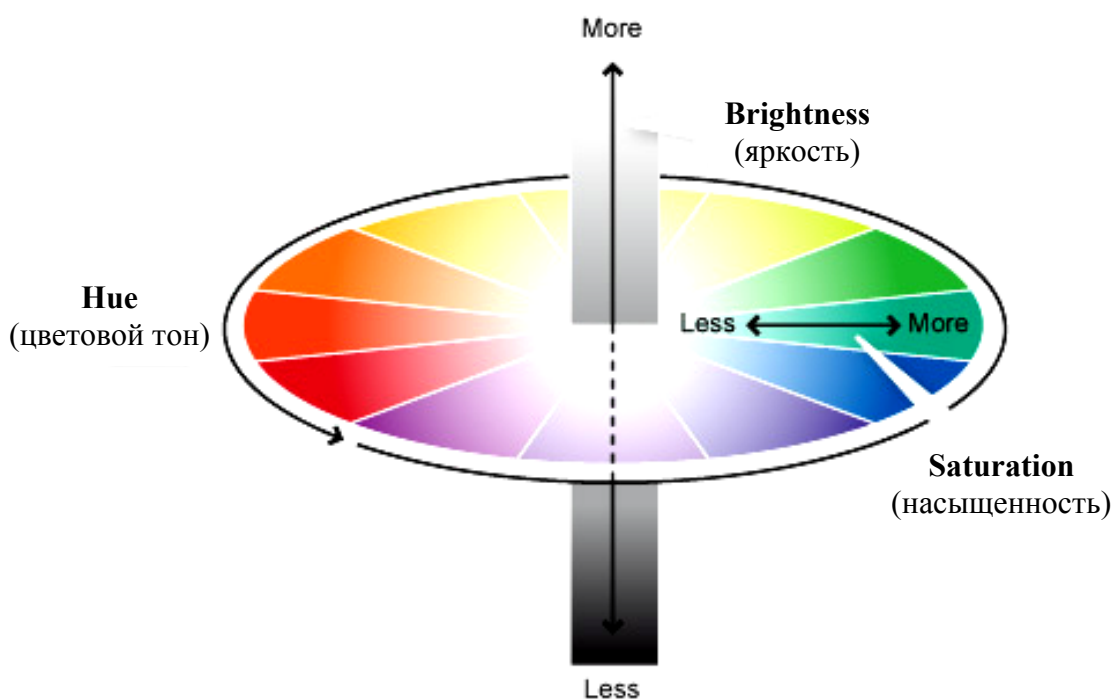


Рис.1.15. Цветовая модель HSB

Кроме модели HSB существует несколько моделей, в которых яркостная и цветовая характеристики рассматриваются отдельно, например HSI, HLS. Во всех этих моделях цвет задается не как смешение трех цветов, а по значениям цветового тона, насыщенности и интенсивности. В модели HSI используется тон (Hue), насыщенность (Saturation) и интенсивность (Intensity), в модели HLS – тон (Hue), насыщенность (Saturation) и светлота (Lightness).

Резюме

На основе исследований, проведенных в первом разделе можно сделать ряд выводов. Первым можно считать то, что характерные особенности инфраструктуры крупных производств (в области транспорта, нефтегазовой промышленности, энергетической области, в области предоставления населению телекоммуникационных и мультимедийных услуг) заключаются в: территориальной распределенности организационных и технологических процессов, обработке и передаче больших объемов видеоинформации, автоматизации функций относительно обработки, анализа и принятия решений, с сохранением важной роли человека, повышении требований относительно оперативности и достоверности получаемой информации, использовании различных информационных и телекоммуникационных технологий для организации функционирования.

Также можно прийти к заключению, что существует зависимость эффективности решения прикладных задач от обеспечения обработки и передачи данных, по существующим телекоммуникационным системам на большие расстояния с заданным уровнем достоверности за требуемые временные сроки. Вместе с тем обеспечение заданных требований по уровню информационного обеспечения приводит к росту объемов оцифрованных изображений.

Анализ возможностей существующих телекоммуникационных систем позволяет обнаружить наличие противоречия, состоящего с одной стороны в необходимости своевременного доведения видеоданных больших объемов, а с другой стороны ограниченными возможностями вычислительных средств и техническими возможностями телекоммуникационных технологий.

РАЗДЕЛ 2

МЕТОДЫ КОМПАКТНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ВИДЕОКАДРОВ

2.1. Классификация алгоритмов сокращения объёмов цифровых изображений

Изображениям в цифровой форме присуща избыточность. Различают следующие виды избыточности изображений [5; 19; 20; 28; 31; 42; 65; 72; 75]:

1) *психовизуальная избыточность* – обусловлена особенностями зрительной системы человека, состоящей в ее нечувствительности к некоторым видам искажений изображений [28; 31];

2) *семантическая избыточность* – определяется смысловым содержанием изображения [31; 59; 65; 80];

3) *структурная избыточность* – заключается в возможности выделить и описать математически целостные структурные единицы изображения, а также взаимосвязями между ними [5; 19; 44; 51];

4) *комбинаторная избыточность* – состоит в возможности выявить ограничения, обеспечивающие снижение количества разрешенных вариантов реализации фрагментов изображения [6; 65];

5) *вероятностно-статистическая избыточность* – вызвана наличием закономерностей в законах распределения вероятностей появления элементов изображений, корреляцией

между элементами и фрагментами изображений и статистической зависимостью [29; 31; 37 – 39; 48; 50].

Для сокращения избыточности источников изображений применяются различные методы сжатия, которые разделяются на два основных класса: *методы с искажением качества реконструированных изображений* (с потерей информации) и *методы с информационной идентичностью* (без потери информации) (рис.2.1):

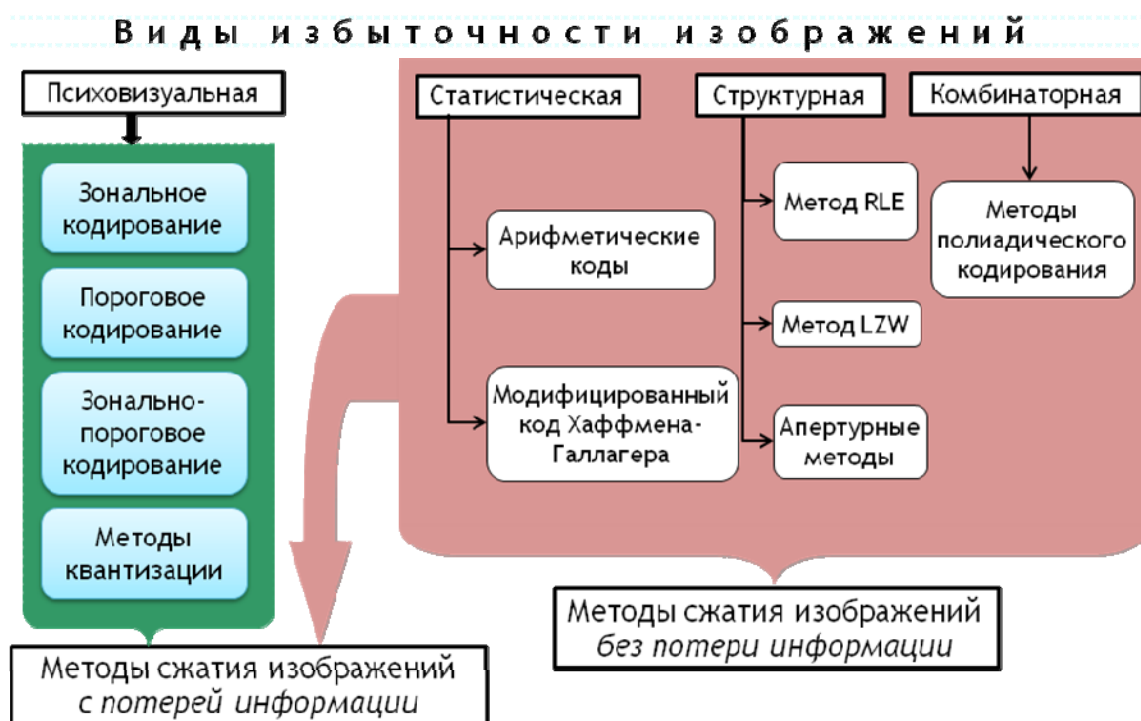


Рис. 2.1. Классификация методов сжатия изображений

К методам первого класса относятся:

- комбинированный метод сжатия [65] (КМС);
- зонально-пороговое кодирование компонент трансформант ДКП (ЗПК) [74];
- апертурные методы [57; 65];
- фрактальные методы сжатия (ФМС) [3; 54; 87];

– методы сжатия, базирующиеся на волновых алгоритмах (Wavelet-системы) [31; 75].

Сжатие изображений методами данного класса достигается в основном за счет сокращения психовизуальной избыточности.

Второй класс методов сжатия составляют:

1. Методы сокращающие вероятностно-статистическую избыточность: адаптивный код Хаффмана – Галлагера [29; 65; 77]; неравномерные побуквенные коды [37; 38]; арифметические коды [28; 31; 50; 77].

2. Методы сокращающие структурную избыточность: кодирование длины серии (КДС) [19; 28; 53; 65]; модифицированные методы длин серий (ММДС) [44]; методы LZW [28; 39; 51] и их модификации [72; 77].

3. Методы исключаящие комбинаторную избыточность: методы полиадического кодирования (МПК) [6; 19; 42; 44; 68].

2.2. Методы сжатия изображений с информационной идентичностью

Кодирования длин серий (RLE)

Одним из первых и наиболее известным алгоритмом сжатия информации является метод кодирования длин серий (Run Length Encoding – RLE) [28; 72]. Он является также наиболее простым в реализации и характеризуется симметричностью кодирования-декодирования. Суть данного подхода состоит в замене цепочек или серий повторяющихся байтов или их последовательностей на один кодирующий байт и счетчик числа их повторений. Проблема всех аналогичных методов заключается лишь в определении способа, при помощи которого распаковывающий алгоритм мог бы отличить в результирующем

потоке байтов кодированную серию от других – некодированных последовательностей байтов.

Решение проблемы достигается обычно простановкой меток вначале кодированных цепочек. Такими метками могут быть, например, характерные значения битов в первом байте кодированной серии, значения первого байта кодированной серии и т.п. Лучший, средний и худший коэффициенты сжатия – $1/32$, $1/2$, $2/1$.

Данные методы, как правило, достаточно эффективны для сжатия растровых графических изображений (BMP, PCX, TIFF), т.к. последние содержат достаточно длинных серий повторяющихся последовательностей байтов.

Недостатком метода RLE является достаточно низкая степень сжатия или стоимость кодирования файлов с малым числом серий и, что еще хуже – с малым числом повторяющихся байтов в сериях. К положительным сторонам алгоритма, пожалуй, можно отнести только то, что он не требует дополнительной памяти при работе, и быстро выполняется. Интересная особенность группового кодирования в формате PCX заключается в том, что степень архивации для некоторых изображений может быть существенно повышена всего лишь за счет изменения порядка цветов в палитре изображений.

Метод Хаффмана

Еще одним из первых алгоритмов эффективного кодирования информации является метод Хаффмана. Он был предложен Д.А. Хаффманом в 1952 году. Идея алгоритма состоит в следующем: зная вероятности вхождения символов в сообщение, можно описать процедуру построения кодов переменной длины, состоящих из целого количества битов. Символам с большей вероятностью присваиваются более короткие коды.

Коды Хаффмана имеют уникальный префикс, что и позволяет однозначно их декодировать, несмотря на их переменную длину.

Классический алгоритм Хаффмана на входе получает таблицу частот встречаемости символов в сообщении. Далее на основании этой таблицы строится дерево кодирования Хаффмана (H-дерево). Алгоритм построения H-дерева прост и элегантен.

1. Символы входного алфавита образуют список свободных узлов. Каждый лист имеет вес, который может быть равен либо вероятности, либо количеству вхождений символа в сжимаемое сообщение.

2. Выбираются два свободных узла дерева с наименьшими весами.

3. Создается их родитель с весом, равным их суммарному весу.

4. Родитель добавляется в список свободных узлов, а двое его детей удаляются из этого списка.

5. Одной дуге, выходящей из родителя, ставится в соответствие бит 1, другой — бит 0.

6. Шаги, начиная со второго, повторяются до тех пор, пока в списке свободных узлов не останется только один свободный узел. Он и будет считаться корнем дерева.

Классический алгоритм Хаффмана имеет один существенный недостаток. Для восстановления содержимого сжатого сообщения декодер должен знать таблицу частот, которой пользовался кодер. Следовательно, длина сжатого сообщения увеличивается на длину таблицы частот, которая должна посылаться впереди данных, что может свести на нет все усилия по сжатию сообщения. Кроме того, необходимость наличия полной частотной статистики перед началом собственно ко-

дирования требует двух проходов по сообщению: одного для построения модели сообщения (таблицы частот и H-дерева), другого для собственно кодирования. [51].

Применительно к сжатию изображений в основе такого метода лежит учет частоты появления одинаковых байт в изображении. При этом пикселям исходного изображения, которые встречаются большее число раз, сопоставляется код меньшей длины, а встречающимся редко – код большей длины (т.е. формируется префиксный код переменной длины). Для сбора статистики требуется два прохода по файлу – один для просмотра и сбора статистической информации, второй – для кодирования [28]. Коэффициенты сжатия: $1/8$, $2/3$, 1 .

При использовании такого метода требуется запись в файл и таблицы соответствия кодируемых пикселей и кодирующих цепочек. Такое кодирование применяется в качестве последнего этапа архивации в JPEG. Методы Хаффмана дают достаточно высокую скорость и умеренно хорошее качество сжатия. Основным недостатком данного метода является зависимость степени сжатия от близости вероятностей символов к величине 2-м, поскольку каждый символ кодируется целым числом бит. Так, при кодировании данных с двухсимвольным алфавитом сжатие всегда отсутствует, т.к. несмотря на различные вероятности появления символов во входном потоке алгоритм фактически сводит их до $1/2$. Такой алгоритм реализован в формате TIFF.

Метод Хаффмана является достаточно простым и одновременно эффективным, однако, он порождает наилучшие коды переменной длины (коды, у которых средняя длина равна энтропии алфавита) только когда вероятности символов алфавита являются степенями числа 2, то есть равны $1/2$, $1/4$, $1/8$ и т.п. Это связано с тем, что метод Хаффмана присваивает каж-

дому символу алфавита код с целым числом битов. Теория информации предсказывает, что при вероятности символа, скажем, 0.4, ему в идеале следует присвоить код длины 1.32 бита, поскольку $-\log_2 0,4 \approx 1,32$. А метод Хаффмана присвоит этому символу код длины 1 или 2 бита [72].

Алгоритм Зива-Лемпела (LZ - compression)

Название алгоритма происходит от первых букв фамилий его создателей. Причем принято LZ-алгоритм расшифровывать никак иначе как Зива-Лемпела. Считается, что именно Якоб Зив внес наиболее весомый вклад в разработку данного метода. И хотя Зив и Лемпел на самом деле занимались теоретическими исследованиями проблемы измерения «сложности» строк именно их работы стали основоположными для разработки метода LZ и огромного множества его последующих модификаций и усовершенствований. До сих пор самые популярные и распространенные системы сжатия информации используют элементы LZ-компрессии.

Суть данного алгоритма состоит в следующем: упаковщик постоянно хранит некоторое количество последних обработанных символов в буфере. По мере обработки входного потока вновь поступившие символы попадают в конец буфера, сдвигая предшествующие символы и вытесняя самые старые. Размеры этого буфера, называемого также скользящим словарем, варьируются в разных реализациях кодирующих систем. Затем, после построения хеш-таблиц, выделяют (путем поиска в словаре) самую длинную начальную подстроку входного потока, совпадающую с одной из подстрок в словаре, и выдают на выход пару (length, distance), где length – длина найденной в словаре подстроки, а distance – расстояние от нее до входной подстроки (то есть фактически индекс под-

строки в буфере, вычтенный из его размера). Если такая подстрока не найдена, в выходной поток просто копируется очередной символ входного потока [28].

Существующее большое семейство LZ-подобных алгоритмов, различающихся, например, методом поиска повторяющихся цепочек. Один из достаточно простых вариантов этого алгоритма, например, предполагает, что во входном потоке идет либо пара <счетчик, смещение относительно текущей позиции>, либо просто < счетчик> “пропускаемых” байт и сами значения байтов.

Данный алгоритм является несимметричным по времени, поскольку требует полного перебора буфера при поиске одинаковых подстрок.

К достоинствам LZ можно отнести чрезвычайную простоту алгоритма декомпрессии.

Алгоритм LZW (Зива-Лемпела-Уолша)

К особенностям данного алгоритма можно отнести высокую скорость обработки как при кодировании, так и при декодировании, весьма скромные требования к памяти и простую аппаратную реализацию. Из недостатков можно выделить недостаточно высокий коэффициент компрессии. Алгоритм преобразует поток символов на входе в поток индексов ячеек словаря на выходе. Существует довольно большое семейство LZW – подобных алгоритмов, различающихся, например, методом поиска повторяющихся цепочек [72].

Коэффициенты сжатия: $1/1000$, $1/4$, $7/5$. Коэффициент $1/1000$ достигается только на одноцветных изображениях размером больше 4 Мб. Ситуация, когда алгоритм увеличивает изображение, встречается крайне редко. Сжатие обеспечивается за счет одинаковых подцепочек в потоке. Алго-

ритм является почти симметричным, при условии оптимальной реализации операции поиска строки в таблице.

LZW универсален – именно его варианты используются в обычных архиваторах. Он реализован в форматах GIF, TIFF и TGA [28; 72; 74].

Алгоритм JBIG

Алгоритм разработан группой экспертов ISO (Joint Bi-level Experts Group) специально для сжатия однобитных черно-белых изображений (например, для факсов или отсканированных документов). В принципе может применяться и к 2-х, и к 4-х битовым картинкам. При этом алгоритм разбивает их на отдельные битовые плоскости. JBIG позволяет управлять такими параметрами, как порядок разбиения изображения на битовые плоскости, ширина полос в изображении, уровни масштабирования. Последняя возможность позволяет легко ориентироваться в базе больших по размерам изображений, просматривая сначала их уменьшенные копии. Настраивая эти параметры, можно использовать интересный эффект при получении изображения по сети или по любому другому каналу, пропускная способность которого мала по сравнению с возможностями процессора. Распаковываться изображение на экране будет постепенно, как бы медленно «проявляясь». При этом человек начинает анализировать картинку задолго до конца процесса разархивации. Алгоритм построен на базе Q-кодировщика, патентом на который владеет IBM. Q-кодер также, как и алгоритм Хаффмана, использует для чаще появляющихся символов короткие цепочки, а для реже появляющихся длинные. Однако, в отличие от него, в алгоритме используются и последовательности символов. Характер-

ной особенностью JBIG является резкое снижение степени сжатия при повышении уровня шумов исходного изображения [28; 72].

Алгоритм Lossless JPEG

Этот алгоритм разработан группой экспертов в области фотографии (Joint Photographic Expert Group). В отличие от JBIG, Lossless JPEG ориентирован на полноцветные 24-битные изображения [28; 31].

Стандарт сжатия изображений JPEG включает два способа сжатия: первый предназначен для сжатия без потерь, второй – сжатия с потерей качества. Метод сжатия без потерь, используемый в стандарте lossless JPEG основан на методе разностного (дифференциального) кодирования. Основная идея дифференциального кодирования состоит в следующем. Обычно изображения характеризуются сильной корреляцией между точками изображения. Этот факт учитывается при разностном кодировании, а именно, вместо сжатия последовательности точек изображения x_1, x_2, \dots, x_N , сжатию подвергается последовательность разностей $y_i = x_i - x_{i-1}, i = 1, 2, \dots, N, x_0 = 0$. Числа y_i называют ошибками предсказания x_i . В стандарте lossless JPEG предусмотрено формирование ошибок предсказания с использованием предыдущих закодированных точек в текущей или в предыдущей строке. Lossless JPEG рекомендуется применять в тех приложениях, где необходимо побитовое соответствие исходного и разархивированного изображений. [28; 74]

2.3. Методы сжатия изображений с искажением качества реконструированных изображений

Метод усеченного блочного кодирования

Основная идея метода усеченного блочного кодирования (УБК) заключается в том, что изображение в процессе обработки разбивается на небольшие прямоугольные блоки одного размера. Данный метод характеризуется возможностью подстраивать параметры кодирования не под некоторую усредненную характеристику всего изображения, а под локальные особенности в пределах каждого блока. Это позволяет сохранить мелкие детали изображений. Метод не приводит к размыванию границ, что характерно для некоторых других алгоритмов. Метод УБК сопоставим с большинством других методов по эффективности сжатия данных и по объему вычислений, требуемых для кодирования, но не имеет конкурентов по простоте декодирования.

Базовый алгоритм УБК строится следующим образом [72]. Изображение, представленное $M \times N$ – матрицей $\|b_{ij}\|$ яркостей пикселей, разбивается на небольшие прямоугольные блоки $m \times n$ элементов. Каждый такой блок обрабатывается независимо от других, поэтому опишем алгоритм обработки одного блока.

Обработка блока начинается с вычисления порога и двух уровней квантования, затем проводится квантование блока на два уровня, после чего следует упаковка проквантованного блока. Для определения уровней квантования сначала вычисляются два первых выборочных момента – среднее значение

$$C = \frac{1}{m \times n} \sum_i \sum_j b_{ij}, \text{ и средний квадрат } E = \frac{1}{m \times n} \sum_i \sum_j b_{ij}^2 \text{ (где сум-}$$

мируются элементы изображения в пределах блока) и дисперсия $\sigma^2 = E - c^2$.

Пороговая величина квантователя d полагается равной среднему C .

Верхний a и нижний b уровни квантования вычисляются по следующим формулам: $a = C - \sigma\sqrt{q/(p-q)}$, $b = C + \sigma\sqrt{(p-q)/q}$, где $p = m \times n$ – число элементов блока, q – число элементов, превышающих порог d .

Квантование проводится по правилу: $S_{ij} = \begin{cases} a, \text{ если } b_{ij} < d \\ b, \text{ если } b_{ij} \geq d \end{cases}$,

где S_{ij} – элементы изображения после квантования.

После квантования получается блок, содержащий только уровни a и b .

Нетрудно показать, что среднее значение и средний квадрат исходного и проквантованного блоков совпадают. Практически для удобства последующей упаковки вместо a записывается нуль, вместо b – единица. Уровни a и b записываются отдельно. Упаковка состоит в том, что блок, содержащий только нули и единицы, интерпретируется как двоичное число, имеющее $m \times n$ разрядов.

Восстановление закодированного изображения также проводится поблочно и состоит в распаковке и обратной подстановке. Степень сжатия непосредственно зависит от размеров блока. Наиболее удовлетворительные результаты, как по степени сжатия, так и по качеству восстановленного изображения можно получить при использовании блоков размером 4×4 [28; 72].

Описанный способ определения порога и уровней квантования не является единственным. Существует ряд других критериев. Важно, чтобы критерий соответствовал целям по-

следующей обработки изображения и ее конкретным особенностям [74].

Сжатие по стандарту JPEG

JPEG является одним из наиболее распространенных и относительно мощных алгоритмов. Он представляет собой метод компрессии изображений, реализуемый различными способами [31; 72]. Работает он как на черно-белых, так и на полноцветных изображениях.

Стандарт JPEG (Joint Photographic Experts Group – Объединенная экспертная группа по фотографии) – формат хранения фотографических изображений, отличающийся хорошим качеством восстановленного изображения. Он определяет три различных режима кодирования: *режим последовательного кодирования с потерями*, основанный на ДКП и подходящий для большинства применений; *расширенный режим кодирования*, используемый для большего сжатия, для более высокой точности, или для постепенного воспроизведения; *режим кодирования без потерь*, гарантирующий точное восстановление информации после сжатия [31]. Процесс сжатия изображения JPEG достаточно сложен и часто для достижения приемлемой производительности требует специальной аппаратуры. Схема процедуры сжатия изображений по стандарту JPEG приведена на рис. 2.2.

Алгоритм можно разбить на несколько этапов:

1. Проводится преобразование изображения из цветового пространства RGB в цветовое пространство $YCrCb$ (иногда называют YUV). В нем Y – яркость, а Cr , Cb – компоненты, отвечающие за цвет (хроматический красный и хроматический синий). За счет того, что человеческий глаз менее чувствителен к цвету, нежели к яркости, появляется возможность архивиро-

вать массивы для Cr и Cb компонент с большими потерями и, соответственно большими степенями сжатия.

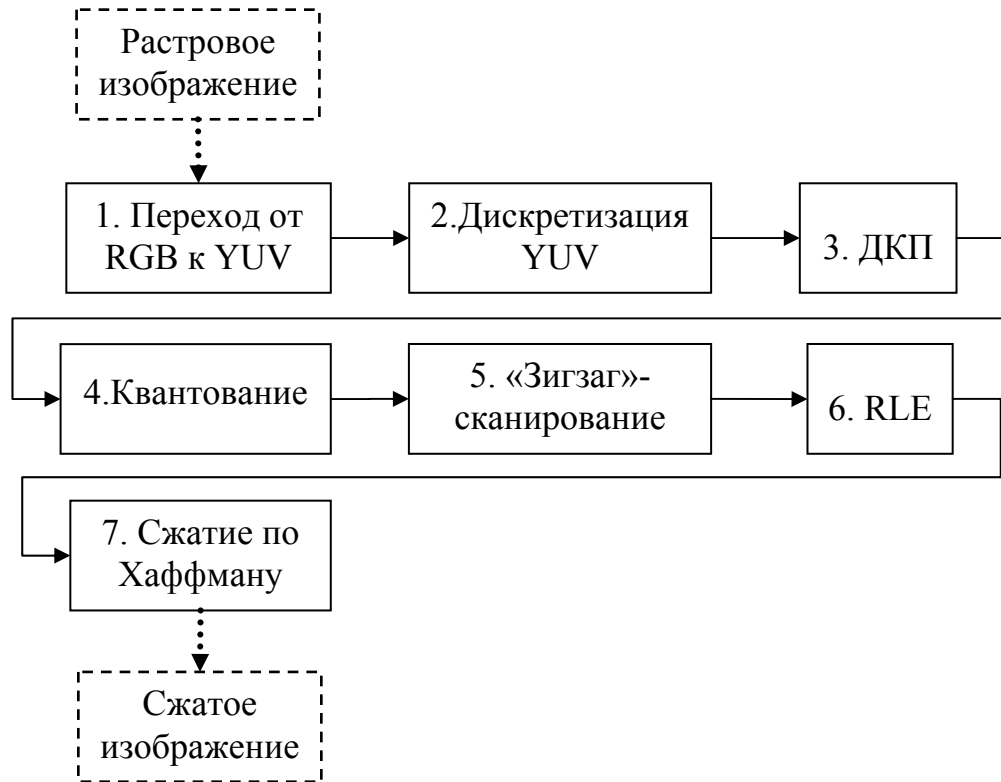


Рис. 2.2. Основные этапы алгоритма сжатия по стандарту JPEG

Упрощенно преобразование цвета из цветового пространства RGB в цветовое пространство $YCrCb$ можно представить при помощи выражения:

$$\begin{vmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.5 & -0.4187 & -0.0813 \\ 0.1687 & -0.3313 & 0.5 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} R \\ G \\ B \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ 128 \\ 128 \end{vmatrix}$$

2. Разбивается начальное изображение на матрицы 8×8 . Формируется из каждой три рабочие матрицы ДКП – по 8 бит отдельно для каждого компонента. При больших степенях сжатия этот шаг может проводится немного сложнее. Изображение делится по компоненте Y – как и в первом случае, а для

компонент C_r и C_b матрицы набираются через строку через столбик. Следовательно, из матрицы размером 16×16 выходит только одна рабочая матрица ДКП. При этом теряется $3/4$ полезной информации об цветовых составляющих изображения и получаем сразу сжатие в два раза.

3. ДКП при $n = 8$ можно представить при помощи следующего выражения:

$$Yq[u, v] = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^7 \sum_{j=0}^7 C(i, u) \times C(j, v) \times y[i, j],$$

$$\text{где } C(i, u) = A(u) \times \cos\left(\frac{(2i+1)u\pi}{2-n}\right); \quad A(u) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, u \equiv 0 \\ 1, u \neq 0 \end{cases}.$$

Применим ДКП для каждой рабочей матрицы. При этом получаем матрицу, в которой коэффициенты в левом верхнем угле соответствуют низкочастотной составляющей изображения, а в правом верхнем – высокочастотной. Плавная смена цвета соответствует низкочастотной составляющей, а резкие скачки – низкочастотной.

4. Делим рабочую матрицу на матрицу квантования поэлементно. Для каждой компоненты (Y, u и v) задается своя матрица квантования $q[u, v]$ (МК)

$$Yq[u, v] = \text{IntegerRound}\left(\frac{Y[u, v]}{q[u, v]}\right).$$

На этом этапе проводится управление степенью сжатия, и происходят наибольшие потери. Выбирая МК с большими коэффициентами, получаем больше нулей и, поэтому большую степень сжатия.

5. Проводится перевод матрицы 8×8 в 64-элементный вектор при помощи «зигзаг»-сканирования (рис. 2.3), иначе берутся элементы с индексами $(0,0), (0,1), (1,0), (2,0) \dots$

$a_{0.0}$	$a_{0.1}$	$a_{0.2}$	$a_{0.3}$	$a_{0.4}$	$a_{0.5}$	$a_{0.6}$
$a_{1.0}$	$a_{1.1}$	$a_{1.2}$	$a_{1.3}$	$a_{1.4}$	$a_{1.5}$	$a_{1.6}$
$a_{2.0}$	$a_{2.1}$	$a_{2.2}$	$a_{2.3}$			
$a_{3.0}$	$a_{3.1}$	$a_{3.2}$				
$a_{4.0}$	$a_{4.1}$					
$a_{5.0}$	$a_{5.1}$					
$a_{6.0}$	$a_{6.1}$					

Рис. 2.3. «Зигзаг» сканирование

6. Осуществляется свертка вектора при помощи алгоритма группового кодирования. При этом получаются пары типа {пропустить; число}, где «пропустить» является счетчиком нулей, которые пропускаем, а «число» – значение, которое необходимо поставить в следующую клеточку. Так, вектор 42 3 0 0 0 -2 0 0 0 0 1 ... буде свернут в пары (0,42) (0,3) (3, -2) (4,1)

7. Пары, которые получились из кодирования сворачиваются по Хаффману с фиксированной таблицей.

К недостаткам данного метода можно отнести то, что часто горизонтальные и вертикальные линии на дисплее не видны и могут проявляться только при печати в виде муара. Он возникает при наложении смещенного растра печати на горизонтальные и вертикальные линии изображения. Поэтому JPEG не рекомендуется активно использовать в полиграфии, при этом задавая высокие коэффициенты матрицы квантования. А также при увеличении степени сжатия изображения распадается на отдельные блоки (8×8).

Метод волнового сжатия (Wavelet Image Compression)

Под wavelet-преобразованием подразумевают множество базисных функций, которые формируют компактное описание видеосигнала. Анализ изображений, построенных на таких базисах, осуществляется по двум переменным – масштабу и сдвигу [74]. Это позволяет разделить крупные и мелкие детали изображений, одновременно локализуя их на временной шкале.

Таким образом, учитывается важное для практики обстоятельство: протяженные объекты анализируемых данных лежат в низкочастотной области спектра, а короткие – в высокочастотной. Особенностью wavelet-преобразования является возможность сжатия и восстановления видеоинформации даже для слабоконтрастных изображений.

Позитивной стороной применения этого преобразования является возможность представлять быстро изменяющиеся сигналы в компактной форме. Подобно широко используемому быстрому преобразованию Фурье (БПФ), wavelet-преобразование (DWT) обратимо и может служить инструментом анализа характеристик сигналов (спектральный анализ и др.). В отличие от БПФ (где базисными функциями служат синусы и косинусы) wavelet-преобразования формируют родительские функции более сложной формы. Их исходный набор обеспечивает получение бесконечного числа новых форм функций. Поскольку wavelet-функции ограничены в пространстве, с их помощью можно локализовать пространственный объект с высокой степенью точности [22].

Непрерывный вейвлет-анализ позволяет получить большее количество информации о сигнале, но вместе с тем требует много вычислений. Действия, по вычислительным затра-

там эквивалентные преобразованию Фурье, выполняются для каждого элемента последовательности.

Фрактальное сжатие изображений

Идея алгоритма базируется на главном и основополагающем свойстве фракталов – самоподобности. При анализе изображения и подготовке его к сжатию в классических алгоритмах не проводится учет особенностей структуры, характерные участки и т.д. Именно учет специфики изображений лежит в основе фрактального метода, который предложил в 1988 году Бенуа Мандельброт [49].

Фрактал – это структура, которую можно выделить при анализе изображения, и обладающая схожей формой независимо от ее размеров.

Например, при помощи фракталов можно воспроизвести схематическое изображение кровеносной системы человека или структуру кроны деревьев. Изображение в терминах фрактального подхода есть суперпозиция самоподобных элементов.

Основу фрактального подхода составляет постулат о том, что изображения реального мира имеют аффинную избыточность [28]. Иначе говоря, существует набор аффинных коэффициентов, описывающих вращение, сжатие, расширение, искажение формы, сдвиг объектов изображения.

В начале 80-х годов Майкл Барнсли выдвинул идею получения заранее заданного изображения как аттрактора хаотического процесса. Барнсли пытался ответить на вопрос: возможно ли для данного изображения построить хаотическую систему, которая будет являться для него странным аттрактором.

Он использовал систему итерируемых функций (Iterated Function System – IFS).

Наиболее распространённым примером фрактального изображения, сгенерированного с помощью IFS является изображение папоротника (рис. 2.4), использованное для создания данного изображения, состоит из 4-х аффинных преобразований. Каждое преобразование кодируется считанными байтами, хотя исходное изображение может быть любого размера. Таким образом, можно заключить, что фрактальная компрессия – это поиск самоподобных областей и определение для них параметров аффинных преобразований.

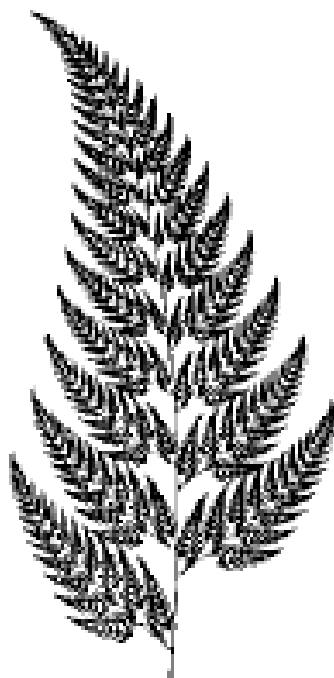


Рис. 2.4. Изображение папоротника, сгенерированного при помощи IFS

Согласно гипотезы, которую выдвинул Бенуа Мандельброт в своем труде «Фрактальная геометрия природы» все объекты живой и неживой природы в структурно построены на основе принципа самоподобности. Исходя из этого, можно сделать предположение, что фрактальные методы сжатия являются наиболее перспективным направлением будущих ал-

горитмов сжатия изображений природного происхождения. Однако на данном этапе они являются еще довольно трудоемкими и пока малоэффективными.

Стандарт сжатия изображений JPEG 2000

JPEG2000 – новый стандарт сжатия изображений, который использует весьма эффективную вейвлет-технологию. На данный момент стандарт JPEG2000 состоит из шести частей (рис. 2.5):

Часть 1: JPEG2000 Система кодирования (ядро).

Часть 2: Расширения.

Часть 3: JPEG2000 для движимых изображений.

Часть 4: Соответствия.

Часть 5: Ссылки на программное обеспечение.

Часть 6: Описание формата графического файла.

Схема алгоритма кодирования для JPEG 2000 представлена на рисунке 2.5.



Рис. 2.5. Схема кодирования JPEG2000

Главный компонент стандарта – спецификация синтаксиса битового потока. На это обращается особое внимание в стандарте.

JPEG 2000 имеет много привлекательных характеристик, которые не были доступны в предыдущем стандарте кодирования изображений JPEG. Главный его недостаток – большая требовательность к вычислительным ресурсам существенным образом сужают сферы его применения.

Стандарт сжатия изображений JPEG XR (HD Photo)

Стандарт JPEG XR разработан компанией Microsoft. Впервые о нем было объявлено в 2006 году под именем Windows Media Photo. Затем он был переименован в HD Photo в ноябре того же года. В июле 2007 года, Joint Photographic Experts Group и Microsoft представили метод HD Photo в качестве потенциального претендента на получение статуса стандарта уже под именем JPEG XR. 16 марта 2009 года JPEG XR получил окончательное одобрение Международного союза по телекоммуникациям в виде выпуска рекомендации ITU-T T.832 и, начиная с апреля 2009 года, он стал свободно доступным для ознакомления. 19 июня 2009 года, он прошел сертификацию ISO/IEC и был окончательно утвержден в качестве международного стандарта ISO/IEC 29199-2.

Первоначально Microsoft разрабатывала JPEG XR для удовлетворения определенных потребностей энтузиастов и профессионалов цифровой фотографии, стараясь при этом преодолеть ограничения оригинального формата JPEG. В стандарте предлагается ряд усовершенствований. К ним относятся использование новых форматов пикселя (для сохранности высокого качества изображения), прогрессивные функции декодирования (для более эффективного доступа и управле-

ния изображениями), а также некоторые улучшения технологии сжатия (они, по словам разработчиков, позволяют улучшить качество изображения, уменьшить размеры файлов и увеличить производительность работы). Также JPEG XR предлагает более широкий диапазон форматов пикселя с 8, 16 и 32 битами на канал, включая широкий диапазон возможных форматов гаммы, хранимых в числах с фиксированной или плавающей запятой.

Алгоритм метода JPEG XR концептуально очень похож на JPEG: исходное изображение преобразуется в цветоразностную модель YUV , каждая плоскость состоит из блоков фиксированного размера, блоки преобразуются в частотной области, и частоты коэффициенты квантуются и т.д. Среди основных отличий можно выделить следующие:

- поддержка глубины цвета до 32 бит;
- учет потерь при цветовом преобразовании из RGB в YUV ;
- обработка блоков элементов изображения размером 4×4 (также могут использоваться 2×4 и 2×2 блоки для специальных случаев, связанных с цветностью подвыборки);
- вместо DCT используется целочисленное преобразование использованием «подъемной» схемы (lifting scheme), напоминающей 4×4 DCT, но без потерь (все преобразование обратимые);
- использование дополнительной предфильтрации соседних 4×4 блоков для улучшения возможностей сжатия и сокращения блок-границ артефактов в низкочастотном диапазоне;
- поддержка кодирования изображения, разделяя его на более мелкие отдельные прямоугольные участки. Каждый участок может быть декодирован независимо от других частей изображения.

JPEG XR позволяет эффективно переводить изображение в более низкое разрешение, уменьшать качество или же выбирать ту часть изображения, с которой нужно работать. В нем содержится новую технологию сжатия художественных изображений, которая, по заявлениям разработчиков, действует в два раза эффективнее сжатия оригинального формата JPEG (т.е. обеспечивает то же качество с размером файла вдвое меньше), и при этом может осуществлять сжатие более высокого качества с потерями, которые относятся только к математическим действиям при сжатии. Это позволяет использовать более качественные пиксельный форматы с большой битовой глубиной для лучшего качества изображения, сохраняя при этом размеры файла.

Несмотря на то, что стандарт JPEG XR является самым новым стандартом сжатия и изначально он задумывался как конкурент JPEG 2000 субъективно и объективно он уступает последнему по качеству сжатых изображений, при том что степени сжатия у них примерно одинаковые [107].

2.4. Сравнительный анализ характеристик методов сжатия

Анализ известных методов сжатия видеоинформации показал, что наибольшие коэффициенты сжатия достигаются при применении методов с потерей качества, использующих различные ортогональные преобразования (дискретно-косинусное преобразование (ДКП), Хаара, Уолша) или Wavelet-системы. Формулы для определения количества операций на выполнение преобразований приведены в табл. 2.1. Наиболее эффективной технологией сжатия, построенной на базе методов первого класса является формат JPEG2000. Оценка времени выполнения ортогонального преобразования на базе

быстрых алгоритмов реализации приводится на рис. 2.6. Из анализа данных приведенных на рис. 2.6 следует, что только на выполнение ОП затрачиваются большие временные интервалы. Время сжатия и восстановления для изображений с размерами 6400×4800 элементов на ИВС с тактовой частотой микропроцессора 66 МГц достигает 180 минут, при тактовой частоте микропроцессора 2000 МГц время обработки данного изображения составляет 72 секунды.

Таблица 2.1.-

Характеристики ортогональных преобразований

Количество операций сложения/вычитания	Количество операций умножения/деления	Тип арифметических операций	Чувствительность коэффициентов преобразования
Дискретно-косинусное преобразование (ДКП)			
$N \log_2 N$	$N \log_2 N$	вещественные	Глобальная
Дискретное преобразование Уолша (ДПУ)			
$N \log_2 N$	–	целочисленные	Глобальная
Быстрое целочисленное преобразование Хаара (БЦПХ)			
$2(N - 1)$	N	частично вещественные	глобальная и локальная

Зависимость степени сжатия от величины отношения сигнал/шум приведены на рис. 2.7. Анализ данных на рис. 2.7 показывает, что степень сжатия находится в существенной зависимости от количества вносимых погрешностей. Наибольшие значения степени сжатия (на уровне 20 раз) достигаются для величины ОСШ не превышающей 25 дБ. Это соответствует режиму обработки с внесением значительных потерь информации. При увеличении величины ОСШ на уровень 55 дБ степень сжатия снижается до величины, равной 2-м разам.

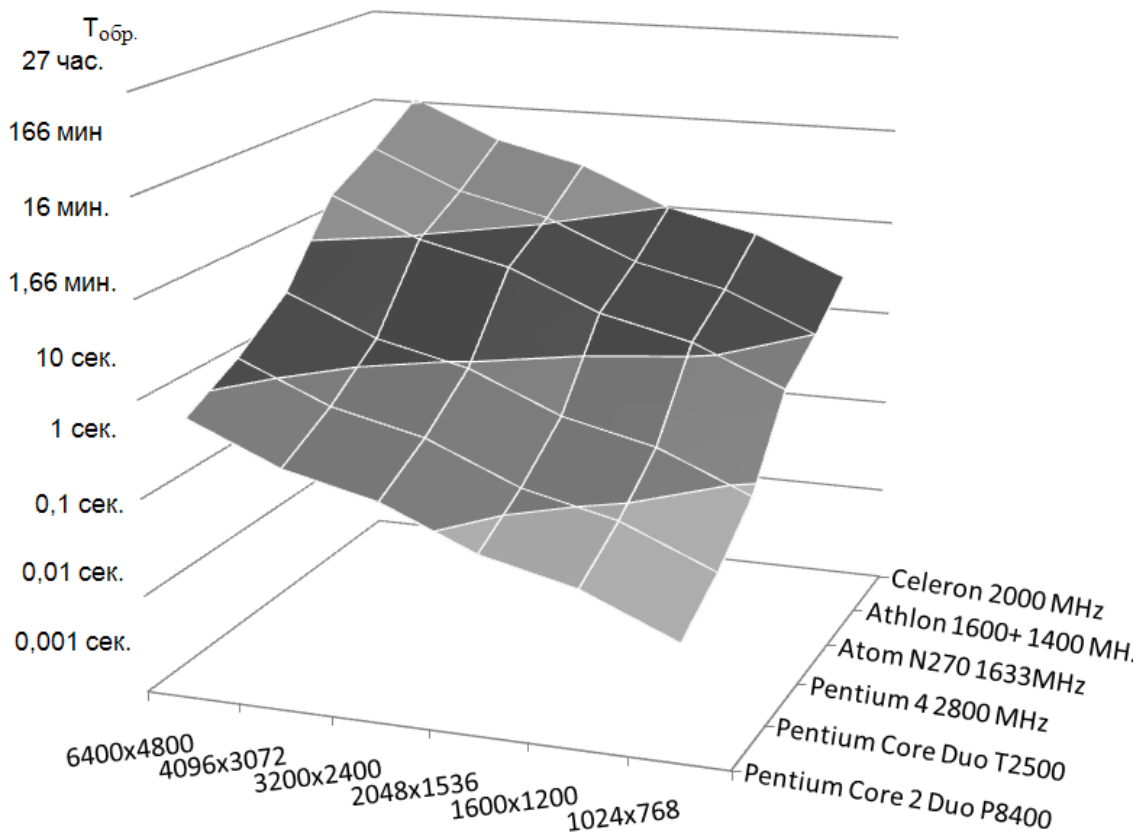


Рис. 2.6. Время обработки видеоданных (в логарифмическом масштабе) при выполнении ДКП, в зависимости от размера кадра и производительности ИВС.

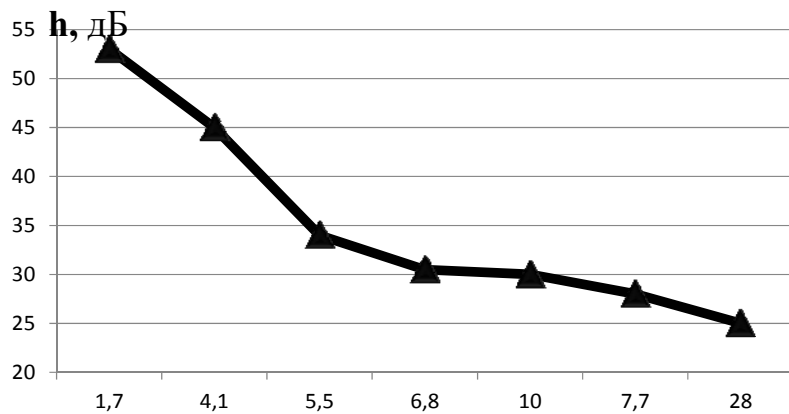


Рис. 2.7. Зависимость степени $k_{сж}$ сжатия от отношения h сигнал/шум для реалистических изображений.

Таким образом, методы сжатия, основанные на устранении психовизуальной избыточности, имеют ограниченное практическое применение.

Сравнительная оценка степени сжатия для различных методов второго класса рассматривается в табл. 2.2.

Таблица 2.2.-

Значение $k_{сж}$ для методов внутрикадровой обработки

Метод сжатия	Реалистические изображения		Искусственные изображения
	Сильнонасыщенные $0,3 \leq r \leq 0,7$	Средненасыщенные $0,9 \leq r$	Средненасыщенные $p < 0,1$
Арифметическое кодирование	1,17	1,7	5,7
КДС	0,9	1,7	10
LZW	1,3	2,2	13
МПК	1,32	1,8	2
JPEG, $q=0$	2	3	3,5

Таблица 2.3.-

Значение T_{on} (в сек.)

Метод сжатия	Реалистические изображения		Искусственные изображения
	Сильнонасыщенные $0,3 \leq r \leq 0,7$	Средненасыщенные $0,9 \leq r$	Средненасыщенные $p < 0,1$
$W = 800 \times 600 \times 24 = 11$ Мбит, $U_n = 57$ Кбит/с			
АК	164	113	33
КДС	213	113	19
LZW	147	87	14
МПК	145	106	96
JPEG, $q=0$	96	64	55
$W = 2048 \times 1536 \times 24 = 75$ Мбит, $U_n = 2,048$ Мбит/с			
АК	31	21	6,5
КДС	41	21	3,7
LZW	33 (5)	20 (4)	2,8
МПК	28	20	18
JPEG, $q=0$	18	12	10,5

Оценка времени T_{on} обработки и передачи видеоданных с учетом их сжатия без внесения погрешности представлена в табл. 2.3. Обработка изображений проводилась на вычислительном комплексе, базирующемся на микропроцессоре Intel Pentium IV с тактовой частотой 2,1 ГГц.

Из анализа данных в табл. 2.2 и 2.3 следует, что существующие методы без потери информации позволяющие достичь высокого коэффициента сжатия изображений имеют сложные алгоритмы работы и требуют больших временных затрат на кодирование-декодирование (достигает *нескольких минут*). При использовании методов кодирования уменьшающих только статистическую избыточность, временные затраты на сжатие и передачу изображений больших объемов достигают нескольких десятков минут. Это объясняется большим временем обработки поскольку для каждого сжимаемого изображения необходимо вычислять статистические характеристики и недостаточно высоким коэффициентом сжатия сильнонасыщенных и искусственных изображений (1,1 – 1,3 раза), в связи с не стационарностью и равномерностью закона распределения.

Поскольку изображение обладает структурной избыточностью то для его компактного представления можно применить сжатие с выделением длин серий. Данный метод сжатия позволяет устранить структурную избыточность сообщений. Изображение, подвергаемое обработке методом с выделением длин серий, представляется последовательностью серий, каждая из которых образована соседними элементами изображения, имеющими одинаковые цветовые координаты. Соседними элементами изображения считаются не только соседние элементы в строке, но и последний и первый элементы соседних строк. В потоке выходных данных сжатое изо-

бражение представляется как последовательность цветовых координат и соответствующих им длин серий.

Данный метод обладает следующими преимуществами относительно методов, сокращающих только вероятностно-статистическую избыточность:

– простотой технической реализации (для кодирования и декодирования изображения требуется относительно небольшое количество операций);

– сжатие изображения происходит без потери информации в восстановленных изображениях.

Вместе с преимуществами метод обладает недостатками. Для сильнонасыщенных изображений характерно наличие большого количества мелких деталей. Это приводит к большому количеству коротких по длине серий и к увеличению количества разрядов на представление цветовых координат. Для слабонасыщенных видеоданных напротив характерно небольшое количество мелких деталей, поэтому в компактно представленном изображении будет небольшое количество серий. Из вышесказанного следует, что для различных классов видеоданных значение максимальной длины серии ℓ_{max} в изображении будет разное. Поскольку предварительно неизвестно, какое изображение будет подвергаться обработке, то нельзя определить, какое количество разрядов необходимо зарезервировать под представление длины серии. Так, если количество разрядов для представления длины серии будет большое, а серии будут короткими, то может произойти увеличение первоначального размера изображения (до 2,5 раз) относительно исходного. Если для представления длины серии выбрать небольшое количество разрядов, а серии будут большой длины, коэффициент сжатия будет меньше максимально возможного. Возможно представление длины серии

неравномерным кодом, но при этом снижается помехоустойчивость сжатого изображения и усложняется машинная обработка, поскольку ИВС обрабатывает информацию участками равными длине машинного слова. Поскольку кодирование с выделением длин серий имеет очень низкую помехоустойчивость, то использование неравномерного кода является не целесообразным. Также в данном случае необходимо использовать маркеры–разделители между кодовыми комбинациями или использовать префиксное кодирование. Использование маркеров–разделителей приводит к увеличению объема сжатого изображения, а префиксное кодирование усложняет обработку.

Следовательно, существующие подходы относительно сокращения избыточности изображений не обеспечивают заданных требований по времени обработки и передачи данных по телекоммуникационным системам с необходимой степенью достоверности.

Резюме

Основные проблемные стороны существующих методов компактного представления изображений без потери информации состоят в том, что эффективность методов сжатия, базирующихся на статистических кодах, существенно зависит от вероятностно-статистических свойств изображений. Для реалистических изображений характерна выраженная нестационарность, проявляющаяся в интенсивном изменении статистических свойств локальных фрагментов, мультимодальности законов распределения вероятностей появления элементов изображений, низкой корреляцией между элементами изображений. Это приводит к снижению степени сжатия.

Методы сжатия с выявлением цепочек одинаковых элементов, обеспечивают сжатия изображений в основном за счет сокращения структурной избыточности. Количество устраняемой избыточности определяется длинами серий одинаковых элементов изображений. Для реалистических изображений соответствуют низкие значения длин серий. Это приводит к резкому уменьшению степени сжатия.

Также можно сделать вывод, что избыточность, зависящая от длин серий, является простейшим вариантом структурного подхода относительно сжатия изображений. Данные характеристики являются локальными и не учитывают свойство распределенности однородных фрагментов по разным частям кадра изображения.

Значит, для дальнейшего развития методов компактного представления видеоданных требуется разработать подходы и методы устранения избыточности, основанные на выявлении интегрированных характеристик изображений.

РАЗДЕЛ 3

МЕТОД РЕЛЬЕФНОГО ИЗОТОПНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ АРХИТЕКТУРНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

3.1. Построение рельефной модели изображений на основе выделения изотопных уровней

Наиболее широко распространенной цветовой моделью представления оцифрованных изображений является трехцветная модель. Данная модель позволяет рассматривать как полноцветные изображения, так и одноцветные (256 градаций серого). Каждая плоскость $A^{(r)}$ трехцветной модели (r – индекс плоскости цветопредставления изображения, $r=3$) представляет собой двумерный массив элементов a_{ij} изображения. Плоскость изображения можно рассматривать как рельеф некоторой поверхности (рис 3.1) [6; 9; 10; 15; 93; 94].

Значение элемента изображения соответствует высоте поверхности от начального уровня. Начальным уровнем считается элемент изображения равный цветовой координате черного цвета ($a_{ij}=0$). Координаты $(i; j)$ элемента изображения на плоскости (i – номер строки, j – номер столбца) соответствуют координатам высоты поверхности спроецированной на горизонтальную плоскость.

Определение 3.1. Под рельефом изображения понимается конечная совокупность вершин, высоты которых определя-

ются значениями элементов плоскости изображения, расположенных на соответствующих координатах.

Чем больше количество вершин, тем более точно реальные объекты описываются рельефом изображения (увеличивается разрешающая способность кадра изображения).

В зависимости от типа характеристики a_{ij} плоскости изображения будет соответствовать определенная физическая интерпретация рельефа. Рельефный подход к представлению изображения можно рассматривать как обобщение большого числа различных моделей изображений.

В общем случае рельеф изображения имеет сложную нестационарную форму, представляющую собой неравномерно-распределенную совокупность впадин и возвышенностей, имеющих неправильную структуру, а также импульсных выбросов или резкое снижение высоты в отдельной дискретной позиции (рис. 3.1).

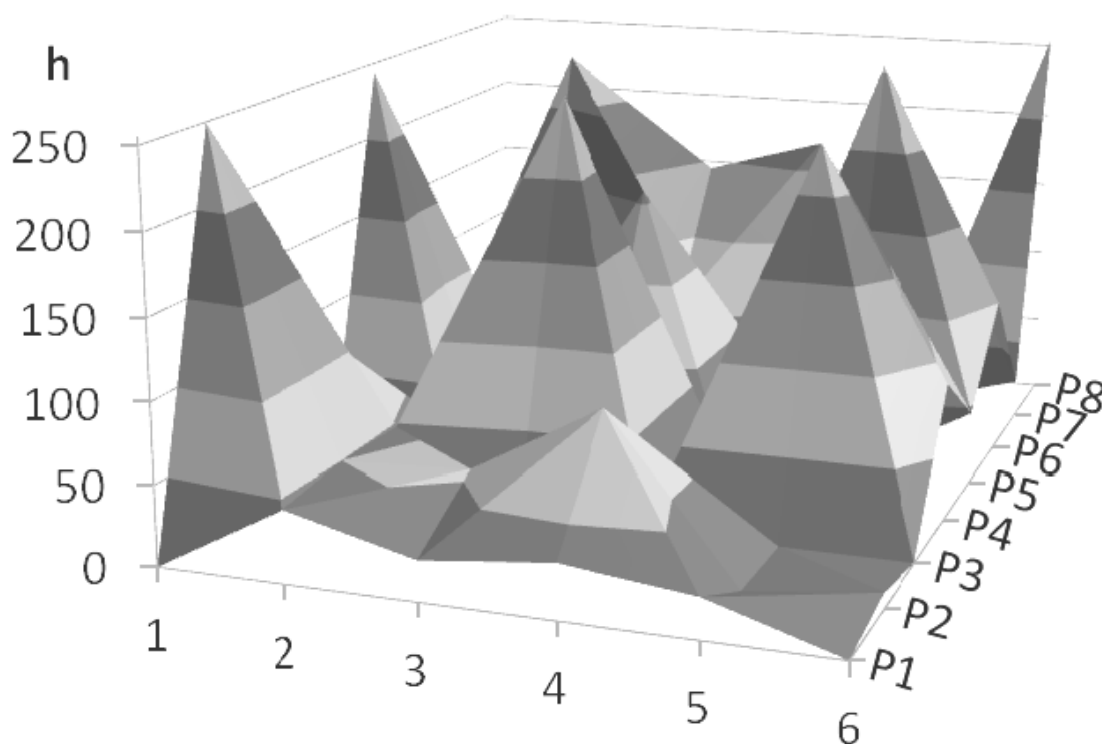


Рис. 3.1. Фрагмент рельефа изображения

Впадина рельефа изображения наблюдается тогда когда наблюдается тенденция монотонного уменьшения значения высоты рельефа хотя бы по одному направлению. В этом случае относительно высоты a_{ij} выполняется *одно из условий* (рис. 3.2):

$$a_{ij} \leq a_{i-1, j-1}; a_{ij} \leq a_{i-1, j}; a_{ij} \leq a_{i-1, j+1}; a_{ij} \leq a_{i, j-1};$$

$$a_{ij} \leq a_{i, j+1}; a_{ij} \leq a_{i+1, j-1}; a_{ij} \leq a_{i+1, j}; a_{ij} \leq a_{i+1, j+1}. \quad (3.2.)$$

$\mathbf{a}_{i-1, j-1}$	$\mathbf{a}_{i-1, j}$	$\mathbf{a}_{i-1, j+1}$
$\mathbf{a}_{i, j-1}$	\mathbf{a}_{ij}	$\mathbf{a}_{i, j+1}$
$\mathbf{a}_{i+1, j-1}$	$\mathbf{a}_{i+1, j}$	$\mathbf{a}_{i+1, j+1}$

Рис. 3.2. Схема формирования впадины рельефа

В частном случае для одного из направлений существует монотонно убывающая последовательность $a_{ij} \geq a_{\xi\zeta}$, $\xi \geq i$ и $\zeta \geq j$.

Параметрами впадины, описывающими ее структуру, являются: глубина, площадь, объем.

Глубина впадины Δd_{\min} находится как разность между самой нижней высотой впадины a_{\min} и максимальной из высот a_{\max} (по всем восьми направлениям), для которых выполняется условие (3.2):

$$\Delta d_{\min} = a_{\max} - a_{\min}. \quad (3.3)$$

Площадь $S_{\min}^{(\hbar)}$ впадины оценивается как количество $V_{\min}^{(\hbar)}$ высот, имеющих значения в заданном диапазоне глубины $\Delta d_{\min} = \hbar$, $\hbar \leq \Delta d_{\min}$.

Объем $V_{\min}^{(\hbar)}$ впадины равен суммарному количеству высот по всем направлениям, для которых выполняется одно из условий (3.2). В этом случае $\hbar = \Delta d_{\min}$.

Возвышенность рельефа задается одним или одновременно несколькими условиями (рис 3.4):

$$a_{ij} \geq a_{i-1, j-1}; a_{ij} \geq a_{i-1, j}; a_{ij} \geq a_{i-1, j+1}; a_{ij} \geq a_{i, j-1};$$

$$a_{ij} \geq a_{i, j+1}; a_{ij} \geq a_{i+1, j-1}; a_{ij} \geq a_{i+1, j}; a_{ij} \geq a_{i+1, j+1}. \quad (3.4.)$$

$a_{i-1, j-1}$ ↘	$a_{i-1, j}$ ↙	$a_{i-1, j+1}$
$a_{i, j-1}$ ←	a_{ij}	$a_{i, j+1}$ →
$a_{i+1, j-1}$ ↗	$a_{i+1, j}$ ↓	$a_{i+1, j+1}$ ↘

Рис. 3.3. Схема формирования возвышенности рельефа

По аналогии с понятием впадины рельефа для структурного описания возвышенности используются параметры: глубина Δd_{\max} , площадь $S_{\max}^{(\hbar)}$ и объем $V_{\max}^{(\hbar)}$ возвышенности.

Импульсное изменение значения высоты свойственно как для реалистических, так и для искусственных изображений. Для реалистических изображений такие изменения в основном вызваны не точностью аппаратуры формирования и оцифровки изображения. Для искусственных изображений (в том числе карты) определяются наличием резких перепадов между смежными цветовыми уровнями. В этом случае для задания импульсного всплеска и импульсного понижения должны выполняться соответственно одновременно все условия (3.2) и одновременно все условия (3.4). Понятно, что параметром импульсного изменения является величина его отклонения от текущего уровня высот рельефа поверхности изображения.

Рассмотренные характеристики рельефа (впадины, воз-

вышенности и импульсные отклонения) являются локальными и зависят от направления обхода элементов изображения для его анализа. Данные характеристики не позволяют оценить интегрированность содержания изображения. Для реалистических изображений свойственна нестационарность как структурных так и статистических свойств. Нестационарность проявляется в неоднородном и интенсивном перемешивании впадин, возвышенностей и импульсных отклонений. Отсюда следует повышение информативности отдельно анализируемых фрагментов изображения. Тогда выявление закономерности в кадре изображения на основе заранее выбранного признака может привести к увеличению информативности описания локального фрагмента. Последствием чего будет снижение степени сжатия видеоданных вплоть до увеличения первоначального объема изображения. Для выхода из данной ситуации могут использоваться следующие направления:

1) увеличение количества признаков и повышение разнообразия их природы. Например, проводить анализ локального фрагмента на основе одновременного выявления закономерностей относительно закона распределения вероятностей появления элементов изображения и относительно структурных форм. В этом случае появляется возможность снизить степень информативности фрагментов изображения. Однако такое направление имеет такие недостатки:

– сложность построения методов, реализующих кодирующие и декодирующие процессы;

– резко увеличивается количество операций на обработку;

2) организовывать выявление интегрированных признаков для фрагментов и для всего кадра изображения.

Реализацию второго направления для рельефной модели изображения *предлагается* проводить на основе формирова-

ния изотопных уровней. Под изотопным уровнем понимается горизонтальная плоскость, проходящая через высоты рельефа, расположенные на одном уровне.

Определение 3.2. Изотопное описание рельефа изображения заключается в рассечении поверхности изображений горизонтальными плоскостями (горизонталями) и формировании кодового описания совокупностей горизонталей и их высот h_u (рис. 3.4) [8; 9; 14]:

$$A^{(r)} \rightarrow \{H^{(u)}\}, u = \overline{1, U}, \quad (3.5)$$

где $H^{(u)}$ – совокупность высот рельефа изображения, имеющих значение h_u ; U – количество изотопных уровней рельефа; u – индекс, задающий номер изотопного уровня поверхности изображения.

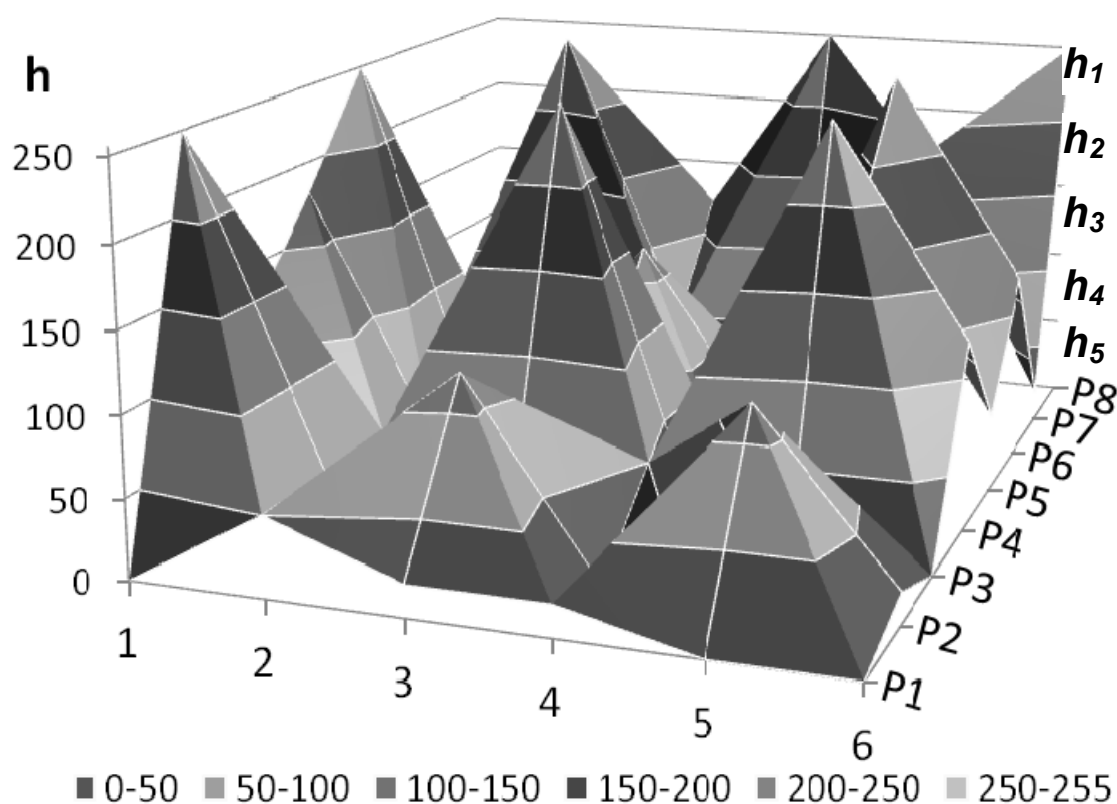


Рис. 3.4. Схема разбиения рельефа изображения на изотопные уровни

В случае изотопного описания рельефа изображения основными характеристиками являются количество U изотопных уровней и количество Ω_u высот, принадлежащих каждому уровню.

Один изотопный уровень может включать несколько горизонтальных плоскостей, т.е.:

$$H^{(z)} = \bigcup_{u=\phi_z}^{\Phi_z} H^{(u)}, \quad (3.6)$$

где $H^{(z)}$ – z -й изотопный уровень, содержащий Φ_z горизонтальных плоскостей.

Согласно выражению (2.6) изотопный срез (уровень) включает высоты рельефа, принимающие значения на следующем отрезке $[h_\phi; h_\Phi]$.

Изотопный уровень, содержащий несколько горизонтальных плоскостей рельефа, формирует усеченную изотопную призму. Нижним и верхним основаниями усеченной призмы являются соответственно ϕ -я и Φ -я горизонтальные плоскости.

Для варианта описания рельефа изображения на основе усеченных изотопных пирамид информационными характеристиками будут являться количество усеченных пирамид Z , количество Φ_z изотопных плоскостей, принадлежащих каждой пирамиде и количество Ω_z высот, содержащихся в пирамиде. Поскольку усеченные пирамиды не имеют общих высот (иначе возникали бы случаи потери информации), то выполняется равенство

$$\sum_{z=1}^Z \Omega_z = \sum_{u=1}^U \Omega_u, \quad Z \leq U. \quad (3.7)$$

Достоинством формирования усеченных изотопных призм является компактность описания рельефа. Сокращается количество информации, необходимой для описания уровней рельефа. С другой стороны проявляется недостаток, состоящий во внесении погрешностей обработки и соответственно снижению качества восстанавливаемых изображений.

Горизонтальные сечения для построения усеченных призм проводятся в соответствии с максимальными и минимальными диапазонными уровнями в разных частях изображения с шагом Δh . Величина шага Δh равна количеству высот рельефа, содержащихся в усеченной изотопной призме. Если формирование усеченных изотопных пирамид осуществляется равномерно, величина Δh будет постоянной для любого среза

$$\Delta h = \Phi. \quad (3.8)$$

В обратном случае, когда высоты усеченных пирамид являются неравномерными, то они содержат различное количество Φ_z горизонтальных плоскостей. Тогда величина шага будет неравномерной и зависящей от индекса пирамиды

$$\Delta h_z = \Phi_z, \quad (3.9)$$

где Δh_z – шаг квантования для z -й усеченной пирамиды.

Расположение впадин и подъемов (низин и пиков) на рельефе изображения имеет нестационарный характер, а также различные значения объемов в различных частях кадра (рис. 3.5).

Поэтому неравномерность величины шага Δh позволяет сформировать изотопные срезы, содержащие равномерное количество высот рельефа или равномерное количество элементов изображений. Тогда для обеспечения заданного зна-

чения пикового отношения сигнал/шум потребуется меньшее количество различных изотопных уровней. Отсюда величина Δh_z гибко настраивается для более точного описания неровностей рельефа, т.е. $\Delta h = \text{var}$.

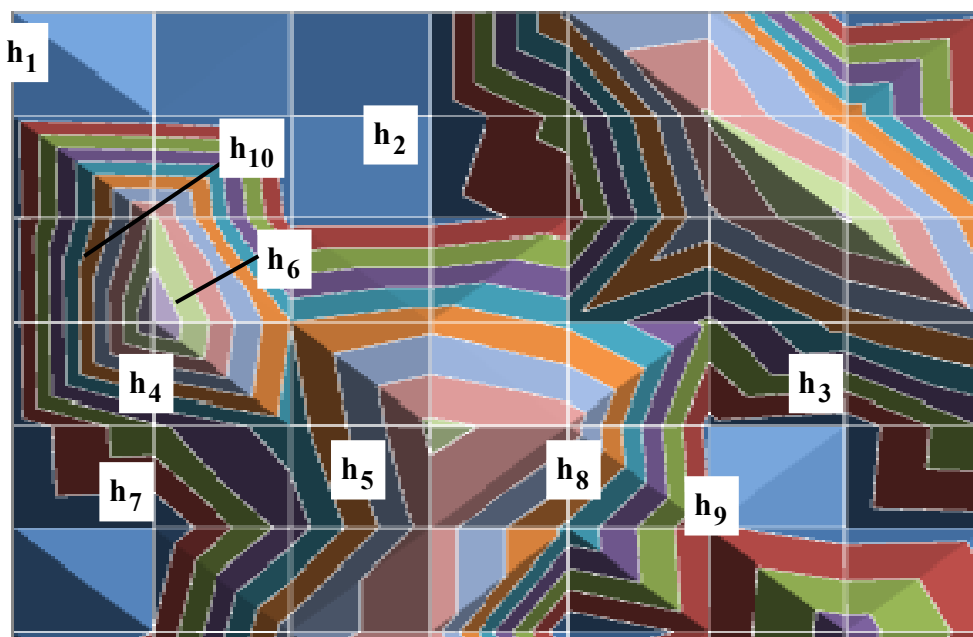


Рис. 3.5. Схема нестационарного распределения изотопных уровней по фрагментам реалистического изображения

Процесс рассечения поверхности изображения горизонталями через неравномерные интервалы Δh_z можно интерпретировать как дополнительное неравномерное квантование цветовой (яркостной) компоненты a_{ij} . Для непрерывного случая фрагмент изображения можно рассматривать как фигуру $a = f(z, x, y)$ в трехмерном пространстве, где первая координата z определяет уровень элемента изображения, а остальные две координаты (x, y) его расположение в фрагменте. Тогда процесс оцифровки непрерывного изображения и рассечение его изотопными плоскостями ассоциируется с трех-

мерным векторным неравномерным квантованием. Для этого случая h_u – является уровнем квантования по высоте рельефа, а Δh – шагом квантования. По аналогии со стандартным понятием квантования [65] для выбора величин h_u и Δh необходимо знать диапазон изменения значений элементов изображений в фрагментах $A^{(v)}$, а также требуется учитывать степень неровностей фрагмента изображения.

Таким образом, построено изотопное описание рельефа изображения. Изотопное представление организовывается на основе формирования горизонтальных плоскостей, проходящих через высоты рельефа. В отличие от описания рельефа изображения локальными характеристиками его поверхности (структурные параметры впадины, возвышенности и импульсных отклонений) изотопное описание является интегрированной характеристикой, позволяющей оценить особенности рельефа одновременно в разных частях изображения. К основным информативным характеристикам изотопного описания относятся количество изотопных срезов, их высота и количество высот рельефа, находящихся между его нижним и верхним уровнями. Изотопные характеристики имеют большую информативность в условиях нестационарности локальных свойств поверхности рельефа. Следовательно, изотопное описание изображений обладает потенциальной возможностью для увеличения количества сокращаемой избыточности.

Возможны два подхода организации изотопных уровней [8;9;14]:

- 1) количество изотопных уровней равно мощности алфавита элементов фрагмента изображения (всего кадра). Высота наиболее высокого изотопного уровня соответствует величине динамического диапазона фрагмента изображения. Данный

подход соответствует полному включению всех высот рельефа, т.е. полное содержание всех элементов изображения;

2) строятся усеченные изотопные пирамиды, объединяющие в себе несколько горизонтальных плоскостей. Сокращается количество изотопных срезов относительно предыдущего подхода. Допускается описание не всех высот рельефа. Это приводит к повышению компактности описания рельефа изображения. Но в тот же час допускаются потери качества восстановленных изображений. Для учета нестационарности распределения высот рельефа по горизонтальным плоскостям высота усеченных пирамид выбирается неравномерной. Обеспечивается равномерное распределение высот по изотопным срезам.

Для кодового представления рельефной модели изображения необходимо разработать метод кодирования изотопных структур. Причем для исключения потерь информации должно существовать взаимоднозначное соответствие между изотопными кодами N_u и множеством Ω_u .

3.2. Создание архитектуры изотопного представления рельефа изображения

Чтобы обеспечить взаимоднозначное соответствие между исходным изображением и изотопной формой описания рельефа требуется сохранить полную информацию о высотах рельефа, включающую в себя количество Ω_u высот для каждого горизонтального уровня h_u , количество изотопных уровней U , позиции высот рельефа для каждого изотопного уровня. Позиционирование высот внутри изотопных плоскостей осуществляется на основе таких принципов [9]:

1. *Абсолютное позиционирование.* Для указания позиции высоты рельефа используется порядковый номер β или координаты $(i; j)$ соответствующего элемента в изображении. Зная порядковый номер β можно получить значения координат $(i; j)$ каждого элемента и наоборот. Для этого используются формулы:

$$\beta = (i-1)N + j, \quad \beta = \overline{1, (M \times N)}; \quad (3.10)$$

$$i = \lceil \beta / N \rceil; \quad j = \beta - (\lceil \beta / N \rceil - 1)N, \quad (3.11)$$

где M, N – соответственно количество строк и столбцов в изображении; $\lceil \beta / N \rceil$ – округление в большую сторону результата деления β / N .

Достоинство данного способа заключается в возможности считывании высоты рельефа непосредственно по ее координатам. Недостаток состоит в том, что для сохранения информации о позициях всех высот требуется формировать $M \times N$ кодовых слов. Под каждое кодовое слово затрачивается $\log_2(M \times N)$ бит. Суммарное количество разрядов $V_n^{(a)}$, отводимое на позиционирование высот рельефа в случае абсолютного принципа равно

$$V_n^{(a)} = M \times N \log_2(M \times N). \quad (3.12)$$

В то же время цифровой объем $V_{исх}$ плоскости исходного изображения равен

$$V_{исх} = M \times N \log_2 D, \quad (3.13)$$

где D – количество уровней квантования видеосигнала, $D = 256$.

Поскольку $D < M \times N$, то выполняется неравенство $V_{исх} < V_n^{(a)}$. Значит для данного принципа позиционирования

увеличивается количество разрядов на представление изображения уже только за счет сохранения позиций высот рельефа. Это приводит к неэффективности абсолютного принципа нумерации.

2. *Относительное позиционирование.* Позиция $\alpha_{i,u}$ высоты рельефа текущего u -го изотопного уровня определяется относительно позиции α_{l_γ} последней высоты предыдущего γ -го изотопного уровня. Данный принцип организовывается на основе формирования последовательности длин l_ξ серий высот, принадлежащих соответствующим ξ -ым изотопным уровням.

Позиция $\alpha_{i,u}$ определяется по формуле

$$\alpha_{i,u} = \Delta l_u^{(i-1)} + \sum_{\xi=1}^{\gamma} l_\xi, \quad (3.14)$$

где l_ξ – длина серии высот, принадлежащих ξ -му изотопному уровню, который предшествует обрабатываемой части текущего u -го уровня;

$\sum_{\xi=1}^{u-1} l_\xi$ – количество высот, содержащихся в сериях предшествующих серии высот изотопного уровня u ;

$\Delta l_u^{(i-1)}$ – подсерия высот текущего u -го изотопного уровня, предшествующих обрабатываемой высоте. Длина подсерии равна $(i-1)$ высотам; i – позиция высоты в серии; γ – количество серий, предшествующих серии высот u -го изотопного уровня.

Величина ξ может равняться индексу u . В этом случае последовательность серий будет содержать одну или более серий высот, принадлежащих изотопному уровню u . Серия ξ включает в себя следующие высоты $\{\alpha_{1,\xi}, \dots, \alpha_{i,\xi}, \dots, \alpha_{l_{\xi,\xi}}\}$,

где $\alpha_{1,\xi}$ и $\alpha_{\ell_{\xi},\xi}$ – соответственно первая и последняя высота ξ -й серии. При выявлении серий одинаковых высот необходимо выбрать направление обхода изображения. Для снижения времени обработки используется направление обхода элементов по строкам изображения сверху вниз.

В случае относительного принципа позиционирования требуется хранить информацию о всех v_{dc} длинах ℓ_{ξ} серий высот рельефа с учетом порядка следования серий в изображениях. Количество разрядов $V_n^{(o)}$, отводимое на хранение информации об относительном позиционировании высот рельефа равно

$$V_n^{(o)} = v_{dc} \log_2 \ell_{max}. \quad (3.15)$$

где $\log_2 \ell_{max}$ – количество разрядов, затрачиваемое на представление одной длины серии высот;

ℓ_{max} – максимальная длина серии высот в кадре изображения.

Поскольку выполняются неравенства:

$$v_{dc} < M \times N; \quad \log_2 \ell_{max} < \log_2(M \times N), \quad (3.16)$$

то достоинство относительного принципа позиционирования заключается в уменьшении количества разрядов на хранение позиционирующей информации относительно абсолютного позиционирования, т.е. $V_n^{(o)} < V_n^{(a)}$.

Недостатки относительного способа позиционирования состоят в том, что:

- для определения позиции высоты в изображении требуется просуммировать все длины предыдущих серий. Это приводит к увеличению количества операций на обработку;

- разрушается интегрированность характеристик изотоп-

ного представления рельефа изображения. Длины серий являются одномерными параметрами локальных фрагментов изображения. Для реалистических изображений насыщенных мелкими деталями увеличивается количество серий и снижается их длина. Это приводит к повышению информативности изотопного описания, а, следовательно, к снижению степени сжатия;

– существует проблема выбора количества разрядов на кодовое представление длины серии. Для изображений, имеющих нестационарные свойства, наблюдается увеличение величины $V_n^{(o)}$ относительного исходного цифрового объема $V_{исх}$ видеоданных, $V_{исх} \leq V_n^{(o)}$.

Для исключения данных недостатков *предлагается* осуществлять архитектурное позиционирование [8; 9; 14; 82; 83].

3. *Архитектурное позиционирование.* Каждый изотопный уровень заменяется значением высоты и двумерным двоичным массивом, элементы которого содержат информацию о наличии на соответствующей позиции высоты текущего изотопного уровня (рис. 3.6).

Для позиционирования высот u -го изотопного уровня строится двоичный массив $B^{(u)}$, элементами $b_{ij}^{(u)}$ которого являются признаки, указывающие на отсутствие или наличие высоты h_u на позиции $(i; j)$ в изображении $B^{(u)} = \{b_{ij}^{(u)}\}$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$, где $b_{ij}^{(u)}$ – $(i; j)$ -й элемент массива указателей позиций высот u -го изотопного уровня для фрагмента изображения, размером $m \times n$.

Значения признаков $b_{ij}^{(u)}$ определяется на основе правила

$$b_{ij}^{(u)} = \begin{cases} 1, \rightarrow a_{ij} = h_u ; \\ 0, \rightarrow a_{ij} \neq h_u , \end{cases} \quad (3.17)$$

где a_{ij} – $(i; j)$ -й элемент изображения.

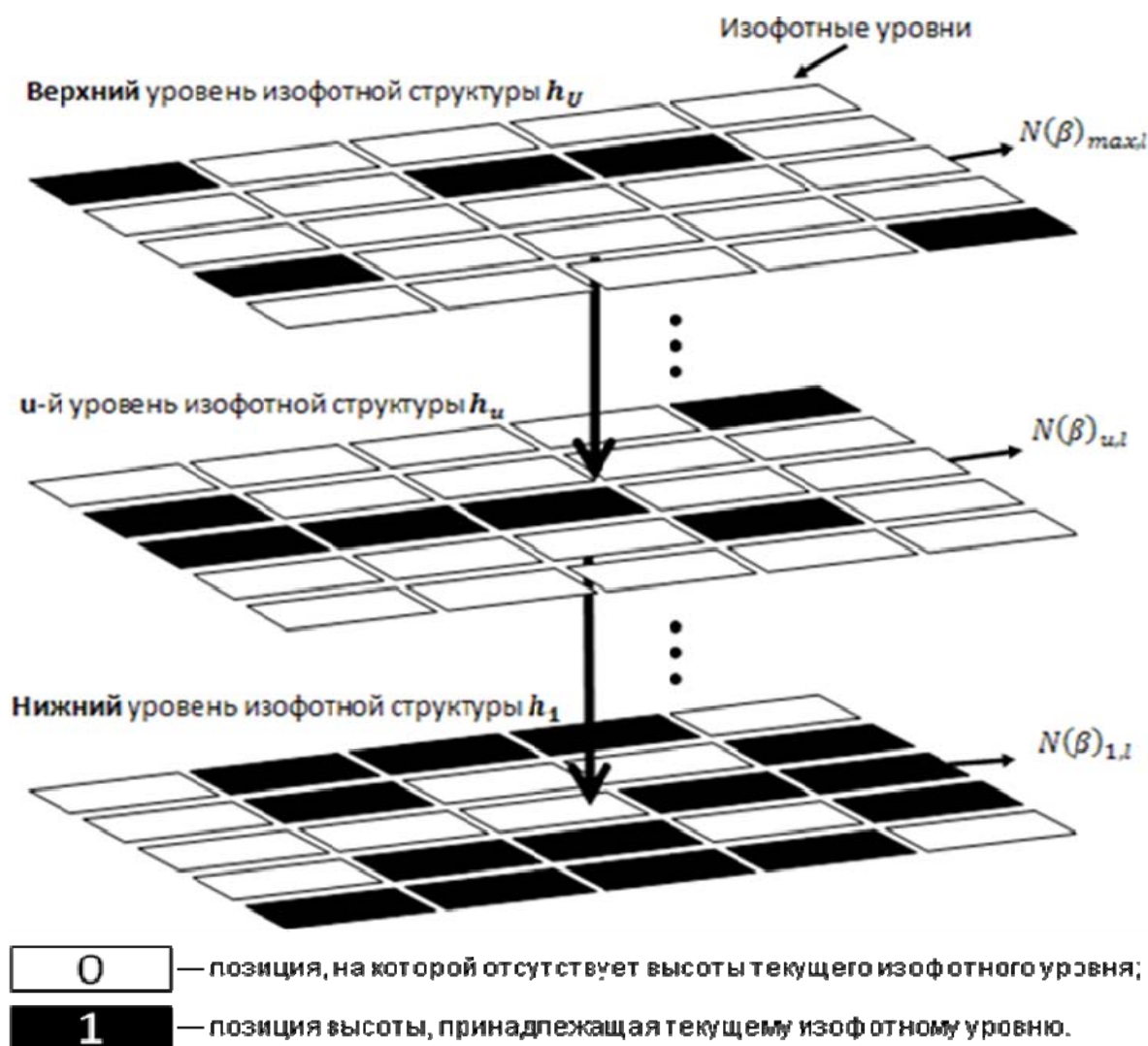


Рис. 3.6. Схема архитектурного позиционирования высот изотопных уровней:

Если значение элемента a_{ij} равно высоте h_u , то на позиции $(i; j)$ в позиционирующем массиве $B^{(u)}$ стоит 1. Наоборот когда $a_{ij} \neq h_u$, то на позиции $(i; j)$ отсутствует высота u -го изотопного уровня, а $b_{ij}^{(u)} = 0$.

Позиционирующий двоичный массив $B^{(u)}$ задает u -й

уровень архитектурного позиционирования. Совокупность B позиционирующих массивов по всем изотопным уровням $B = \{B^{(u)}\}$, $u = \overline{1, U}$ обеспечивает распределение всех высот рельефа изображения по выявленным изотопным уровням.

Содержание позиционирующих массивов для конкретного фрагмента рельефа изображения является жестким, т.е. не изменяется в процессе обработки. Указатели массивов $B^{(u)}$ организуют взаимнооднозначное распределение высот рельефа изображения по координатам в соответствующих изотопных уровнях. В этом случае по известному значению элемента $b_{ij}^{(u)}$ взаимнооднозначно устанавливается факт наличия или отсутствия высоты изотопного уровня на позиции с координатой $(i; j)$. Отсюда устанавливается понятие архитектуры изотопного описания рельефа изображения [9; 25].

Определение 3.3. Архитектура изотопного описания рельефа изображения представляет собой совокупность позиционирующих массивов, элементы которых задают жесткую и взаимнооднозначную привязку высот рельефа за конкретными координатами в горизонтальных плоскостях.

Из особенностей формирования архитектурного позиционирования вытекают следующие свойства:

1. Для определения позиции высоты текущего изотопного уровня требуется выполнить одно из двух действий:

– проанализировать значение элемента позиционирующего массива. В случае равенства единицы позиционирующего элемента его координаты в архитектуре укажут на позицию высоты в изображении;

– для заданного направления обхода элементов позиционирующего массива определить положение первого единичного элемента.

Значит, сохраняется достоинство абсолютного позиционирования, состоящее в непосредственном определении координат высот рельефа изображения, и устраняется недостаток относительного позиционирования. Тем самым снижается время формирования и обработки видеоданных, представленных на основе изотопного описания рельефа изображения и архитектурного позиционирования.

2. В отличие от относительного позиционирования сохраняется интегрированность изотопного описания рельефа. Это достигается за счет формирования позиционирующих массивов для каждого изотопного уровня. Данное преимущество обеспечивает потенциальные условия для повышения степени сжатия за счет выявления закономерностей, учитывающих интегрированные структурные характеристики фрагментов изображения.

3. На представление элемента позиционирующего массива затрачивается один двоичный разряд. Тогда на кодовое представление всего позиционирующего массива отводится количество $V_n^{(u)}$ бит, равное

$$V_n^{(u)} = m \times n \text{ (бит)}. \quad (3.18)$$

Объем $V_n^{(арх)}$ цифрового описания всей архитектуры изотопного представления рельефа вычисляется по формуле

$$V_n^{(арх)} = U V_n^{(u)} = U m n \text{ (бит)}. \quad (3.19)$$

Анализ выражения (3.19) показывает, что

- отсутствует проблема выбора длины кода для представления длины серии высот;
- объем цифрового описания для архитектурного позиционирования зависит от количества изотопных уровней U .

Для больших значений U может выполняться неравенство $V_n^{(o)} \leq V_n^{(apx)}$.

Изотопное описание рельефа изображения на основе архитектурного позиционирования высот организуется на основе формирования архитектуры рельефа B , состоящего из позиционирующих двоичных массивов $B^{(u)}$ и совокупности высот H для каждого изотопного уровня [9; 14]

$$\Omega_u \rightarrow B^{(u)}, h_u. \quad (3.20)$$

или

$$A^{(r)} = \begin{cases} H = \{h_u\}; \\ B = \{B^{(u)}\}, u = \overline{1, U}. \end{cases}$$

Следовательно, построено изотопное описание изображения на основе архитектурного позиционирования высот рельефа. Данное представление позволяет

– формировать и обрабатывать высоты изотопных уровней используя непосредственное определение их позиций в архитектуре;

– обеспечить интегрированность характеристик изотопного описания;

– сохранить информацию о всех высотах рельефа и их позиций в нем.

Для оценки выполнения условия

$$V_{исх} > V_{ин} \quad (3.21)$$

(где $V_{исх}$, $V_{ин}$ – количество разрядов на представление соответственно исходного изображения и его изотопного представления) относительно компактности изотопного описания на основе архитектурного позиционирования высот рельефа необходимо определить информативность архитектурного представления высот изотопных уровней.

3.3. Информационная оценка архитектурного позиционирования высот рельефа с учетом динамических диапазонов изотопных уровней

Недостаток архитектурного представления изотопных уровней заключается в том, что описание позиционирующих массивов на основе полного перечисления информации о их элементах связана с затратой большого количества разрядов, равного $V_n^{(арх)} = U m n$ битам [7; 8; 10; 15]. Такое значение получается в предположении того, что на представление позиционирующей информации отдельного изотопного уровня отводится $m n$ бит. Это соответствует случаю, когда позиционирующий массив рассматривается как перестановка с повторениями в двоичном пространстве (двоичном алфавите). Такой подход учитывает не только количество нулевых и единичных элементов в позиционирующем массиве, но и взаимное расположение нулей и единиц. В этих условиях обеспечивается полное и взаимнооднозначное сохранение информации о значениях и расположении всех высот рельефа. Количество $Q_{mn}^{(2)}$ перестановок с повторениями, составленное из двоичных последовательностей длиной $m n$ элементов равно

$$Q_{mn}^{(2)} = 2^{mn}. \quad (3.22)$$

В то же время такой подход не учитывает конкретного содержания отдельных позиционирующих массивов (ПМ). Для выявления структурных особенностей ПМ предлагается анализировать значения динамических диапазонов их элементов. Динамические диапазоны элементов ПМ формируются на основе выбора минимального значения из двух величин: динамического диапазона в строке и динамического

диапазона в столбце, на пересечении которых расположен элемент позиционирующего массива [10; 15]:

$$\varphi_{ij}^{(u)} = \min(\varphi_i^{(u)}, \varphi_j^{(u)}) + 1, \quad i=\overline{1, m}, \quad j=\overline{1, n}, \quad (3.23)$$

где $\varphi_{ij}^{(u)}$ – динамический диапазон $(i; j)$ -го элемента u -го ПМ;
 $\varphi_i^{(u)}$ – динамический диапазон элементов i -й строки u -го ПМ:

$$\varphi_i^{(u)} = \begin{cases} 1, \rightarrow \sum_{j=1}^n b_{ij}^{(u)} \geq 1; \\ 0, \rightarrow \sum_{j=1}^n b_{ij}^{(u)} = 0, \end{cases}, \quad i=\overline{1, m}. \quad (3.24)$$

$\varphi_j^{(u)}$ – динамический диапазон элементов j -го столбца u -го ПМ:

$$\varphi_j^{(u)} = \begin{cases} 1, \rightarrow \sum_{i=1}^m b_{ij}^{(u)} \geq 1; \\ 0, \rightarrow \sum_{i=1}^m b_{ij}^{(u)} = 0, \end{cases}, \quad j=\overline{1, n}. \quad (3.25)$$

$\sum_{j=1}^n b_{ij}^{(u)}$ – арифметическая сумма элементов i -й строки u -го

ПМ;

$\sum_{i=1}^m b_{ij}^{(u)}$ – арифметическая сумма элементов j -го столбца u -го

ПМ.

Из анализа соотношений (3.23) – (3.25) вытекает, что величина $\varphi_{ij}^{(u)}$ принимает одно из двух целочисленных значений 1 или 2:

$$\varphi_{ij}^{(u)} = \begin{cases} 1, \rightarrow \varphi_i^{(u)} \otimes \varphi_j^{(u)} = 0; \\ 2, \rightarrow \varphi_i^{(u)} \otimes \varphi_j^{(u)} = 1, \end{cases} \quad (3.26)$$

где $\varphi_i^{(u)} \otimes \varphi_j^{(u)}$ – векторное произведение величин $\varphi_i^{(u)}$ и $\varphi_j^{(u)}$.

Значение произведения $\varphi_i^{(u)} \otimes \varphi_j^{(u)}$ будет равно 0, если одна или сразу две величины динамических диапазонов в строке и столбце будут равны 0 $\varphi_i^{(u)} \otimes \varphi_j^{(u)} = 0$, когда $0 \otimes 0 = 0$, $0 \otimes 1 = 0$ и $1 \otimes 0 = 0$.

Величина $\varphi_i^{(u)} \otimes \varphi_j^{(u)}$ равна единице, когда сразу две величины $\varphi_i^{(u)}$ и $\varphi_j^{(u)}$ равны 1 $\varphi_i^{(u)} \otimes \varphi_j^{(u)} = 1$, когда $1 \otimes 1 = 1$.

Величина $\varphi_{ij}^{(u)}$ является ограничением элемента $b_{ij}^{(u)}$ сверху

$$b_{ij}^{(u)} \leq \varphi_{ij}^{(u)} - 1. \quad (3.27)$$

Учитывая ограничения на динамический диапазон элементов, заданных неравенством (3.27), позиционирующий массив можно рассматривать как перестановку с повторениями в двоичном пространстве, на элементы которых наложены дополнительные ограничения. Для этого варианта количество $Q_\varphi^{(u)}$ ПМ определяется по формуле [10; 15]:

$$Q_\varphi^{(u)} = \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(u)}. \quad (2.28)$$

На основе анализа формул (3.22) и (3.28) между величинами $Q_{mn}^{(2)}$ и $Q_\varphi^{(u)}$ выполняется неравенство

$$Q_\varphi^{(u)} < Q_{mn}^{(2)}, \quad (3.29)$$

если существует хотя бы одно значение величины $\varphi_{ij}^{(u)}$, равное единице.

С учетом этого в общем случае выполняется неравенство

$$Q_\varphi \leq Q_2, \quad (3.30)$$

где Q_2 – количество архитектур изотопного описания рельефа, рассматриваемых как перестановка с повторениями трехмерной структуры в двоичном пространстве

$$Q_2 = (Q_{mn}^{(2)})^U = 2^{Umn}; \quad (3.31)$$

Q_φ – количество архитектур изотопного описания рельефа, рассматриваемых как перестановка с повторениями трехмерной структуры в двоичном пространстве с дополнительными ограничениями на динамический диапазон элементов, заданных неравенством (3.27). Величина Q_φ вычисляется как произведение величин $Q_\varphi^{(u)}$ по всему количеству U изотопных уровней [10; 15]:

$$Q_\varphi = \prod_{u=1}^U Q_\varphi^{(u)} = \prod_{u=1}^U \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(u)}. \quad (3.32)$$

Согласно выражениям (3.31) и (3.32) неравенство (3.30) примет вид

$$\prod_{u=1}^U \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(u)} \leq 2^{Umn}. \quad (3.33)$$

Отсюда выполняется неравенство

$$V_{n,\varphi}^{(apx)} = \log_2 \left(\prod_{u=1}^U \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(u)} \right) \leq V_n^{(apx)} = Umn, \quad (3.34)$$

где $V_n^{(apx)}$ – объем цифрового описания архитектуры изотопного представления рельефа без учета структуры позиционирующих массивов; $V_{n,\varphi}^{(apx)}$ – объем цифрового описания архитектур изотопного представления рельефа в случае, когда

учитываются закономерности в структуре позиционирующих массивов.

Значит, учет конкретного содержания отдельных изотопных уровней позволяет сократить количество разрядов на представление позиционирующей информации о высотах в рельефе изображения.

Для дополнительного снижения значения величины $V_n^{(арх)}$ необходимо формировать кодовое представление для сохранения позиционирующей информации с учетом особенностей построения всей архитектуры изотопного описания рельефа.

3.4. Разработка информационной модели изотопного представления изображения на основе связного архитектурного позиционирования

Архитектура рельефа формируется по правилу: единица в позиционирующем массиве ставится тогда, когда на соответствующих координатах находится высота, принадлежащая текущему изотопному уровню. С другой стороны согласно правилу создания горизонтальных плоскостей высота рельефа может принадлежать только одному изотопному уровню, т.е. [7; 8; 10; 16] $H^{(u)} \cap H^{(\xi)} = 0$, $\xi \neq u$, где $H^{(u)}$, $H^{(\xi)}$ – множества высот соответственно для u -го и ξ -го изотопных уровней.

Тогда если высота рельефа принадлежит u -му изотопному уровню $h_u \in H^{(u)}$, то она не будет принадлежать другим изотопным уровням $h_u \notin H^{(\xi)}$, где $\xi = \overline{1, U}$ и $\xi \neq u$ (рис. 3.6).

Отсюда следует, что если высота рельефа принадлежит u -му изотопному уровню и находится на позиции с координатами $(i; j)$, то на данной позиции в других изотопных

уровнях будет отсутствовать высота рельефа $a_{ij} = h_u$, т.е. $a_{ij} \in H^{(u)}$, следовательно $a_{ij} \notin H^{(\xi)}$, где $\xi = \overline{1, U}$ и $\xi \neq u$.

Поэтому на основе правила формирования позиционирующих массивов $B^{(u)}$, заданного системой (3.17) следует выполнение условия

$$b_{ij}^{(u)} = 1 \Rightarrow b_{ij}^{(\xi)} = 0 \text{ для } \xi = \overline{1, U} \text{ и } \xi \neq u, \quad (3.35)$$

т.е. если для позиционирующего массива, соответствующего u -му изотопному уровню на позиции с координатами $(i; j)$, стоит 1, то на этой позиции в позиционирующих плоскостях других изотопных уровней будут стоять нулевые значения.

Условие (3.35) является *условием связности позиционирующих массивов* и задает дополнительные ограничения на допустимость появления единичных элементов на определенных позициях ПМ. Анализ выражения (3.35) показывает, что данное условие накладывается одновременно на все позиционирующие массивы (все изотопные уровни). Поэтому выявленная закономерность позволяет рассматривать совокупность позиционирующих массивов как цельный трехмерный объект – *архитектура мультиизотопного рельефа изображения*.

Для определения количества $Q_2^{(cb)}$ архитектур с учетом ограничения (3.35) сформулируем и докажем теорему [10; 15; 83].

Теорема о количестве архитектур мультиизотопного представления рельефа с учетом условия связности позиционирующих матриц в двоичном пространстве. Величина $Q_2^{(cb)}$ для заданных параметров ($m \times n$ – размеров позиционирующей

щей плоскости, U – количества изотопных уровней) архитектуры рельефа изображения равна

$$Q_2^{(c\sigma)} = 2^{\left(U m n - \sum_{\gamma=1}^{U-1} \sum_{\xi=1}^{\gamma} w_{\xi} \right)}, \quad (3.36)$$

где w_{ξ} – количество единичных элементов, содержащихся в ξ -й позиционной плоскости.

Доказательство. Рассмотрим первую ПМ, $\xi=1$. На ее элементы ограничения связности не накладываются. Количество $Q_1^{(2)}$ перестановок с повторениями в двоичном пространстве, составленное из первого позиционного массива равно

$$Q_1^{(2)} = Q_{mn}^{(2)} = 2^{mn}. \quad (3.37)$$

Определим количество $Q_{2/1}^{(2)}$ перестановок с повторениями в двоичном пространстве, составленное из второго позиционного массива. Согласно условию (3.35) во втором массиве будут нулевые позиции, соответствующие координатам, на которых в первом ПМ находятся единичные элементы. На остальных позициях второго позиционного массива могут находиться как нулевые так и единичные элементы. Поэтому второй ПМ можно рассматривать как перестановку с повторениями, у которой на некоторых позициях запрещено появления единичных элементов. Число различных ПМ для $\xi=2$ равно количеству перестановок с повторениями с учетом наличия позиций, на которых запрещается появление единиц. Сумма единичных элементов в первом ПМ равна w_1 . Поэтому количество позиций во втором ПМ, на которых могут находиться любые двоичные элементы равно $(mn - w_1)$. Тогда величина $Q_{2/1}^{(2)}$ равна

$$Q_{2/1}^{(2)} = 2^{(mn-w_1)}. \quad (3.38)$$

Для u -го позиционирующего массива количество позиций \bar{w}_u , на которых запрещено появление единицы определяется, суммарным количеством единичных элементов во всех предыдущих ПМ:

$$\bar{w}_u = w_1 + \dots + w_\xi + \dots + w_{u-1} = \sum_{\xi=1}^{u-1} w_\xi, \quad (3.39)$$

где $\sum_{\xi=1}^{u-1} w_\xi$ – суммарное количество единичных элементов в $(u-1)$ -м позиционных массивах; w_ξ – количество единичных элементов, содержащееся в ξ -м позиционирующем массиве, равное сумме двоичных элементов

$$w_\xi = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij}^{(\xi)}, \quad (3.40)$$

$b_{ij}^{(\xi)}$ – $(i; j)$ -й элемент ξ -го ПМ.

Тогда количество $Q_{u/1, \dots, (u-1)}^{(2)}$ различных позиционирующих массивов для u -го уровня архитектуры рельефа равно числу перестановок с повторениями в двоичном пространстве с учетом выполнения условия связности относительно предыдущих ПМ, количество которых равно $(u-1)$:

$$Q_{u/1, \dots, (u-1)}^{(2)} = 2^{(mn - \sum_{\xi=1}^{u-1} w_\xi)}. \quad (3.41)$$

Для последнего уровня архитектуры рельефа учитывается условие связности относительно предыдущих $(U-1)$ -го уровня. Количество \bar{w}_U позиций с запретом появления единичных элементов в U -м позиционном массиве равно

$$\bar{w}_U = w_1 + \dots + w_\xi + \dots + w_{U-1} = \sum_{\xi=1}^{U-1} w_\xi, \quad (3.42)$$

где $\sum_{\xi=1}^{U-1} w_\xi$ – суммарное количество единичных элементов в $(U-1)$ -м позиционных массивах.

Количество $Q_{U/1, \dots, (U-1)}^{(2)}$ комбинаций, которое можно сформировать для последнего уровня архитектуры рельефа, равно числу перестановок с повторениями в двоичном пространстве, у которых количество позиций с запретом нахождения единицы равно $\sum_{\xi=1}^{U-1} w_\xi$. Отсюда число позиций в U -м

ПМ, допускающих появление любого двоичного элемента равно $(mn - \sum_{\xi=1}^{U-1} w_\xi)$. Следовательно, величина $Q_{U/1, \dots, (U-1)}^{(2)}$

определяется по соотношению

$$Q_{U/1, \dots, (U-1)}^{(2)} = 2^{\left(mn - \sum_{\xi=1}^{U-1} w_\xi\right)}. \quad (3.43)$$

Рассмотрим событие $S(0, \dots, \bar{w}_u, \dots, \bar{w}_U)$, состоящее в том, что одновременно для каждого уровня архитектуры число запретов единиц будет равно: 0 – для первого ПМ, \bar{w}_u – для u -го ПМ и \bar{w}_U – для U -го ПМ. Поэтому событие $S(0, \dots, \bar{w}_u, \dots, \bar{w}_U)$ наступит тогда, когда одновременно для всех изотопных уровней наступит соответствующее событие $S(\bar{w}_u)$, где $u = \bar{1}, \bar{U}$, а $\bar{w}_1 = 0$. Согласно выражению (3.42) событие $S(0, \dots, \bar{w}_u, \dots, \bar{w}_U)$ эквивалентно событию $S(\bar{w}_U)$:

$$S(0, \dots, \bar{w}_u, \dots, \bar{w}_U) = S(\bar{w}_U), \quad (3.44)$$

где $S(\bar{w}_U)$ – событие состоящее в том, что в U -м ПМ запрещено \bar{w}_U позиций единиц.

Поэтому на основе соотношений (3.42) и (3.44) событие $S(0, \dots, \bar{w}_u, \dots, \bar{w}_U)$ связано с событиями $S(\bar{w}_u)$, где $u = \overline{1, U}$ следующей формулой

$$S(0, \dots, \bar{w}_u, \dots, \bar{w}_U) = S(\bar{w}_U) = \sum_{u=1}^{U-1} S(\bar{w}_u), \quad (3.45)$$

где $S(\bar{w}_u)$ – событие состоящее в том, что в u -м ПМ запрещено \bar{w}_u позиций единиц.

Из анализа выражения (3.45) вытекает, что события $S(\bar{w}_u)$, $u = \overline{1, U}$ являются между собой взаимонезависимыми.

Рассмотрим событие $S(Q_{u/1, \dots, (u-1)}^{(2)})$, заключающееся в том, что на u -м уровне архитектуры рельефа в условиях связности (3.35) количество допустимых позиционирующих массивов будет равно $Q_{u/1, \dots, (u-1)}^{(2)}$. В соответствии с анализом формулы (3.41) величина $Q_{u/1, \dots, (u-1)}^{(2)}$ зависит от \bar{w}_u . В тоже время события $S(\bar{w}_u)$, $u = \overline{1, U}$ являются взаимонезависимыми, а определение количество допустимых ПМ на каждом уровне архитектуры рельефа рассчитывается в независимости от других уровней. Значит события $S(Q_{u/1, \dots, (u-1)}^{(2)})$, $u = \overline{1, U}$ также являются взаимонезависимыми, т.е.

$$S(Q_{\xi/1, \dots, (\xi-1)}^{(2)}) \cap S(Q_{u/1, \dots, (u-1)}^{(2)}) = 0, \text{ где } \xi, u = \overline{1, U}, \xi \neq u. \quad (3.46)$$

Тогда событие $S(Q_1^{(2)}, \dots, Q_{u/1, \dots, (u-1)}^{(2)}, \dots, Q_{U/1, \dots, (U-1)}^{(2)})$, заключающееся в том, что количество допустимых ПМ на каждом уровне архитектуры рельефа будут равны соответствен-

но $Q_1^{(2)}, \dots, Q_{u/1, \dots, (u-1)}^{(2)}, \dots, Q_{U/1, \dots, (U-1)}^{(2)}$, наступит тогда когда одновременно наступят события $S(Q_1^{(2)}), \dots, S(Q_{u/1, \dots, (u-1)}^{(2)}), \dots, S(Q_{U/1, \dots, (U-1)}^{(2)})$.

Количество раз появления события $S(Q_1^{(2)}, \dots, Q_{u/1, \dots, (u-1)}^{(2)}, \dots, Q_{U/1, \dots, (U-1)}^{(2)})$ определяется как количество $Q_2^{(св)}$ допустимых трехмерных двоичных структур, между горизонтальными сечениями которых выполняется условие связности (3.35). Согласно условию теоремы такие трехмерные двоичные структуры представляют собой конкретную допустимую реализацию архитектуры рельефа изображения. Отсюда количество допустимых горизонтальных сечений в двоичном пространстве для каждого уровня архитектуры равно $Q_{u/1, \dots, (u-1)}^{(2)}$, $u = \overline{1, U}$. Тогда с учетом условия (3.46) по комбинаторной теореме умножения величина $Q_2^{(св)}$ равна

$$Q_2^{(св)} = \prod_{u=1}^U Q_{u/1, \dots, (u-1)}^{(2)}. \quad (3.47)$$

Преобразуем соотношение (3.47), заменив величину $Q_{u/1, \dots, (u-1)}^{(2)}$ формулой (3.41), и получим

$$Q_2^{(св)} = \prod_{u=1}^U 2^{(mn - \sum_{\xi=1}^{u-1} w_{\xi})}. \quad (3.48)$$

или

$$Q_2^{(св)} = 2^{(mn)} \times 2^{(mn - w_1)} \times \dots \times 2^{(mn - \sum_{\xi=1}^{u-1} w_{\xi})} \times \dots \times 2^{(mn - \sum_{\xi=1}^{U-1} w_{\xi})} =$$

$m \times n = 2 \times 2 = 4$ и $\bar{w}_1 = 3, \bar{w}_2 = 1$. В соответствии с формулой

(3.36) $Q_2^{(c6)}$ равно

$$Q_2^{(c6)} = 2^{(U m n - \sum_{\gamma=1}^{U-1} \sum_{\xi=1}^{\gamma} w_{\xi})} = 2^{12 - (3+4)} = 2^5 = 32.$$

Построим таблицу допустимых архитектур.

Пронумеруем первый уровень архитектуры (табл. 3.1). Поскольку $m \times n = 2 \times 2 = 4$, то возможны следующие комбинации

Таблица 3.1.-

Нумерация первого уровня архитектуры

C_1		0	1	2	3	4	5	6	7
b_{11}	b_{12}	0	0	0	0	0	1	0	1
b_{21}	b_{22}	0	0	0	1	1	0	1	1

C_1		8	9	10	11	12	13	14	15
b_{11}	b_{12}	1	0	1	0	1	0	1	1
b_{21}	b_{22}	0	0	0	1	1	0	1	1

Пронумеруем второй уровень архитектуры с учетом трех запрещенных позиций единиц $\bar{w}_1 = 3$ (табл. 3.2). Например, допустимой для единиц будет позиция с координатами (1;1)

Таблица 3.2.-

Нумерация второго уровня архитектуры

C_2		0	1
b_{11}	b_{12}	0	1
b_{21}	b_{22}	1	1

Для третьего уровня архитектуры запрещены все позиции единиц, поэтому будет одна допустимая комбинация (табл. 3.3)

Таблица 3.3.-
Нумерация третьего уровня архитектуры

C_2		0	
b_{11}	b_{12}	0	1
b_{21}	b_{22}	1	1

Тогда суммарное количество комбинаций по всем уровням представлено их номерами, примет вид табл. 3.4. (C – номер всей архитектуры)

Таблица 3.4.-
Комбинации по всем уровням архитектуры изображения

C	0	1	2	3	4	5	6	7
C_1	0	0	1	1	2	2	3	3
C_2	0	1	0	1	0	1	0	1
C_3	0	0	0	0	0	0	0	0

C	8	9	10	11	12	13	14	15
C_1	4	4	5	5	6	6	7	7
C_2	0	1	0	1	0	1	0	1
C_3	0	0	0	0	0	0	0	0

C	16	17	18	19	20	21	22	23
C_1	8	8	9	9	10	10	11	11
C_2	0	1	0	1	0	1	0	1
C_3	0	0	0	0	0	0	0	0

C	24	25	26	27	28	29	30	31
C_1	12	12	13	13	14	14	15	15
C_2	0	1	0	1	0	1	0	1
C_3	0	0	0	0	0	0	0	0

Следовательно, из анализа данных табл. 3.4 суммарное количество комбинаций архитектуры рельефа равно $Q_2^{(cb)} = 32$.

Количество $V_2^{(cb)}$ двоичных разрядов, отводимое на представление позиционирующей информации высот изображения, с учетом условия связности уровней архитектуры рельефа, равно

$$V_2^{(cb)} = \log_2 \left(2^{(Umn - \sum_{\gamma=1}^{U-1} \sum_{\xi=1}^{\gamma} w_{\xi})} \right) = Umn - \sum_{\gamma=1}^{U-1} \sum_{\xi=1}^{\gamma} w_{\xi}. \quad (3.49)$$

Разницы между количеством двоичных разрядов для разных принципов позиционирования представлены следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \Delta R_1 &= V_n^{(a)} - V_2^{(cb)} = mn \log_2(mn) - Umn + \sum_{\gamma=1}^{U-1} \sum_{\xi=1}^{\gamma} w_{\xi} = \\ &= mn \left(\sum_{\gamma=1}^{U-1} \sum_{\xi=1}^{\gamma} w_{\xi} + \log_2(mn) - U \right); \end{aligned} \quad (3.50)$$

$$\Delta R_2 = V_n^{(o)} - V_2^{(cb)} = v_{dc} \log_2 l_{max} - Umn + \sum_{\gamma=1}^{U-1} \sum_{\xi=1}^{\gamma} w_{\xi}. \quad (3.51)$$

$$\Delta R_3 = V_n^{(apx)} - V_2^{(cb)} = Umn - Umn + \sum_{\gamma=1}^{U-1} \sum_{\xi=1}^{\gamma} w_{\xi} = \sum_{\gamma=1}^{U-1} \sum_{\xi=1}^{\gamma} w_{\xi}, \quad (3.52)$$

где ΔR_1 , ΔR_2 , ΔR_3 – количество разрядов между цифровым объемом на связное архитектурное позиционирование и соответственно цифровыми объемами для $V_n^{(a)}$ – абсолютным позиционированием (находится по формуле (3.12)); $V_n^{(o)}$ – относительным позиционированием (вычисляется на основе

выражения (3.15)); $V_n^{(apx)}$ – архитектурным позиционированием без учета связности уровней, определяемого по соотношению (3.19).

Анализ разницы, задаваемой выражениями (3.50) – (3.52), показывает, что:

– $\Delta R_1 > 1$, т.е. будет достигаться сокращение объема данных, если выполняется условие

$$2^U < \sum_{\gamma=1}^{U-1} \sum_{\xi=1}^{\gamma} w_{\xi} + \log_2(mn);$$

– $\Delta R_2 > 1$, т.е. за счет перехода от относительного позиционирования высот рельефа к связному архитектурному позиционированию в двоичном пространстве достигается уменьшение количества двоичных разрядов, если

$$U < \left(v_{\partial c} \log_2 \ell_{max} + \sum_{\gamma=1}^{U-1} \sum_{\xi=1}^{\gamma} w_{\xi} \right) / mn;$$

– $\Delta R_3 = \sum_{\gamma=1}^{U-1} \sum_{\xi=1}^{\gamma} w_{\xi} \geq 0$, что соответствует случаю, когда

уменьшение количества разрядов для архитектурного позиционирования обеспечивается в случае учета связности, заданной выражением (3.35). Данное неравенство выполняется при наличии хотя бы одной позиции с запретом появления единицы.

Цифровой объем $V_{исх}$ использующийся на представление фрагмента исходного изображения размером $(m \times n)$ элементов, равен $V_{исх} = mn \log_2 D = 8mn$.

Тогда разница ΔR_4 между количеством разрядов $V_{исх}$ на поэлементное представление фрагмента изображения и количеством разрядов $V_2^{(св)}$ на его изотопную форму описания

при использовании связного архитектурного позиционирования высот рельефа определяется по формуле

$$\Delta R_4 = V_{ucx} - V_2^{(cb)} = 8mn - Umn + \sum_{\gamma=1}^{U-1} \sum_{\xi=1}^{\gamma} w_{\xi}. \quad (3.53)$$

Отсюда следует, что за счет архитектурного позиционирования достигается сокращение количества разрядов уже тогда, когда $U \leq 8$.

Дадим определение типу сокращаемой избыточности в результате изотопного представления изображений на основе связного архитектурного позиционирования высот рельефа [10].

Определение 3.5. Количество избыточности, устраняющееся на основе архитектурного позиционирования высот мультиизотопного описания рельефа изображения, называется комбинаторной избыточностью, определяемой разницей между количеством допустимых комбинаций, составленных для разных моделей представления изображения.

Анализ выражения (3.36) показывает, что

– минимальное значение $Q_{2,min}^{(cb)}$ величина $Q_2^{(cb)}$ будет то-

гда когда величина произведения

$$2^{(mn - w_1) + \dots + (mn - \sum_{\xi=1}^{u-1} w_{\xi}) + \dots + (mn - \sum_{\xi=1}^{U-1} w_{\xi})} =$$

$$= 2^{((U-1)mn - \sum_{\gamma=1}^{U-1} \sum_{\xi=1}^{\gamma} w_{\xi})}$$

= 1. Данный вариант соответствует случаю $w_1 = mn$, т.е. архитектура рельефа состоит из одного

изотопного уровня. Величина $Q_{2,min}^{(cb)}$ равна

$$Q_{2,min}^{(cb)} = 2^{mn} \leq Q_2^{(cb)}; \quad (3.54)$$

– максимальное значение $Q_{2,max}^{(cb)}$ величины $Q_2^{(cb)}$ для заданного количества U изотопных уровней обеспечивается для минимального значения показателя степени двойки в соотношении (3.36):

$$(U m n - \sum_{\gamma=1}^{U-1} \sum_{\xi=1}^{\gamma} w_{\xi}) \rightarrow \min$$

Такое условие выполняется тогда когда максимальное количество высот содержится в последнем U -м изотопном уровне, а в предыдущих уровнях содержится минимально допустимое количество высот. Поскольку для существования уровня архитектуры требуется наличие хотя бы одной высоты, то в каждом ПМ (кроме последнего ПМ) должно содержаться по одному единичному элементу. Отсюда суммарное количество запрещенных позиций будет равно

$$\sum_{\gamma=1}^{U-1} \sum_{\xi=1}^{\gamma} w_{\xi} = \sum_{\gamma=1}^{U-1} \gamma \text{ или } \sum_{\gamma=1}^{U-1} \gamma = \frac{(U)}{2}(U-1).$$

Тогда величина $Q_{2,max}^{(cb)}$ вычисляется по формуле

$$Q_{2,max}^{(cb)} = 2^{(U m n - \frac{(U)}{2}(U-1))}. \quad (3.55)$$

Наибольшее значение величины $Q_{2,max}^{(cb)}$ достигается для максимального значения U , равного $U = m n$:

$$Q_{2,max}^{(cb)} = 2^{((m n)^2 - \frac{(m n)}{2}(m n - 1))} = 2^{m n (\frac{(m n + 1)}{2})}. \quad (3.56)$$

Значит с учетом выражений (3.54) и (3.56) величина $Q_2^{(cb)}$ изменяется в общем случае в следующих интервалах

$$2^{m n} \leq Q_2^{(cb)} \leq 2^{m n (\frac{(m n + 1)}{2})}. \quad (3.57)$$

Согласно неравенству (3.57) величина $V_2^{(св)}$ в общем случае будет изменяться в пределах

$$m n \leq V_2^{(св)} \leq m n \left(\frac{m n + 1}{2} \right). \quad (3.58)$$

Для дополнительного уменьшения объема цифрового описания изображения необходимо организовать архитектурное представление с одновременным учетом условий связности изотопных уровней и особенностей содержания позиционирующих массивов.

3.5. Формирование информационной модели мультиизотопного связного архитектурного представления в полиадическом пространстве

Для дополнительного уменьшения количества разрядов на представление позиционирующей информации предлагается рассматривать архитектуру мультиизотопного рельефа как трехмерную связную структуру в двоичном полиадическом пространстве. В этом случае для элементов позиционирующих массивов (ПМ) одновременно выполняются два условия:

– условие, представленное выражениями (3.26) и (3.27), задающими двоичное полиадическое пространство для каждого ПМ;

– условие (3.35), определяющее свойство связного уровней архитектуры.

Определим допустимое количество таких трехмерных структур как $Q_{\phi}^{(св)}$.

Теорема о количестве архитектур мультиизотопного представления рельефа с учетом условия связности позициони-

рующих матриц в пространстве ограничений на динамический диапазон [10; 82]. Величина $Q_{\varphi}^{(c\varphi)}$ для заданных параметров ($m \times n$ – размеров позиционирующей плоскости, U – количества изотопных уровней, системы ограничений на динамические диапазоны элементов ПМ $\varphi_{ij}^{(u)}$, $u = \overline{1, U}$) архитектуры рельефа изображения равна

$$Q_{\varphi}^{(c\varphi)} = \prod_{u=1}^U \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n ((\varphi_i^{(u)} \otimes \varphi_j^{(u)}) \otimes r_{ij}^{(u)}), \quad (3.59)$$

где $\varphi_{ij}^{(u)}$ – динамический диапазон $(i; j)$ -го элемента u -го ПМ; $r_{ij}^{(u)}$ – значение признака $(i; j)$ -й позиции u -го изотопного уровня.

Доказательство. По условию теоремы для первого ПМ количество запрещенных позиций единиц равно $\overline{w}_1 = 0$. Тогда $Q_1^{(\varphi)}$ перестановок с повторениями в двоичном полиадическом пространстве, составленное из первого позиционного массива согласно выражению (3.28) равно

$$Q_1^{(\varphi)} = \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(1)}. \quad (3.60)$$

Для u -го позиционирующего массива выполняются два ограничения:

– для элементов $b_{ij}^{(u)}$ ПМ выполняются неравенства

$$b_{ij}^{(u)} \leq \varphi_{ij}^{(u)} - 1, \text{ где } i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n};$$

– по условию (3.35) количество позиций, запрещающих

появление единиц, равно $\overline{w}_u = w_1 + \dots + w_{\xi} + \dots + w_{u-1} = \sum_{\xi=1}^{u-1} w_{\xi}$.

Для позиций, на которых запрещено появление единицы, величина основания равна $\varphi_{ij}^{(u)} = 1$, т.е. выполняется неравенство

$$b_{ij}^{(u)} \leq \varphi_{ij}^{(u)} - 1 = 0. \quad (3.61)$$

Поэтому для ПМ возможны четыре типа позиций:

1) с учетом полиадического пространства $\varphi_{ij}^{(u)} = 2$, а условие связности разрешает появление единичного элемента $b_{ij}^{(u)} \in \{0; 1\}$. Тогда $\varphi_{ij}^{(u, cв)} = 2$;

2) согласно двоичному полиадическому пространству $\varphi_{ij}^{(u)} = 2$, но по условиям связности $b_{ij}^{(u)} = 0$. Значит, значение основания для такой позиции равно $\varphi_{ij}^{(u, cв)} = 1$;

3) в соответствии с ограничениями на динамический диапазон (выражение (3.27)) $\varphi_{ij}^{(u)} = 1$, а по условию связности допускается появление единицы $b_{ij}^{(u)} \in \{0; 1\}$. Несмотря на это, величина основания равна $\varphi_{ij}^{(u, cв)} = 1$;

4) ограничение на динамический диапазон по выражению (3.27) равно $\varphi_{ij}^{(u)} = 1$ и это же значение основания задается по условию связности $b_{ij}^{(u)} = 0$. Отсюда $\varphi_{ij}^{(u, cв)} = 1$.

Из анализа данных вариантов следует, что значения основания в условиях выполнения связности в двоичном полиадическом пространстве определяется как минимальное из двух значений оснований, т.е.

$$\varphi_{ij}^{(u, cв)} = \min(\varphi_{ij}^{(u)}, \varphi_{ij}^{(u, cв)}) + 1, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (3.62)$$

где $\varphi_{ij}^{(u)}$ – значение основания с учетом ограничений в двоичном полиадическом пространстве; $\varphi_{ij}'^{(u,cb)}$ – значение основания с учетом ограничений, задаваемых условием связности изотопных уровней; $\varphi_{ij}^{(u,cb)}$ – величина основания с одновременным учетом связности мультиизотопных уровней в двоичном полиадическом пространстве.

Тогда количество $Q_{u/1, \dots, (u-1)}^{(\varphi)}$ допустимых комбинаций, которое можно составить для u -го изотопного уровня архитектуры равно количеству перестановок с повторениями, на значения элементов которых накладываются ограничения $\varphi_{ij}^{(u,cb)}$, определяемые по формуле (3.62):

$$Q_{u/1, \dots, (u-1)}^{(\varphi)} = \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(u,cb)}. \quad (3.63)$$

По аналогии получим количество допустимых комбинаций для $(U-1)$ -го уровня архитектуры в условиях связности в двоичном полиадическом пространстве

$$Q_{U/1, \dots, (U-1)}^{(\varphi)} = \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(U,cb)}. \quad (3.64)$$

Количество величин $\varphi_{ij}'^{(U,cb)}$, равных единице, определяется количеством \overline{w}_U позиций с запретом появления единичных элементов для U -го позиционного массива $\overline{w}_U = w_1 + \dots + w_\xi + \dots + w_{U-1} = \sum_{\xi=1}^{U-1} w_\xi$, где $\sum_{\xi=1}^{U-1} w_\xi$ – суммарное количество единичных элементов в предыдущих $(U-1)$ -м позиционных массивах.

Рассмотрим событие $S(Q_{u/1,\dots,(u-1)}^{(\varphi)})$, состоящее в том, что на u -м уровне архитектуры рельефа в условиях связности (3.35) для двоичного полиадического пространства количество допустимых позиционирующих массивов будет равно $Q_{u/1,\dots,(u-1)}^{(\varphi)}$. Из анализа формулы (3.63) величина $Q_{u/1,\dots,(u-1)}^{(\varphi)}$ зависит от \overline{w}_u и от системы оснований $\varphi_{ij}^{(u)}$. В тоже время события $S(\overline{w}_u)$, $u = \overline{1, U}$ являются взаимонезависимыми, а построение системы оснований в двоичном полиадическом пространстве не зависит от других ПМ. Поэтому события $S(Q_{u/1,\dots,(u-1)}^{(\varphi)})$, $u = \overline{1, U}$ являются взаимонезависимыми

$$S(Q_{\xi/1,\dots,(\xi-1)}^{(\varphi)}) \cap S(Q_{u/1,\dots,(u-1)}^{(\varphi)}) = 0, \quad (3.65)$$

где $\xi, u = \overline{1, U}$, $\xi \neq u$.

Отсюда событие $S(Q_1^{(\varphi)}, \dots, Q_{u/1,\dots,(u-1)}^{(\varphi)}, \dots, Q_{U/1,\dots,(U-1)}^{(\varphi)})$, заключающееся в том, что количество допустимых ПМ на каждом уровне архитектуры рельефа будут равны соответственно $Q_1^{(\varphi)}, \dots, Q_{u/1,\dots,(u-1)}^{(\varphi)}, \dots, Q_{U/1,\dots,(U-1)}^{(\varphi)}$, наступит тогда, когда одновременно наступят события $S(Q_1^{(\varphi)}), \dots, S(Q_{u/1,\dots,(u-1)}^{(\varphi)}), \dots, S(Q_{U/1,\dots,(U-1)}^{(\varphi)})$. Количество раз появления события $S(Q_1^{(\varphi)}, \dots, Q_{u/1,\dots,(u-1)}^{(\varphi)}, \dots, Q_{U/1,\dots,(U-1)}^{(\varphi)})$ определяется как количество $Q_{\varphi}^{(c\varphi)}$ допустимых трехмерных двоичных структур, между горизонтальными сечениями которых в полиадическом пространстве выполняется условие связности (3.35). Согласно условию теоремы такие трехмерные двоичные структуры представляют собой конкретную допустимую реализацию архитектуры рельефа изображения. Отсюда количество

допустимых горизонтальных сечений в двоичном пространстве для каждого уровня архитектуры равно $Q_{u/1,\dots,(u-1)}^{(\varphi)}$, $u = \overline{1, U}$. Тогда с учетом условия (3.65) по комбинаторной теореме умножения величина $Q_{\varphi}^{(c\varphi)}$ равна

$$Q_{\varphi}^{(c\varphi)} = \prod_{u=1}^U Q_{u/1,\dots,(u-1)}^{(\varphi)}. \quad (3.66)$$

С учетом соотношения (3.63) для величины $Q_{u/1,\dots,(u-1)}^{(\varphi)}$, выражение (3.66) примет вид

$$Q_{\varphi}^{(c\varphi)} = \prod_{u=1}^U \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(u,c\varphi)}. \quad (3.67)$$

Величина $\varphi_{ij}^{(u,c\varphi)}$ в соответствии с выражениями (3.26) и (3.62) равна

$$\varphi_{ij}^{(u,c\varphi)} = \begin{cases} 1, \rightarrow (\varphi_i^{(u)} \otimes \varphi_j^{(u)}) \otimes r_{ij}^{(u)} = 0; \\ 2, \rightarrow (\varphi_i^{(u)} \otimes \varphi_j^{(u)}) \otimes r_{ij}^{(u)} = 1, \end{cases} \quad (3.68)$$

где $(\varphi_i^{(u)} \otimes \varphi_j^{(u)}) \otimes r_{ij}^{(u)}$ – векторное произведение величин $\varphi_i^{(u)}$, $\varphi_j^{(u)}$ и $r_{ij}^{(u)}$; $r_{ij}^{(u)}$ – значение признака $(i; j)$ -й позиции u -го изотопного уровня.

Величина $r_{ij}^{(u)}$ равна нулю, если для предыдущих уровней архитектуры на этой позиции находился единичный элемент. И наоборот $r_{ij}^{(u)} = 1$, когда для предыдущих уровней на этой позиции находились нулевые элементы.

Тогда на основе системы (3.68) формула для величины $Q_{\varphi}^{(c\varphi)}$ примет вид $Q_{\varphi}^{(c\varphi)} = \prod_{u=1}^U \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n ((\varphi_i^{(u)} \otimes \varphi_j^{(u)}) \otimes r_{ij}^{(u)})$.

Теорема доказана.

Определение 3.6. U -связной трехмерной перестановкой с повторениями в двоичном полиадическом пространстве называется трехмерная двоичная структура, горизонтальные сечения которой рассматриваются как перестановки с повторениями в двоичном пространстве с одновременным ограничением на число позиций, определяющиеся на основе связности уровней архитектуры и оснований двоичного полиадического пространства.

Количество таких комбинаторных объектов определяется по формуле (3.59).

Количество $V_{\varphi}^{(c\phi)}$ двоичных разрядов, отводимое на представление позиционирующей информации высот изображения, с учетом условия связности уровней архитектуры рельефа в двоичном полиадическом пространстве, равно

$$V_{\varphi}^{(c\phi)} = \log_2 \left(\prod_{u=1}^U \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(u,c\phi)} \right) = \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \log_2 \varphi_{ij}^{(u,c\phi)}. \quad (3.69)$$

Разницы между количеством двоичных разрядов для разных принципов позиционирования представлены следующими выражениями:

$$\Delta R_1^{(\varphi)} = V_n^{(a)} - V_{\varphi}^{(c\phi)} = mn \log_2(mn) - \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \log_2 \varphi_{ij}^{(u,c\phi)}; \quad (3.70)$$

$$\Delta R_2^{(\varphi)} = V_n^{(o)} - V_{\varphi}^{(c\phi)} = v_{dc} \log_2 l_{max} - \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \log_2 \varphi_{ij}^{(u,c\phi)}. \quad (3.71)$$

$$\Delta R_3^{(\varphi)} = V_n^{(apx)} - V_{\varphi}^{(c\phi)} = Umn - \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \log_2 \varphi_{ij}^{(u,c\phi)}, \quad (3.72)$$

$$\Delta R_4^{(\varphi)} = V_2^{(c\varphi)} - V_\varphi^{(c\varphi)} = U m n - \sum_{\gamma=1}^{U-1} \sum_{\xi=1}^{\gamma} w_\xi - \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \log_2 \varphi_{ij}^{(u,c\varphi)}, \quad (3.73)$$

где $\Delta R_1^{(\varphi)}$, $\Delta R_2^{(\varphi)}$, $\Delta R_3^{(\varphi)}$, $\Delta R_4^{(\varphi)}$ – количество разрядов между цифровым объемом на связанное архитектурное позиционирование в двоичном полиадическом пространстве и соответственно цифровыми объемами для: $V_n^{(a)}$ – абсолютным позиционированием (находится по формуле (3.12)); $V_n^{(o)}$ – относительным позиционированием (вычисляется на основе выражения (3.15)); $V_n^{(apx)}$ – архитектурным позиционированием без учета связности уровней, определяемого по соотношению (3.19); $V_2^{(c\varphi)}$ – связанное архитектурное позиционирование (выражение (3.49)).

Анализ разницы, задаваемых выражениями (3.70) – (3.73), показывает, что $\Delta R_4^{(\varphi)} > 1$, т.е. за счет перехода от связанного архитектурного позиционирования высот рельефа к связанному архитектурному позиционированию в двоичном полиадическом пространстве достигается уменьшение количества двоичных разрядов. Данное утверждение базируется на том, что

- количество запрещенных позиций входит в величину $Q_\varphi^{(c\varphi)}$ в виде признаков $r_{ij}^{(u)}$;
- выполняется неравенство (3.34)

$$\log_2 \left(\prod_{u=1}^U \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(u)} \right) \leq U m n.$$

Кроме того, отсюда следует следующее частное ограничение для величины $Q_\varphi^{(c\varphi)}$, которое выполняется, если для

всех $\varphi_{ij}^{(u)} = 1$, значение признака ПМ равно $r_{ij}^{(u)} = 1$

$$Q_{\varphi}^{(cb)} = \left(\prod_{u=1}^U \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(u)} \right) / \left(2^{\sum_{\gamma=1}^{U-1} \sum_{\xi=1}^{\gamma} w_{\xi}} \right), \text{ где } \sum_{\gamma=1}^{U-1} \sum_{\xi=1}^{\gamma} w_{\xi} - \text{на-}$$

копленная по $(U-1)$ -му уровню архитектуры количество позиций, на которых запрещается появление единицы.

В этом случае количество $V_{\varphi}^{(cb)}$ бит равно

$$V_{\varphi}^{(cb)} = \left(\sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \log_2 \varphi_{ij}^{(u,cb)} \right) - \sum_{\gamma=1}^{U-1} \sum_{\xi=1}^{\gamma} w_{\xi}. \quad (3.74)$$

Дадим определение типа, сокращаемой избыточности в результате изотопного представления изображений на основе связного архитектурного позиционирования высот рельефа в двоичном полиадическом пространстве [10; 82; 83].

Определение 3.7. Количество избыточности, устраняющееся на основе архитектурного позиционирования высот мультиизотопного описания рельефа изображения в двоичном полиадическом пространстве, называется комбинаторной избыточностью, обусловленной одновременным запретом единичных позиций в результате:

– наложения ограничений на динамический диапазон элементов позиционирующих массивов (основания двоичного полиадического пространства);

– учета условия связности изотопных уровней архитектуры рельефа.

Резюме

К основным результатам третьего раздела можно отнести несколько основных моментов. Предложен алгоритм построения рельефной модели описания изображений, которая

позволяет обобщить различные форматы оцифрованного представления изображений. Данное описание учитывает сложную нестационарную форму, представляющую собой неравномерно-распределенную совокупность впадин и возвышенностей, имеющих неправильную структуру, а также импульсных выбросов или резкое снижение высоты в отдельной дискретной позиции в результате формирования совокупности вершин, высоты которых определяются значениями элементов плоскости изображения, расположенных на соответствующих координатах.

Такая форма описания относительно реалистических изображений имеет высокую информативность, что обусловлено с одной стороны локальностью характеристик поверхности рельефа, а с другой стороны нестационарностью свойств изображений. Это приводит к увеличению цифрового объема оцифрованных изображений.

Также в третьем разделе разрабатывается мультиизотопное представление рельефного описания изображений на основе выделения уровней, представляющих собой горизонтальные плоскости, проходящие через высоты рельефа, расположенные на одном уровне. Это позволяет выявить интегрированные признаки для отдельных фрагментов и для всего кадра изображения. Интегрированные характеристики позволяют оценить особенности рельефа одновременно в разных частях изображения. К основным информативным характеристикам изотопного описания относятся количество изотопных срезов, их высота и количество высот рельефа, находящихся между его нижним и верхним уровнями. Изотопное описание изображений обладает потенциальной возможностью для увеличения количества сокращаемой избыточности.

Следующим результатом данного раздела есть, создание архитектурного позиционирования высот рельефа изображения. В этом случае изотопный уровень заменяется значением высоты и двумерным двоичным массивом, элементы которого содержат информацию о наличии на соответствующей позиции высоты текущего изотопного уровня. На основе такого подхода относительно позиционирования высот формируется архитектура изотопного описания рельефа изображения, представляющая собой совокупность позиционирующих массивов, элементы которых задают жесткую и взаимоднозначную привязку высот рельефа за конкретными координатами в горизонтальных плоскостях.

Архитектурное позиционирование позволяет сохранить достоинство абсолютного позиционирования, состоящее в непосредственном определении координат высот рельефа изображения и устранить недостаток относительного позиционирования, связанный с затратами количества операций на пересчет координат высот и проблемой выбора кода для представления длины серии. Тем самым снижается время формирования и обработки видеоданных, представленных на основе изотопного описания рельефа изображения и архитектурного позиционирования.

Построение информационной модели архитектурного представления мультиизотопного описания рельефа изображения является логическим продолжением предыдущей части третьего раздела. Данная модель основана на интерпретации архитектуры рельефа в виде комбинаторного объекта – U -связной трехмерной перестановки с повторениями в двоичном двумерном полиадическом пространстве. Такой объект формируется на основе трехмерной двоичной структуры, горизонтальные сечения которых рассматриваются как переста-

новки с повторениями в двумерном полиадическом пространстве с дополнительным ограничением на число позиций, на которых допускается появление единичных элементов.

Созданная модель позволяет:

– определить максимальное и минимальное количество разрядов, которое требуется затратить для взаимоднозначного описания архитектурного позиционирования высот рельефа изображения, в зависимости от динамических диапазонов элементов позиционирующих массивов и от характера связности изотопных уровней архитектуры (распределения количества позиций с запретом появления единичных значений по изотопным уровням архитектуры).

– количество комбинаторной избыточности, устраняющееся на основе архитектурного позиционирования высот мультиизотопного описания рельефа изображения с учетом одновременного учета ограничений на количество позиций допускающих появлению единичных элементов и ограничений на динамические диапазоны элементов ПМ.

Также в данном разделе обосновывается, что без учета ограничений на динамический диапазон элементов ПМ максимальное значение количества устраняемой избыточности достигается если в верхнем изотопном уровне содержится наибольшее количество высот рельефа. В этом случае максимальная степень сжатия будет равна 8 раз. Минимальное количество избыточности устраняется тогда, когда максимальное количество высот содержится в последнем U -м изотопном уровне, а в предыдущих уровнях содержится минимально допустимое количество высот.

РАЗДЕЛ 4

МЕТОД КОМПАКТНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ АРХИТЕКТУРЫ МУЛЬТИИЗОТОПНОГО ОПИСАНИЯ РЕЛЬЕФА ИЗОБРАЖЕНИЙ

4.1. Разработка нумерации архитектуры рельефа изображений

Для кодового представления рельефной модели изображения необходимо разработать метод кодирования изотопных структур. Причем для исключения потерь информации должно существовать взаимнооднозначное соответствие между кодовым эквивалентом C и множеством Ω_u , $u = \overline{1, U}$ высот рельефа изображения. Предлагается формировать кодовое представление на основе вычисления номера C конкретной архитектуры B в множестве $\Omega(B)$ допустимых трехмерных двоичных структур (ТДС).

Согласно определению 3.4 сформулируем следующее определение допустимого множества архитектур рельефа [11; 18].

Определение 4.1. Допустимое множество $\Omega(B)$ архитектур рельефа изображения формируется как допустимое количество U -связных трехмерных перестановок с повторениями в двоичном пространстве, для элементов $b_{ij}^{(u)}$ которых выполняется условие

$$b_{ij}^{(u)} \leq \varphi_{ij}'^{(u, c\bar{c})}, \quad (4.1)$$

где $\varphi_{ij}^{(u,cb)}$ – основание элемента $b_{ij}^{(u)}$, равное:

$$\varphi_{ij}^{(u,cb)} = \begin{cases} 1, \rightarrow b_{ij}^{(\xi)} = 0, \forall \xi, \xi = \overline{1, (u-1)}; \\ 0, \rightarrow b_{ij}^{(\xi)} = 1, \exists \xi, \xi = \overline{1, (u-1)}. \end{cases} \quad (4.2)$$

Перед тем, как определить номер архитектуры рельефа изображения, необходимо задать порядок следования ТДС в множестве $\Omega(B)$, т.е. определить лексикографию множества. Лексикография множества строится на основе **правила определения старшинства** ТДС между собой. Поскольку архитектуры рельефа изображения являются двоичными структурами, то старшей ТДС будет та, у которой в отличие от других трехмерных структур, в старшем элементе стоит единица

$$C_\eta < C_\theta, \text{ если выполняется } b_{ij}^{(u,\eta)} = 0 \text{ и } b_{ij}^{(u,\theta)} = 1, \quad (4.3)$$

где C_η, C_θ – номера соответственно для η -й и θ -й ТДС; $b_{ij}^{(u,\eta)}$, $b_{ij}^{(u,\theta)}$ – старшие u -ые элементы соответственно для η -й и θ -й ТДС.

Из анализа правила (4.3), что старшинство элемента, а, следовательно, и номер конкретной архитектуры зависит от порядка обхода элементов ТДС. Архитектура рельефа имеет трехмерную структуры. Отсюда *порядок обхода* определяется порядком следования элементов в изотопных уровнях, в строках и столбцах позиционирующего массива.

В соответствии с формированием связности изотопных уровней в архитектуре требуется *начинать обход изотопных уровней в направлении сверху вниз*. Это обусловлено тем, что запреты единичных позиций формируются по мере анализа очередного нижнего ПМ. В этом случае запрещенные позиции зависят от выше стоящих изотопных уровней архитекту-

ры (выражение 3.35). В противном случае нумерация ТДС будет проводиться без учета связности уровней архитектуры.

Направление обхода внутри позиционирующего массива выбирается из условия снижения времени обработки. Поскольку изображения разворачиваются в построчной развертке, то *предлагается* проводить анализ и обработки ПМ в направлении строк слева направо, а затем по столбцам сверху вниз.

Для предложенного направления обхода архитектуры рельефа изображения младший элемент будет соответствовать элементу ТДС с координатами $(1;1;1)$, а старший элемент с координатами $(U;m;n)$ (рис. 4.1)

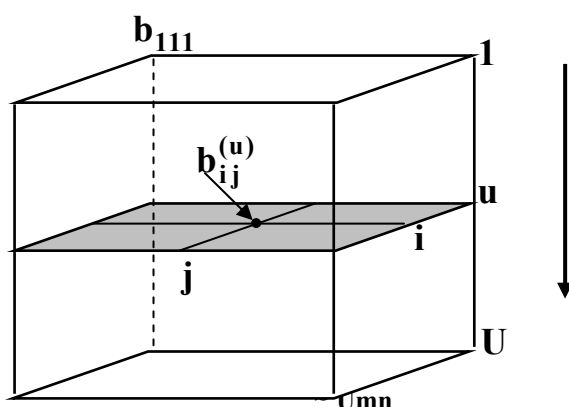


Рис. 4.1. Схема архитектуры рельефа изображения

С учетом предложенного направления обхода архитектуры рельефа лексикографическое правило (формула (4.3)) трактуется следующим образом.

Лексикографическое правило для связных архитектур рельефа изображения. Из двух ТДС больший номер будет иметь та архитектура $C_\eta < C_\theta$, для которой при равенстве q первых старших элементов

$$b_{k\gamma}^{(\xi,\eta)} = b_{k\gamma}^{(\xi,\theta)}, \quad (4.4)$$

где:

- для $\xi = u$ и $k = i$ выполняется $\gamma = \overline{(j+1), n}$;
- для $\xi = u$ и $k = \overline{(i+1), m}$ выполняется $\gamma = \overline{1, n}$;
- для $\xi = \overline{(u+1), U}$ выполняется $k = \overline{1, m}$, а $\gamma = \overline{1, n}$ –

будет выполняться неравенство

$$b_{ij}^{(u,\eta)} < b_{ij}^{(u,\theta)}. \quad (4.5)$$

Величина q равна $q = (n - j) + n(m - i) + mn(U - u)$.

Для нумерации множества $\Omega(B)$, т.е. вычисления номера допустимой ТДС сформулируем и докажем следующую теорему [11; 18].

Теорема о нумерации архитектур рельефа изображения. Для лексикографического правила, заданного выражениями (4.4), (4.5) номер C трехмерной двоичной связной структуры, элементы которой удовлетворяют неравенству (4.1), равен

$$C = \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij}^{(u)} Q_{ij}'^{(u,cb)}, \quad (4.6)$$

где $b_{ij}^{(u)}$ – $(i; j)$ -й элемент u -го позиционного массива архитектуры рельефа изображения; $m \times n$ – размер позиционирующей плоскости; U – количества изотопных уровней в архитектуре; $Q_{ij}'^{(u,cb)}$ – весовой коэффициент $(i; j)$ -го элемента для u -го позиционного массива с учетом связности элементов архитектуры

$$Q_{ij}'^{(u,cb)} = 2^{(q_{ij} - \overline{w_{ij}}) + (mn - \sum_{\xi=1}^{u-1} \sum_{\gamma=1}^{\xi-1} w_{\gamma})}; \quad (4.7)$$

q_{ij} – количество обработанных элементов для текущего изотопного уровня, т.е. количество элементов, принадлежащих текущему позиционирующему массиву и предшествующих $(i; j)$ -му элементу (рис 4.2):

$$q_{ij} = n(i-1) + (j-1); \quad (4.8)$$

w_{ij} – количество позиций в текущем ПМ, предшествующих $(i; j)$ -му элементу, и на которых запрещено размещение единичных элементов.

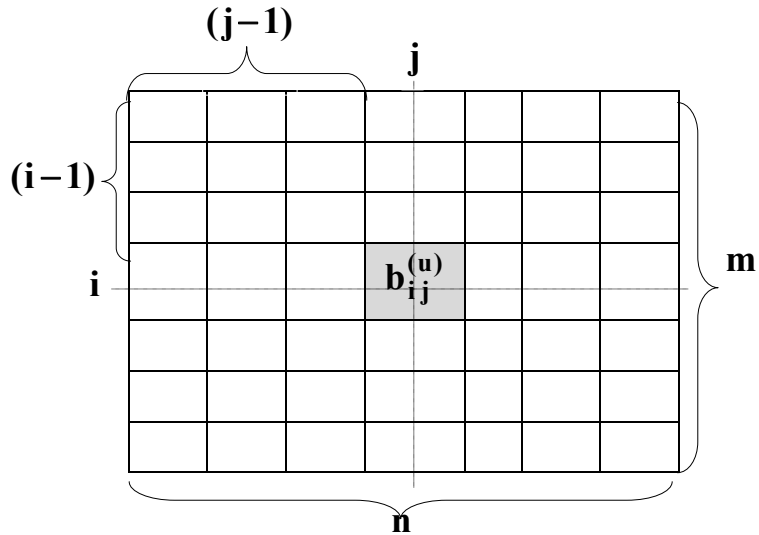


Рис. 4.2. Схема направления обработки ПМ

Доказательство. В соответствии с заданным лексикографическим правилом номер текущей ТДС определяется как количество допустимых трехмерных двоичных структур, которые ей предшествуют. При обработке $(i; j)$ -го элемента u -го позиционного массива имеем не полную ТДС, состоящую из $(u-1)$ -го полных верхних изотопных уровней, $(i-1)$ -го полных столбцов и $(j-1)$ -го элемента i -ой строки. Отсюда суммарное количество двоичных элементов, предшествующих $(i; j)$ -му элементу u -го позиционного массива равно $(q_{ij} + mn(u-1))$.

Тогда количество $Q'_{ij}{}^{(u,cb)}$ неполных ТДС находится по формуле

$$Q'_{ij}{}^{(u,cb)} = Q_{ij}{}^{(u)} \times Q(q_{ij}), \quad (4.9)$$

где $Q(q_{ij})$ – количество допустимых комбинаций, которое можно составить из q_{ij} элементов i -го позиционного массива ТДС; $Q_{ij}^{(u)}$ – количество допустимых неполных ТДС, состоящее из $(u-1)$ -го полных верхних изотопных уровней.

Согласно формуле (3.36) величина $Q_{ij}^{(u)}$ равна

$$Q_{ij}^{(u)} = \prod_{\xi=1}^{u-1} Q_{\xi/1, \dots, (\xi-1)}^{(2)}, \quad Q_{\xi/1, \dots, (\xi-1)}^{(2)} - \text{количество допустимых}$$

ПМ для ξ -го изотопного уровня

$$Q_{\xi/1, \dots, (\xi-1)}^{(2)} = 2^{\left(mn - \sum_{\gamma=1}^{\xi-1} w_{\gamma}\right)}. \quad (4.10)$$

Тогда имеем

$$Q_{ij}^{(u)} = \prod_{\xi=1}^{u-1} Q_{\xi/1, \dots, (\xi-1)}^{(2)} = \prod_{\xi=1}^{u-1} 2^{\left(mn - \sum_{\gamma=1}^{\xi-1} w_{\gamma}\right)} = 2^{\left(mn - \sum_{\xi=1}^{u-1} \sum_{\gamma=1}^{\xi-1} w_{\gamma}\right)}. \quad (4.11)$$

Определим значение величины $Q(q_{ij})$. Количество неполных ПМ в двоичном пространстве для известного количества \bar{w}_{ij} позиций, запрещающих появление единицы, равно

$$Q(q_{ij}) = 2^{(q_{ij} - \bar{w}_{ij})}. \quad (4.12)$$

Подставив в соотношение (4.9) выражения (4.11) и (4.12) получим

$$Q_{ij}^{(u, cv)} = 2^{\left(mn - \sum_{\xi=1}^{u-1} \sum_{\gamma=1}^{\xi-1} w_{\gamma}\right)} \times 2^{(q_{ij} - \bar{w}_{ij})} = 2^{\left(q_{ij} - \bar{w}_{ij}\right) + \left(mn - \sum_{\xi=1}^{u-1} \sum_{\gamma=1}^{\xi-1} w_{\gamma}\right)}$$

Данное выражение позволяет определить весовой коэффициент произвольного элемента ТДС. Просуммировав

взвешенные произведения $b_{ij}^{(u)} Q_{ij}'^{(u, c\phi)}$ по всем элементам трехмерной двоичной структуры, получим выражение (4.6).

Теорема доказана.

На основе доказанной теоремы следует, что количество V_C двоичных разрядов, отводимое на представление трехмерной двоичной структуры равно

$$V_C = \log_2 \left(\sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij}^{(u)} 2^{(q_{ij} - \bar{w}_{ij}) + (mn - \sum_{\xi=1}^{u-1} \sum_{\gamma=1}^{\xi-1} w_\gamma)} \right). \quad (4.13)$$

Причем поскольку выполняется неравенство

$$C \leq Q_2^{(c\phi)} - 1, \quad (4.14)$$

то

$$V_C < V_2^{(c\phi)} = \log_2 \left(2^{(Umn - \sum_{\gamma=1}^{U-1} \sum_{\xi=1}^{\gamma} w_\xi)} \right) = Umn - \sum_{\gamma=1}^{U-1} \sum_{\xi=1}^{\gamma} w_\xi, \quad (4.15)$$

где $V_2^{(c\phi)}$ – количество двоичных разрядов, отводимое на представление позиционирующей информации высот изображения, с учетом условия связности уровней архитектуры рельефа.

В зависимости от системы ограничений на динамические диапазоны в изотопных уровнях может выполняться следующее неравенство

$$V_\phi^{(c\phi)} \leq V_C < V_2^{(c\phi)}, \quad (4.16)$$

где $V_\phi^{(c\phi)}$ – количество двоичных разрядов, отводимое на представление позиционирующей информации высот изображения с учетом условия связности уровней архитектуры рельефа, в двоичном полиадическом пространстве, равное

$$V_{\varphi}^{(c\varphi)} = \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \log_2 \varphi_{ij}^{(u, c\varphi)}.$$

Для дополнительного уменьшения количества разрядов на представление кода-номера архитектуры рельефа изображения необходимо учитывать ограничения на динамический диапазон элементов в изотопных уровнях.

4.2. Разработка нумерации трехмерных связных двоичных структур в двумерном полиадическом пространстве

Определим множество $\Omega(B)_{\varphi}$, состоящее из архитектур рельефа с учетом условия связности и двумерных полиадических ограничений [11; 18; 83].

Определение 3.2. Допустимое множество $\Omega(B)_{\varphi}$ архитектур рельефа изображения формируется на основе U -связных трехмерных перестановок с повторениями в двумерном двоичном полиадическом пространстве, для элементов $b_{ij}^{(u)}$ которых выполняется условие

$$b_{ij}^{(u)} \leq \varphi_{ij}^{(u, c\varphi)}, \quad (4.17)$$

где $\varphi_{ij}^{(u, c\varphi)}$ – основание элемента $b_{ij}^{(u)}$ в двоичном двумерном полиадическом пространстве с учетом связности изотопных уровней архитектуры рельефа изображения

$$\varphi_{ij}^{(u, c\varphi)} = \begin{cases} 1, \rightarrow (\varphi_i^{(u)} \otimes \varphi_j^{(u)}) \otimes r_{ij}^{(u)} = 0; \\ 2, \rightarrow (\varphi_i^{(u)} \otimes \varphi_j^{(u)}) \otimes r_{ij}^{(u)} = 1, \end{cases} \quad (4.18)$$

где $(\varphi_i^{(u)} \otimes \varphi_j^{(u)}) \otimes r_{ij}^{(u)}$ – векторное произведение величин $\varphi_i^{(u)}$, $\varphi_j^{(u)}$ и $r_{ij}^{(u)}$; $\varphi_i^{(u)}$ – динамический диапазон элементов i -й

строки u -го ПМ (формула (3.24)); $\varphi_j^{(u)}$ – динамический диапазон элементов j -го столбца u -го ПМ (выражение (3.25)); $r_{ij}^{(u)}$ – значение признака связности для $(i; j)$ -й позиции u -го изотопного уровня

$$r_{ij}^{(u)} = \begin{cases} 1, \rightarrow b_{ij}^{(\xi)} = 0, \forall \xi, \xi = \overline{1, (u-1)}; \\ 0, \rightarrow b_{ij}^{(\xi)} = 1, \exists \xi, \xi = \overline{1, (u-1)}. \end{cases} \quad (4.19)$$

Величина $r_{ij}^{(u)}$ равна нулю, если для предыдущих уровней архитектуры на этой позиции находился единичный элемент. И наоборот $r_{ij}^{(u)} = 1$ когда для предыдущих уровней на этой позиции находились нулевые элементы.

На основе выражения (4.18) формируется система Φ оснований элементов ТДС с учетом условия связности в двумерных полиадических пространствах $\Phi = \{ \Phi_u \}$, $u = \overline{1, U}$, где Φ_u – система оснований элементов u -го позиционного массива архитектуры рельефа изображения в двумерном полиадическом пространстве φ , основания которого находятся по формуле (3.26):

$$\Phi_u = \begin{vmatrix} \varphi_{11}^{(u,cb)} & \dots & \varphi_{1j}^{(u,cb)} & \dots & \varphi_{1n}^{(u,cb)} \\ \varphi_{i1}^{(u,cb)} & \dots & \varphi_{ij}^{(u,cb)} & \dots & \varphi_{in}^{(u,cb)} \\ \varphi_{m1}^{(u,cb)} & \dots & \varphi_{mj}^{(u,cb)} & \dots & \varphi_{mn}^{(u,cb)} \end{vmatrix}.$$

Нумерацию элементов множества $\Omega(B)_\varphi$ предлагается проводить в соответствии с лексикографическим правилом, заданным выражениями (4.4) и (4.5). Направление обхода элементов принимается тем, что было в предыдущем случае. Чтобы построить систему правил для определения номера

архитектуры рельефа изображения сформулируем и докажем теорему.

Теорема о нумерации архитектур рельефа изображения в двумерном полиадическом пространстве. Номер $C_{\varphi, c\varphi}$ трехмерной двоичной структуры, элементы которой удовлетворяют условиям:

1) старшинство элементов ТДС задается выражениями (4.4), (4.5);

2) значения элементов ограничены в соответствии с неравенством (4.17);

3) запреты на позиции единиц определяются на основе системы (4.19) – равен

$$C_{\varphi, c\varphi} = \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij}^{(u)} Q_{ij}^{(u, c\varphi)}, \quad (4.20)$$

где $b_{ij}^{(u)}$ – (i, j) -й элемент u -го позиционного массива архитектуры рельефа изображения; $m \times n$ – размер позиционирующей плоскости; U – количества изотопных уровней в архитектуре; $Q_{ij}^{(u, c\varphi)}$ – весовой коэффициент (i, j) -го элемента для u -го позиционного массива с учетом связности элементов архитектуры в двумерном полиадическом пространстве

$$Q_{ij}^{(u, c\varphi)} = \prod_{\eta=1}^{j-1} \varphi_{i\eta}^{(u, c\varphi)} \prod_{k=1}^{i-1} \prod_{j=1}^n \varphi_{kj}^{(u, c\varphi)} \prod_{\gamma=1}^{u-1} \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(\gamma, c\varphi)}. \quad (4.21)$$

Доказательство. По аналогии с доказательством предыдущей теоремы определим значение номера C_{φ} как количество $Q(C)_{\varphi}^{(c\varphi)}$ допустимых трехмерных двоичных структур, предшествующих обрабатываемой архитектурной структуре. При этом текущий элемент $b_{ij}^{(u)}$ в соответствии с установ-

ленным лексикографическим правилом является старшим элементом трехмерной двоичной структуры. Тогда количество $q_{ij}^{(u)}$ элементов, предшествующих элементу $b_{ij}^{(u)}$ равно

$$q_{ij}^{(u)} = (j-1) + n(i-1) + mn(u-1), \quad (4.22)$$

где $mn(u-1)$ – суммарное количество двоичных элементов, содержащихся в $(u-1)$ -м верхних изотопных уровнях; $n(i-1)$ – суммарное количество элементов в $(i-1)$ -й строках u -го позиционного массива; $(j-1)$ – количество элементов для i -ой строки u -го позиционного массива, предшествующих j -му столбцу u -го ПМ.

Количество $Q_{ij}^{(u,cs)}$ не полных ТДС, составленных из $q_{ij}^{(u)}$ элементов, находится по формуле

$$Q_{ij}^{(u,cs)} = Q_{ij}^{(u,\varphi)} \times Q(\varphi, q_{ij}), \quad (4.23)$$

где $Q(\varphi, q_{ij})$ – количество допустимых комбинаций, которое можно составить из $((j-1) + n(i-1))$ элементов u -го позиционного массива ТДС; $Q_{ij}^{(u,\varphi)}$ – количество допустимых не полных ТДС, состоящее из $mn(u-1)$ двоичных элементов.

Для заданных систем Φ двумерных полиадических оснований с учетом связности изотопных уровней величины $Q(\varphi, q_{ij})$ и $Q_{ij}^{(u,\varphi)}$ соответственно равны:

$$Q(\varphi, q_{ij}) = \prod_{\eta=1}^{j-1} \varphi_{i\eta}^{(u,cs)} \prod_{k=1}^{i-1} \prod_{j=1}^n \varphi_{kj}^{(u,cs)}. \quad (4.24)$$

$$Q_{ij}^{(u,\varphi)} = \prod_{\gamma=1}^{u-1} \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(\gamma,cs)}. \quad (4.25)$$

Подставив в соотношение (4.23) выражения (4.24) и (4.25) получим

$$Q_{ij}^{(u,cb)} = \prod_{\eta=1}^{j-1} \varphi_{i\eta}^{(u,cb)} \prod_{k=1}^{i-1} \prod_{j=1}^n \varphi_{kj}^{(u,cb)} \prod_{\gamma=1}^{u-1} \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(\gamma,cb)}.$$

Данное выражение позволяет определить весовой коэффициент произвольного элемента ТДС. Просуммировав взвешенные произведения $b_{ij}^{(u)} Q_{ij}^{(u,cb)}$ по всем элементам трехмерной двоичной структуры, получим выражение (4.20).

Теорема доказана.

На основе доказанной теоремы вытекает следующее следствие.

Следствие 4.1. Значение кода-номера $C_{\varphi,cb}$ полученного для ТДС с учетом условия связности в двумерном полиадическом пространстве не будет превышать значения кодовых номеров C и C_{φ} , полученных для той же ТДС но предположение выполнения только соответственно условию связности и условию удовлетворения двумерным полиадическим ограничениям

$$C_{\varphi,cb} \leq C; \quad (4.26)$$

$$C_{\varphi,cb} \leq C_{\varphi}, \quad (4.27)$$

Доказательство. Распишем значение весового коэффициента $Q_{ij}^{(u,\varphi)}$ в соотношении (4.20) на основе формулы (4.21), и получим

$$C_{\varphi,cb} = \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij}^{(u)} \prod_{\eta=1}^{j-1} \varphi_{i\eta}^{(u,cb)} \prod_{k=1}^{i-1} \prod_{j=1}^n \varphi_{kj}^{(u,cb)} \prod_{\gamma=1}^{u-1} \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(\gamma,cb)}, \quad (4.28)$$

Запишем теперь значения оснований $\varphi_{ij}^{(u,cb)}$ с учетом со-

отношений для величин $\varphi_i^{(u)}$, $\varphi_j^{(u)}$ и $r_{ij}^{(u)}$, через величины $\varphi_{ij}^{(u)}$ (выражение (2.26)) и $\varphi_{ij}'^{(u,cb)}$: $\varphi_{ij}^{(u)} = (\varphi_i^{(u)} \otimes \varphi_j^{(u)})$ и $\varphi_{ij}'^{(u,cb)} = r_{ij}^{(u)} + 1$.

С учетом данных равенств система (4.18) примет вид

$$\varphi_{ij}^{(u,cb)} = \begin{cases} 1, \rightarrow (\varphi_{ij}^{(u)} - 1) \otimes (\varphi_{ij}'^{(u,cb)} - 1) = 0; \\ 2, \rightarrow (\varphi_{ij}^{(u)} - 1) \otimes (\varphi_{ij}'^{(u,cb)} - 1) = 1, \end{cases} \quad (4.29)$$

где $\varphi_{ij}^{(u)}$ – значение основания с учетом ограничений в двоичном полиадическом пространстве; $\varphi_{ij}'^{(u,cb)}$ – значение основания с учетом ограничений, задаваемых условием связности изотопных уровней; $\varphi_{ij}^{(u,cb)}$ – величина основания с одновременным учетом связности мультиизотопных уровней в двоичном полиадическом пространстве.

Поскольку величина весового коэффициента $Q_{ij}'^{(u,cb)}$ в формуле (4.6) определяется через значения оснований $\varphi_{ij}'^{(u,cb)}$, то код-номер C равен

$$C_{\varphi,cb} = \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij}^{(u)} \prod_{\eta=1}^{j-1} \varphi_{i\eta}'^{(u,cb)} \prod_{k=1}^{i-1} \prod_{j=1}^n \varphi_{kj}'^{(u,cb)} \prod_{\gamma=1}^{u-1} \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}'^{(\gamma,cb)}, \quad (4.30)$$

По аналогии значение кода-номера C_{φ} через основания $\varphi_{ij}^{(u)}$ находится по формуле (накопленное значение ТДС в двоичном полиадическом пространстве):

$$C_{\varphi} = \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij}^{(u)} \prod_{\eta=1}^{j-1} \varphi_{i\eta}^{(u)} \prod_{k=1}^{i-1} \prod_{j=1}^n \varphi_{kj}^{(u)} \prod_{\gamma=1}^{u-1} \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(\gamma)}, \quad (4.31)$$

Сравнивая выражение (4.28) с формулами (4.30) и (4.31) с учетом системы (4.29), связывающей величину $\varphi_{ij}^{(u,cb)}$ через основания $\varphi'_{ij}{}^{(u,cb)}$ и $\varphi_{ij}^{(u)}$, получаем неравенства (4.26) и (4.27).

Следствие доказано.

Количество $V(C_{\varphi,cb})$ разрядов на представление кода-номера ТДС в системе оснований Φ равно

$$V(C_{\varphi,cb}) = \log_2 \left(\sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij}^{(u)} \prod_{\eta=1}^{j-1} \varphi_{i\eta}^{(u,cb)} \prod_{k=1}^{i-1} \prod_{j=1}^n \varphi_{kj}^{(u,cb)} \prod_{\gamma=1}^{u-1} \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(\gamma,cb)} \right) \quad (3.32)$$

Согласно выражению (3.59) объем множества $\Omega(B)_\varphi$ равен $Q_\varphi^{(cb)} = \prod_{u=1}^U \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n ((\varphi_{ij}^{(u)} - 1) \otimes (\varphi'_{ij}{}^{(u,cb)} - 1) + 1)$.

Поскольку для кода-номера $C_{\varphi,cb}$ трехмерной двоичной структуры, принадлежащей множеству $\Omega(B)_\varphi$, выполняется неравенство

$$C_{\varphi,cb} \leq Q_\varphi^{(cb)} - 1, \quad (4.33)$$

то длина кодограммы будет ограничена сверху величиной

$$V(C_{\varphi,cb}) \leq V_\varphi^{(cb)} = \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \log_2 ((\varphi_{ij}^{(u)} - 1) \otimes (\varphi'_{ij}{}^{(u,cb)} - 1) + 1) \quad (4.34)$$

где $(\varphi_{ij}^{(u)} - 1) \otimes (\varphi'_{ij}{}^{(u,cb)} - 1)$ – векторное произведение величин $(\varphi_{ij}^{(u)} - 1)$ и $(\varphi'_{ij}{}^{(u,cb)} - 1)$:

$$(\varphi_{ij}^{(u)} - 1) \otimes (\varphi'_{ij}{}^{(u,cb)} - 1) = \begin{cases} 0, \rightarrow 0 \otimes 0; \\ 0, \rightarrow 0 \otimes 1; \\ 0, \rightarrow 1 \otimes 0; \\ 1, \rightarrow 1 \otimes 1. \end{cases} \quad (4.35)$$

Подлагрифмическая величина в соотношении (4.34) будет равна

$$\begin{aligned} \log_2(((\varphi_{ij}^{(u)} - 1) \otimes (\varphi'_{ij}{}^{(u,cb)} - 1)) + 1) = \\ = \begin{cases} 0, \rightarrow (\varphi_{ij}^{(u)} - 1) \otimes (\varphi'_{ij}{}^{(u,cb)} - 1) = 0; \\ 1, \rightarrow (\varphi_{ij}^{(u)} - 1) \otimes (\varphi'_{ij}{}^{(u,cb)} - 1) = 1. \end{cases} \end{aligned} \quad (4.36)$$

От значения величины $V_{\varphi}^{(cb)}$ зависит минимальный уровень степени сжатия изображения на основе формирования архитектуры рельефа изображения.

Тогда с учетом системы (4.36) максимальное значение кода-номера $V_{\varphi}^{(cb)}$ ТДС в пространстве системы оснований Φ (минимальное значение степени сжатия) зависит от:

1. Вектора \overline{W} распределения количества \overline{w}_u позиций с запретом единицы по изотопным уровням $\overline{W} = \{\overline{w}_1, \dots, \overline{w}_u, \dots, \overline{w}_U\}$, где \overline{w}_u – количество позиций, на которых запрещается появление единицы, для u -го позиционирующего массива (ПМ): $\overline{w}_u = \sum_{\xi=1}^{u-1} w_{\xi}$; w_{ξ} – количество единичных позиций в ξ -м ПМ.

2. Системы φ ограничений на динамические диапазоны для каждого изотопного уровня архитектуры.

Следовательно, уменьшение максимального значения кода-номера $C_{\varphi,cb}$ будет обеспечиваться при увеличении

количества позиций с запретом появления единичных элементов. Для этого необходимо согласно условию (3.54) расположить ξ_{max} -й ПМ с максимальным количеством w_{max} единичных элементов в верхнем уровне архитектуры, т.е.:

$$\xi_{max} = 1, \quad \xi_{max} = \xi \mid w_{\xi} = w_{max}, \quad (4.37)$$

где w_{max} – максимальное количество единичных элементов, содержащееся в одном из ПМ

$$w_{max} = \max_{1 \leq \xi \leq U} \{w_{\xi}\}. \quad (4.38)$$

С другой стороны такому распределению изотопных уровней свойственны два недостатка:

– согласно выражению (3.57) минимальное значение максимальной величины кода-номера будет ограничено снизу величиной, равной $(m n)$ бит;

– поскольку элементы первого (верхнего уровня) являются младшими, то их основания Φ_1 будут входить в состав весовых коэффициентов всех последующих элементов ТДС. Это приводит к увеличению значения кода-номера $C_{\varphi, св}$.

4.3. Структурное двоичное кодирование в непозиционном пространстве изотопных уровней архитектуры рельефа изображения

Для выхода из такой ситуации *предлагается* разработать кодирование ТДС с учетом особенностей построения архитектуры рельефа изображения. Для архитектур рельефа изображения соответствуют следующие свойства [13].

Свойство 1. Непозиционность изотопных уровней архитектуры. Данное свойство заключается в том, что порядок

расположения позиционирующих массивов (ПМ) не влияет на содержание восстанавливаемых фрагментов изображения.

Данное свойство базируется на том, что формирование позиционирующих массивов $B^{(u)}$ проводится взаимонезависимо от ПМ других уровней рельефа изображения. Каждый ПМ содержит позиционирующую информацию о высотах своего изотопного уровня. При этом позиционирующая информация позволяет определить непосредственные координаты конкретной высоты рельефа в фрагменте изображения.

Свойство 2. Взаимоисключаемость изотопных уровней архитектуры рельефа изображения. Такое свойство состоит в том, что позиционирующие массивы не имеют соответствующих позиций, на которых расположены единичные элементы.

В этом случае в каждой вертикали трехмерной двоичной структуры будет расположен только один единичный элемент

$$\sum_{u=1}^U b_{ij}^{(u)} = 1, \quad (4.39)$$

где $b_{ij}^{(u)}$ – $(i; j)$ -й элемент u -го позиционного массива архитектуры рельефа изображения; $\sum_{u=1}^U b_{ij}^{(u)}$ – сумма двоичных элементов на позиции $(i; j)$ по всем изотопным уровням архитектуры.

Свойство непозиционности позволяет провести переформатирование архитектуры рельефа изображения. Переформатирование проводится для того, чтобы максимальное значение кода-номера архитектуры рельефа не ограничивалось бы снизу величиной, равной $(m n)$ бит.

Переформатирование архитектуры рельефа изображения связано с выполнением следующих действий:

1) расположением изотопного уровня ξ , в котором содержится максимальное количество единичных элементов в нижний уровень ТДС

$$\xi_{\max} = U, \quad \xi_{\max} = \xi \mid w_{\xi} = w_{\max}, \quad (4.40)$$

где ξ_{\max} – индекс изотопного уровня определяется по формулам (4.37) и (4.38);

2) позиция ξ_{\max} -го уровня в ТДС заполняется нижним $(\xi_{\max} + 1)$ -м уровнем в результате сдвижки уровней с индексами $\xi = \overline{(\xi_{\max} + 1)}$, U на одну позицию вверх.

Недостаток данного переформатирования состоит в том, что для U -го ПМ, состоящего из старших элементов ТДС, увеличивается количество единичных элементов. Это приводит к увеличению количества слагаемых $b_{ij}^{(U)} Q_{ij}^{(U, cv)}$ не равных нулю. Отсюда повышается значение кода-номера $C_{\varphi, cv}$.

Для выхода из такой ситуации *предлагается* использовать свойство 2 архитектур рельефа изображения. На основе соотношения (4.39) существует возможность выразить элементы последнего изотопного уровня архитектуры через значения элементов вышестоящих уровней. Для этого используются следующая система [13; 18; 68]:

$$b_{ij}^{(U)} = \begin{cases} 0, \rightarrow \sum_{u=1}^{U-1} b_{ij}^{(u)} = 1; \\ 1, \rightarrow \sum_{u=1}^{U-1} b_{ij}^{(u)} = 0; \end{cases} \quad (4.41)$$

$$i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n},$$

где $b_{ij}^{(U)}$ – (i, j) -й элемент U -го ПМ; $\sum_{u=1}^{U-1} b_{ij}^{(u)}$ – сумма двоичных элементов на позиции (i, j) по $(U-1)$ -му изотопным уровням.

Выражение (4.41) позволяет определить элементы U -го изотопного уровня $b_{ij}^{(U)}$, $i=\overline{1, m}$, $j=\overline{1, n}$ на основе известных значений элементов $b_{ij}^{(\xi)}$ предыдущих уровней $\xi=\overline{1, (U-1)}$. Следовательно, для дополнительного снижения значения кода-номера трехмерной двоичной структуры *предлагается* проводить кодирование без учета элементов U -го изотопного уровня. Тогда старшими элементами будут элементы, принадлежащие $(U-1)$ -му позиционирующему массиву.

Значение кода-номера $C(U-1)_{\varphi, c\varphi}$ в этом случае будет равно

$$C(U-1)_{\varphi, c\varphi} = \sum_{u=1}^{U-1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij}^{(u)} \prod_{\eta=1}^{j-1} \varphi_{i\eta}^{(u, c\varphi)} \prod_{k=1}^{i-1} \prod_{j=1}^n \varphi_{kj}^{(u, c\varphi)} \prod_{\gamma=1}^{u-1} \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(\gamma, c\varphi)} \quad (4.42)$$

Минимальное значение $\Delta C(U)$, на которое уменьшается величина $C(U-1)_{\varphi, c\varphi}$, оценивается по формуле $\Delta C(U) = C_{\varphi, c\varphi} - C(U-1)_{\varphi, c\varphi} =$

$$= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij}^{(U)} \prod_{\eta=1}^{j-1} \varphi_{i\eta}^{(U, c\varphi)} \prod_{k=1}^{i-1} \prod_{j=1}^n \varphi_{kj}^{(U, c\varphi)} \prod_{\gamma=1}^{U-1} \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(\gamma, c\varphi)},$$

где $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij}^{(U)} \prod_{\eta=1}^{j-1} \varphi_{i\eta}^{(U, c\varphi)} \prod_{k=1}^{i-1} \prod_{j=1}^n \varphi_{kj}^{(U, c\varphi)} \prod_{\gamma=1}^{U-1} \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(\gamma, c\varphi)}$ –

величина, равная взвешенной сумме слагаемых, полученных для элементов U -го изотопного уровня.

Это позволяет сократить время обработки и повысить степень сжатия за счет исключения из обработки элементов

нижнего изотопного уровня и снижения величины весовых коэффициентов В

$$\frac{Q_{\varphi}^{(c\varphi)}}{Q_{mn}^{(U-1,\varphi)}} = \prod_{\eta=1}^{j-1} \varphi_{i\eta}^{(U,c\varphi)} \prod_{k=1}^{i-1} \prod_{j=1}^n \varphi_{kj}^{(U,c\varphi)} \prod_{\gamma=1}^{U-1} \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(\gamma,c\varphi)} \text{ раз, где}$$

$Q_{mn}^{(U-1,\varphi)}$ – значение весового коэффициента для элемента $b_{mn}^{(U-1)}$, являющегося самым старшим элементом в архитектуре без учета нижнего уровня.

Количество $Q(U-1)_{\varphi}^{(c\varphi)}$ ТДС без нижнего уровня оценивается по формуле

$$Q(U-1)_{\varphi}^{(c\varphi)} = \prod_{u=1}^{U-1} \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n (((\varphi_{ij}^{(u)} - 1) \otimes (\varphi'_{ij}{}^{(u,c\varphi)} - 1)) + 1). \quad (4.43)$$

Отсюда величина $\Delta V_{\varphi}^{(c\varphi)}$ дополнительного сокращения максимального количества разрядов на значение кода-номер находится по формуле

$$\begin{aligned} \Delta V_{\varphi}^{(c\varphi)} &= V_{\varphi}^{(c\varphi)} - V(U-1)_{\varphi}^{(c\varphi)} = \\ &= \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \log_2 (((\varphi_{ij}^{(u)} - 1) \otimes (\varphi'_{ij}{}^{(u,c\varphi)} - 1)) + 1) - \\ &- \sum_{u=1}^{U-1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \log_2 (((\varphi_{ij}^{(u)} - 1) \otimes (\varphi'_{ij}{}^{(u,c\varphi)} - 1)) + 1) = \\ &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \log_2 (((\varphi_{ij}^{(U)} - 1) \otimes (\varphi'_{ij}{}^{(U,c\varphi)} - 1)) + 1), \quad (4.44) \end{aligned}$$

где $V(U-1)_{\varphi}^{(c\varphi)}$ – максимальное количество разрядов, затрачиваемое на кодовое представление архитектуры рельефа изображения без учета нижнего уровня.

На основе изложенного материала можно сделать следующие выводы:

– обосновано наличие свойств непозиционности и взаимоисключаемости изотопных уровней архитектуры рельефа изображения;

– построено кодирование архитектур рельефа с учетом переформатирования уровней архитектуры и исключения из обработки позиционирующего массива, содержащего наибольшее количество единичных элементов.

4.4. Создание метода восстановления изображений на основе структурного двоичного декодирования архитектурных кодовых конструкций

Для того, чтобы на приемной стороне восстановление изображений проводилось с заданным уровнем достоверности (вплоть до беспогрешностного восстановления) необходимо показать, что на этапе структурного кодирования и декодирования в непозиционном пространстве архитектуры рельефа изображения погрешности не вносятся, т.е.:

$$\sigma = 0. \quad (4.45)$$

Тогда одновременно выполняются условия $C_{\varphi, cv} = f_k\{B\}$ и $B = f_d\{C_{\varphi, cv}\}$, где f_k, f_d – операторы соответственно для кодирования и декодирования структурных кодов в архитектурном пространстве.

Поэтому требуется доказать взаимнооднозначность структурного кодирования архитектуры рельефа изображения. В связи с этим сформулируем и докажем следующую теорему [12; 17].

Теорема о взаимнооднозначности структурного кодирования архитектуры рельефа изображения. Для выбранного лексикографического правила нумерации, заданных ограничений на:

1) количество \bar{w}_u позиций с запретом появления единицы

$$\bar{W} = \{\bar{w}_1, \dots, \bar{w}_u, \dots, \bar{w}_U\}, \quad (4.46)$$

где \bar{W} – вектор, состоящий из ограничений на количество позиций с запретом появления единиц; \bar{w}_u – количество позиций, на которых запрещается появление единицы, для u -го

позиционирующего массива (ПМ): $\bar{w}_u = \sum_{\xi=1}^{u-1} w_{\xi}$; w_{ξ} –

количество единичных позиций в ξ -м ПМ;

2) на динамические диапазоны элементов изотопных уровней (двумерные двоичные полиадические пространства)

$$\varphi_{ij}^{(u)} = \begin{cases} 1, \rightarrow \varphi_i^{(u)} \otimes \varphi_j^{(u)} = 0; \\ 2, \rightarrow \varphi_i^{(u)} \otimes \varphi_j^{(u)} = 1, \end{cases} \quad i=1, \bar{m}, \quad j=1, \bar{n}, \quad (4.47)$$

где $\varphi_{ij}^{(u)}$ – значение основания с учетом ограничений в двоичном полиадическом пространстве; $\varphi_i^{(u)} \otimes \varphi_j^{(u)}$ – векторное произведение величин $\varphi_i^{(u)}$ и $\varphi_j^{(u)}$.

Для трехмерной двоичной структуры можно сформировать только один код-номер $C_{\varphi, cv}$. Наоборот для заданных ограничений и по известному коду-номеру можно восстановить только одну архитектуру рельефа изображения.

Доказательство. Предположим противное, т.е. то, что найдется, как минимум, один элемент, для которого выполняется неравенство

$$b_{ij}^{(u)\bullet} \neq b_{ij}^{(u)}. \quad (4.48)$$

В этом случае как минимум две ТДС B и B^{\bullet} будут иметь одинаковое значение кода-номера $C_{\varphi, cv} = C_{\varphi, cv}^{\bullet}$:

$$C_{\varphi, c\vartheta} = \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij}^{(u)} \prod_{\eta=1}^{j-1} \varphi_{i\eta}^{(u, c\vartheta)} \prod_{k=1}^{i-1} \prod_{j=1}^n \varphi_{kj}^{(u, c\vartheta)} \prod_{\gamma=1}^{u-1} \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(\gamma, c\vartheta)}, \quad (4.49)$$

$$C_{\varphi, c\vartheta}^{\bullet} = \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij}^{(u)\bullet} \prod_{\eta=1}^{j-1} \varphi_{i\eta}^{(u, c\vartheta)} \prod_{k=1}^{i-1} \prod_{j=1}^n \varphi_{kj}^{(u, c\vartheta)} \prod_{\gamma=1}^{u-1} \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(\gamma, c\vartheta)}, \quad (4.50)$$

или с учетом выражения (3.19) соотношения (3.33) и (3.34) примут вид

$$C_{\varphi, c\vartheta} = \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij}^{(u)} Q_{ij}^{(u, c\vartheta)}, \quad (4.51)$$

$$C_{\varphi, c\vartheta}^{\bullet} = \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij}^{(u)\bullet} Q_{ij}^{(u, c\vartheta)}, \quad (4.52)$$

где $Q_{ij}^{(u, c\vartheta)}$ – весовой коэффициент $(i; j)$ -го элемента u -го позиционирующего массива.

Поскольку по предположению выполняется неравенство (4.48), то без потери общности можно допустить, что будет верно неравенство $b_{\alpha j}^{(u)\bullet} < b_{\alpha j}^{(u)}$, где $(\alpha; j)$ -я позиция старшего элемента u -го ПМ, для которого еще выполняется условие $b_{\alpha j}^{(u)\bullet} \neq b_{\alpha j}^{(u)}$.

Запишем выражения (4.51) и (4.52) в виде суммы двух слагаемых, одно из которых содержит $(\alpha; j)$ -й элемент u -го ПМ, а другое нет:

$$\begin{aligned} C_{\varphi, c\vartheta} = & \sum_{\xi=1}^{u-1} \sum_{i=1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{i\eta}^{(\xi)} Q_{i\eta}^{(\xi, c\vartheta)} + \sum_{i=1}^{\alpha-1} \sum_{\eta=1}^n b_{i\eta}^{(u)} Q_{i\eta}^{(u, c\vartheta)} + \sum_{\eta=1}^j b_{\alpha\eta}^{(u)} Q_{\alpha\eta}^{(u, c\vartheta)} + \\ & + \sum_{\eta=j+1}^n b_{\alpha\eta}^{(u)} Q_{\alpha\eta}^{(u, c\vartheta)} + \sum_{i=\alpha+1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{i\eta}^{(u)} Q_{i\eta}^{(u, c\vartheta)} + \sum_{\xi=u+1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{i\eta}^{(\xi)} Q_{i\eta}^{(\xi, c\vartheta)} \end{aligned}, \quad (4.53)$$

$$\begin{aligned}
 C_{\varphi, c\varphi}^{\bullet} = & \sum_{\xi=1}^{u-1} \sum_{i=1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{i\eta}^{(\xi)\bullet} Q_{i\eta}^{(\xi, c\varphi)} + \sum_{i=1}^{\alpha-1} \sum_{\eta=1}^n b_{i\eta}^{(u)\bullet} Q_{i\eta}^{(u, c\varphi)} + \sum_{\eta=1}^j b_{\alpha\eta}^{(u)\bullet} Q_{\alpha\eta}^{(u, c\varphi)} + \\
 & + \sum_{\eta=j+1}^n b_{\alpha\eta}^{(u)} Q_{\alpha\eta}^{(u, c\varphi)} + \sum_{i=\alpha+1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{i\eta}^{(u)} Q_{i\eta}^{(u, c\varphi)} + \sum_{\xi=u+1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{i\eta}^{(\xi)} Q_{i\eta}^{(\xi, c\varphi)} \\
 & . \quad (4.54)
 \end{aligned}$$

Вычтем от левой и правой частей выражения (4.53) соответствующие части соотношения (4.54), и получим

$$\begin{aligned}
 C_{\varphi, c\varphi} - C_{\varphi, c\varphi}^{\bullet} = & \left(\sum_{\xi=1}^{u-1} \sum_{i=1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{i\eta}^{(\xi)} Q_{i\eta}^{(\xi, c\varphi)} + \sum_{i=1}^{\alpha-1} \sum_{\eta=1}^n b_{i\eta}^{(u)} Q_{i\eta}^{(u, c\varphi)} + \right. \\
 & + \sum_{\eta=1}^j b_{\alpha\eta}^{(u)} Q_{\alpha\eta}^{(u, c\varphi)} - \sum_{\xi=1}^{u-1} \sum_{i=1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{i\eta}^{(\xi)\bullet} Q_{i\eta}^{(\xi, c\varphi)} + \sum_{i=1}^{\alpha-1} \sum_{\eta=1}^n b_{i\eta}^{(u)\bullet} Q_{i\eta}^{(u, c\varphi)} + \\
 & + \sum_{\eta=1}^j b_{\alpha\eta}^{(u)\bullet} Q_{\alpha\eta}^{(u, c\varphi)} \left. \right) + \left(\sum_{\eta=j+1}^n b_{\alpha\eta}^{(u)} Q_{\alpha\eta}^{(u, c\varphi)} + \sum_{i=\alpha+1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{i\eta}^{(u)} Q_{i\eta}^{(u, c\varphi)} + \right. \\
 & + \sum_{\xi=u+1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{i\eta}^{(\xi)} Q_{i\eta}^{(\xi, c\varphi)} - \sum_{\eta=j+1}^n b_{\alpha\eta}^{(u)} Q_{\alpha\eta}^{(u, c\varphi)} + \\
 & \left. + \sum_{i=\alpha+1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{i\eta}^{(u)} Q_{i\eta}^{(u, c\varphi)} + \sum_{\xi=u+1}^U \sum_{i=1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{i\eta}^{(\xi)} Q_{i\eta}^{(\xi, c\varphi)} \right).
 \end{aligned}$$

В соответствии с предположением $C_{\varphi, c\varphi} = C_{\varphi, c\varphi}^{\bullet}$, то

$$\begin{aligned}
 0 = & \sum_{\xi=1}^{u-1} \sum_{i=1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{i\eta}^{(\xi)} Q_{i\eta}^{(\xi, c\varphi)} + \sum_{i=1}^{\alpha-1} \sum_{\eta=1}^n b_{i\eta}^{(u)} Q_{i\eta}^{(u, c\varphi)} + \sum_{\eta=1}^j b_{\alpha\eta}^{(u)} Q_{\alpha\eta}^{(u, c\varphi)} - \\
 & - \sum_{\xi=1}^{u-1} \sum_{i=1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{i\eta}^{(\xi)\bullet} Q_{i\eta}^{(\xi, c\varphi)} + \sum_{i=1}^{\alpha-1} \sum_{\eta=1}^n b_{i\eta}^{(u)\bullet} Q_{i\eta}^{(u, c\varphi)} + \sum_{\eta=1}^j b_{\alpha\eta}^{(u)\bullet} Q_{\alpha\eta}^{(u, c\varphi)}
 \end{aligned}$$

Или

$$0 = \sum_{\eta=1}^j (b_{\alpha\eta}^{(u)} - b_{\alpha\eta}^{(u)\bullet}) Q_{\alpha\eta}^{(u, c\varphi)} + \sum_{i=1}^{\alpha-1} \sum_{\eta=1}^n (b_{i\eta}^{(u)} - b_{i\eta}^{(u)\bullet}) Q_{i\eta}^{(u, c\varphi)} +$$

$$+ \sum_{\xi=1}^{u-1} \sum_{i=1}^m \sum_{\eta=1}^n (b_{i\eta}^{(\xi)} - b_{i\eta}^{(\xi)\bullet}) Q_{i\eta}^{(\xi, c\vartheta)}$$

Перенесем слагаемое $(b_{\alpha j}^{(u)} - b_{\alpha j}^{(u)\bullet}) Q_{\alpha j}^{(u, c\vartheta)}$, содержащее старший элемент неполной структуры в левую часть. Тогда последнее соотношение переписывается в виде

$$\begin{aligned} (b_{\alpha j}^{(u)} - b_{\alpha j}^{(u)\bullet}) Q_{\alpha j}^{(u, c\vartheta)} &= \sum_{\eta=1}^{j-1} (b_{\alpha\eta}^{(u)} - b_{\alpha\eta}^{(u)\bullet}) Q_{\alpha\eta}^{(u, c\vartheta)} + \\ &+ \sum_{i=1}^{\alpha-1} \sum_{\eta=1}^n (b_{i\eta}^{(u)} - b_{i\eta}^{(u)\bullet}) Q_{i\eta}^{(u, c\vartheta)} + \sum_{\xi=1}^{u-1} \sum_{i=1}^m \sum_{\eta=1}^n (b_{i\eta}^{(\xi)} - b_{i\eta}^{(\xi)\bullet}) Q_{i\eta}^{(\xi, c\vartheta)} \end{aligned} \quad (4.55)$$

В соответствии с предположением $b_{\alpha j}^{(u)\bullet} < b_{\alpha j}^{(u)}$ для левой части соотношения (4.55) выполняется неравенство

$$(b_{\alpha j}^{(u)} - b_{\alpha j}^{(u)\bullet}) Q_{\alpha j}^{(u, c\vartheta)} > Q_{\alpha j}^{(u, c\vartheta)}. \quad (4.56)$$

С другой стороны величина $Q_{\alpha j}^{(u, c\vartheta)}$ по определению является количеством неполных трехмерных структур, состоящих из $mn(u-1) + n(\alpha-1) + (j-1)$ элементов. Код-номер для данных элементов равен правой части выражения (4.55). Поэтому должно выполняться неравенство

$$\begin{aligned} Q_{\alpha j}^{(u, c\vartheta)} &> \sum_{\eta=1}^{j-1} (b_{\alpha\eta}^{(u)} - b_{\alpha\eta}^{(u)\bullet}) Q_{\alpha\eta}^{(u, c\vartheta)} + \\ &+ \sum_{i=1}^{\alpha-1} \sum_{\eta=1}^n (b_{i\eta}^{(u)} - b_{i\eta}^{(u)\bullet}) Q_{i\eta}^{(u, c\vartheta)} + \\ &+ \sum_{\xi=1}^{u-1} \sum_{i=1}^m \sum_{\eta=1}^n (b_{i\eta}^{(\xi)} - b_{i\eta}^{(\xi)\bullet}) Q_{i\eta}^{(\xi, c\vartheta)}. \end{aligned} \quad (4.57)$$

Данный результат противоречит неравенству (4.56). Значит, выполняется условие $b_{\alpha j}^{(u)\bullet} = b_{\alpha j}^{(u)}$. Следовательно, для

трехмерной двоичной структуры в пространстве Φ можно сформировать только один код-номер $C_{\varphi, c\varphi}$. И наоборот по значению кода-номера $C_{\varphi, c\varphi}$ и заданных ограничений на значения двоичных элементов можно восстановить только одну ТДС.

Теорема доказана.

Из доказанной теоремы следует, что:

– структурное кодирование в непозиционном архитектурном пространстве рельефа изображения является взаимнооднозначным;

– для безпогрешностного восстановления исходных ТДС необходимой и достаточной информацией является значение кода-номера $C_{\varphi, c\varphi}$ и система оснований Φ .

Для получения элементов ТДС сформулируем и докажем следующую теорему [12; 17].

Теорема о восстановлении архитектуры рельефа изображения.

Исходную трехмерную двоичную структуру $B = \{B^{(u)}\}$, $u = \overline{1, U}$, элементы которой удовлетворяют ограничениям (4.46) и (4.47) можно **без внесения погрешности** восстановить на основе значений кода-номера $C_{\varphi, c\varphi}$, систем оснований двумерного полиадического пространства $\{\varphi_{ij}^{(u)}\}$, $u = \overline{1, U}$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$ и вектора $\overline{W} = \{\overline{w}_1, \dots, \overline{w}_u, \dots, \overline{w}_U\}$ ограничений на количество позиций с запретом появления единиц, по системе выражений

$$b_{ij}^{(u)} = \left[\frac{C_{\varphi, c\varphi}}{Q_{ij}^{(u, c\varphi)}} \right] - \left[\frac{C_{\varphi, c\varphi}}{\varphi_{i\eta}^{(u, c\varphi)} Q_{ij}^{(u, c\varphi)}} \right] \varphi_{i\eta}^{(u, c\varphi)}; \quad (4.58)$$

$$Q_{ij}^{(u, cv)} = \prod_{\eta=1}^{j-1} \varphi_{i\eta}^{(u, cv)} \prod_{k=1}^{i-1} \prod_{j=1}^n \varphi_{kj}^{(u, cv)} \prod_{\gamma=1}^{u-1} \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(\gamma, cv)}, \quad (4.59)$$

где $b_{ij}^{(u)}$ – (i, j) -й элемент u -го уровня архитектуры рельефа изображения; $\varphi_{ij}^{(u, cv)}$ – величина основания элемента $b_{ij}^{(u)}$ с одновременным учетом связности мультиизотопных уровней в двоичном полиадическом пространстве

$$\varphi_{ij}^{(u, cv)} = \begin{cases} 1, \rightarrow (\varphi_{ij}^{(u)} - 1) \otimes (\varphi'_{ij}^{(u, cv)} - 1) = 0; \\ 2, \rightarrow (\varphi_{ij}^{(u)} - 1) \otimes (\varphi'_{ij}^{(u, cv)} - 1) = 1, \end{cases} \quad (4.60)$$

$\varphi_{ij}^{(u)}$ – значение основания с учетом ограничений в двоичном полиадическом пространстве; $\varphi'_{ij}^{(u, cv)}$ – значение основания с учетом ограничений, задаваемых условием связности изотопных уровней; $Q_{ij}^{(u, cv)}$ – весовой коэффициент элемента $b_{ij}^{(u)}$.

Доказательство. Распишем на основе формулы (4.49) значение кода-номера $C_{\varphi, cv}$ как три слагаемых:

– первое слагаемое содержит элементы, предшествующие (i, j) -му элементу u -го уровня ТДС:

$$\sum_{\xi=1}^{u-1} \sum_{k=1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(\xi)} Q_{k\eta}^{(\xi, cv)} + \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(u)} Q_{k\eta}^{(u, cv)} + \sum_{\eta=1}^{j-1} b_{i\eta}^{(u)} Q_{i\eta}^{(u, cv)};$$

– вторым слагаемым является взвешенное произведение $b_{ij}^{(u)} Q_{ij}^{(u, cv)}$;

– третье слагаемое формируется на основе более старших элементов ТДС, чем элемент $b_{ij}^{(u)}$.

Тогда величина $C_{\varphi, cv}$ равна

$$\begin{aligned}
 C_{\varphi, c\vartheta} = & \sum_{\xi=1}^{u-1} \sum_{k=1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(\xi)} Q_{k\eta}^{(\xi, c\vartheta)} + \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(u)} Q_{k\eta}^{(u, c\vartheta)} + \sum_{\eta=1}^{j-1} b_{i\eta}^{(u)} Q_{i\eta}^{(u, c\vartheta)} + \\
 & + b_{ij}^{(u)} Q_{ij}^{(u, c\vartheta)} + \sum_{\eta=j+1}^n b_{i\eta}^{(u)} Q_{i\eta}^{(u, c\vartheta)} + \sum_{k=i+1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(u)} Q_{k\eta}^{(u, c\vartheta)} + \\
 & + \sum_{\xi=u+1}^U \sum_{k=1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(\xi)} Q_{k\eta}^{(\xi, c\vartheta)}, \quad (4.61)
 \end{aligned}$$

Заменив в соотношении (4.58) величину $C_{\varphi, c\vartheta}$ выражением (4.61), получим

$$\begin{aligned}
 b_{ij}^{(u)} = & \left[\frac{\sum_{\xi=1}^{u-1} \sum_{k=1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(\xi)} Q_{k\eta}^{(\xi, c\vartheta)} + \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(u)} Q_{k\eta}^{(u, c\vartheta)} + \sum_{\eta=1}^{j-1} b_{i\eta}^{(u)} Q_{i\eta}^{(u, c\vartheta)}}{Q_{ij}^{(u, c\vartheta)}} + \right. \\
 & \left. + \frac{b_{ij}^{(u)} Q_{ij}^{(u, c\vartheta)}}{Q_{ij}^{(u, c\vartheta)}} + \right. \\
 & \left. + \frac{\sum_{\eta=j+1}^n b_{i\eta}^{(u)} Q_{i\eta}^{(u, c\vartheta)} + \sum_{k=i+1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(u)} Q_{k\eta}^{(u, c\vartheta)} + \sum_{\xi=u+1}^U \sum_{k=1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(\xi)} Q_{k\eta}^{(\xi, c\vartheta)}}{Q_{ij}^{(u, c\vartheta)}} \right] - \\
 & - \left[\frac{\sum_{\xi=1}^{u-1} \sum_{k=1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(\xi)} Q_{k\eta}^{(\xi, c\vartheta)} + \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(u)} Q_{k\eta}^{(u, c\vartheta)} + \sum_{\eta=1}^{j-1} b_{i\eta}^{(u)} Q_{i\eta}^{(u, c\vartheta)}}{\varphi_{i\eta}^{(u, c\vartheta)} Q_{ij}^{(u, c\vartheta)}} + \right. \\
 & \left. + \frac{b_{ij}^{(u)} Q_{ij}^{(u, c\vartheta)}}{\varphi_{i\eta}^{(u, c\vartheta)} Q_{ij}^{(u, c\vartheta)}} + \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \left(\sum_{\eta=j+1}^n b_{i\eta}^{(u)} Q_{i\eta}^{(u,cb)} + \sum_{k=i+1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(u)} Q_{k\eta}^{(u,cb)} + \right. \\
 & \left. + \sum_{\xi=u+1}^U \sum_{k=1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(\xi)} Q_{k\eta}^{(\xi,cb)} \right) / \varphi_{i\eta}^{(u,cb)} Q_{ij}^{(u,cb)}] \varphi_{i\eta}^{(u,cb)}
 \end{aligned}$$

Поскольку выполняются следующие неравенства:

$$\begin{aligned}
 Q_{ij}^{(u,cb)} & > \sum_{\xi=1}^{u-1} \sum_{k=1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(\xi)} Q_{k\eta}^{(\xi,cb)} + \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(u)} Q_{k\eta}^{(u,cb)} + \\
 & + \sum_{\eta=1}^{j-1} b_{i\eta}^{(u)} Q_{i\eta}^{(u,cb)}
 \end{aligned}$$

$$\varphi_{i\eta}^{(u,cb)} Q_{ij}^{(u,cb)} > b_{ij}^{(u)} Q_{ij}^{(u,cb)} -$$

то

$$\begin{aligned}
 & b_{ij}^{(u)} = [b_{ij}^{(u)} + \\
 & + \left(\sum_{\eta=j+1}^n b_{i\eta}^{(u)} Q_{i\eta}^{(u,cb)} + \sum_{k=i+1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(u)} Q_{k\eta}^{(u,cb)} + \right. \\
 & + \sum_{\xi=u+1}^U \sum_{k=1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(\xi)} Q_{k\eta}^{(\xi,cb)} \left. \right) / Q_{ij}^{(u,cb)}] - \\
 & - \left[\left(\sum_{\eta=j+1}^n b_{i\eta}^{(u)} Q_{i\eta}^{(u,cb)} + \sum_{k=i+1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(u)} Q_{k\eta}^{(u,cb)} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \sum_{\xi=u+1}^U \sum_{k=1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(\xi)} Q_{k\eta}^{(\xi,cb)} \right) / \left(\varphi_{i\eta}^{(u,cb)} Q_{ij}^{(u,cb)} \right) \right] \times \varphi_{i\eta}^{(u,cb)} \quad (4.62)
 \end{aligned}$$

С учетом следующих соотношений:

– для $\eta = \overline{(j+1), n}$

$$\begin{aligned}
 Q_{i\eta}^{(u,cb)} & = \prod_{\ell=j+1}^{\eta-1} \varphi_{i\ell}^{(u,cb)} \prod_{\eta=1}^{j-1} \varphi_{i\eta}^{(u,cb)} \prod_{k=1}^{i-1} \prod_{j=1}^n \varphi_{kj}^{(u,cb)} \prod_{\gamma=1}^{u-1} \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(\gamma,cb)} = \\
 & = Q_{ij}^{(u,cb)} \prod_{\ell=j+1}^{\eta-1} \varphi_{i\ell}^{(u,cb)};
 \end{aligned}$$

– для $k = \overline{(i+1), m}$, $\eta = \overline{1, n}$

$$\begin{aligned}
 Q_{k\eta}^{(u, c\vartheta)} &= \prod_{\ell=1}^{\eta-1} \varphi_{k\ell}^{(u, c\vartheta)} \prod_{\zeta=i+1}^{k-1} \prod_{\ell=1}^n \varphi_{k j}^{(u, c\vartheta)} \prod_{\ell=j+1}^n \varphi_{i\ell}^{(u, c\vartheta)} \prod_{\ell=1}^{j-1} \varphi_{i\ell}^{(u, c\vartheta)} \times \\
 &\times \prod_{\zeta=1}^{i-1} \prod_{j=1}^n \varphi_{\zeta j}^{(u, c\vartheta)} \times \prod_{\gamma=1}^{u-1} \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{i j}^{(\gamma, c\vartheta)} = Q_{i j}^{(u, c\vartheta)} \times \\
 &\times \prod_{\ell=1}^{\eta-1} \varphi_{k\ell}^{(u, c\vartheta)} \prod_{\zeta=i+1}^{k-1} \prod_{\ell=1}^n \varphi_{k j}^{(u, c\vartheta)} \prod_{\ell=j+1}^n \varphi_{i\ell}^{(u, c\vartheta)}
 \end{aligned}$$

– для $\xi = \overline{(u+1), U}$, $k = \overline{1, m}$, $\eta = \overline{1, n}$

$$\begin{aligned}
 Q_{k\eta}^{(\xi, c\vartheta)} &= \prod_{\ell=1}^{\eta-1} \varphi_{k\ell}^{(\xi, c\vartheta)} \prod_{\zeta=1}^{k-1} \prod_{j=1}^n \varphi_{\zeta j}^{(\xi, c\vartheta)} \prod_{\gamma=u+1}^{\xi-1} \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{i j}^{(\gamma, c\vartheta)} \times \\
 &\times \prod_{\zeta=i+1}^m \prod_{\ell=1}^n \varphi_{k j}^{(u, c\vartheta)} \prod_{\ell=j+1}^n \varphi_{i\ell}^{(u, c\vartheta)} \prod_{\ell=1}^{j-1} \varphi_{i\ell}^{(u, c\vartheta)} \times \\
 &\times \prod_{\zeta=1}^{i-1} \prod_{j=1}^n \varphi_{\zeta j}^{(u, c\vartheta)} \prod_{\gamma=1}^{u-1} \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{i j}^{(\gamma, c\vartheta)} = \\
 &= Q_{i j}^{(u, c\vartheta)} \prod_{\ell=1}^{\eta-1} \varphi_{k\ell}^{(\xi, c\vartheta)} \prod_{\zeta=1}^{k-1} \prod_{j=1}^n \varphi_{\zeta j}^{(\xi, c\vartheta)} \times \\
 &\times \prod_{\gamma=u+1}^{\xi-1} \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{i j}^{(\gamma, c\vartheta)} \prod_{\zeta=i+1}^m \prod_{\ell=1}^n \varphi_{k j}^{(u, c\vartheta)} \prod_{\ell=j+1}^n \varphi_{i\ell}^{(u, c\vartheta)};
 \end{aligned}$$

С учетом данных соотношения формула (4.62) примет
ВИД

$$\begin{aligned}
 b_{i j}^{(u)} &= b_{i j}^{(u)} + \sum_{\eta=j+1}^n b_{i\eta}^{(u)} \prod_{\ell=j+1}^{\eta-1} \varphi_{i\ell}^{(u, c\vartheta)} + \\
 &+ \sum_{k=i+1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(u)} \left(\prod_{\ell=1}^{\eta-1} \varphi_{k\ell}^{(u, c\vartheta)} \prod_{\zeta=i+1}^{k-1} \prod_{\ell=1}^n \varphi_{k j}^{(u, c\vartheta)} \prod_{\ell=j+1}^n \varphi_{i\ell}^{(u, c\vartheta)} \right) +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{\xi=u+1}^U \sum_{k=1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(\xi)} \left(\prod_{\ell=1}^{\eta-1} \varphi_{k\ell}^{(\xi, c\vartheta)} \right) \prod_{\zeta=1}^{k-1} \prod_{j=1}^n \varphi_{\zeta j}^{(\xi, c\vartheta)} \times \\
 & \times \prod_{\gamma=u+1}^{\xi-1} \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(\gamma, c\vartheta)} \times \\
 & \times \prod_{\zeta=i+1}^m \prod_{\ell=1}^n \varphi_{k j}^{(u, c\vartheta)} \prod_{\ell=j+1}^n \varphi_{i\ell}^{(u, c\vartheta)} - \sum_{\eta=j+1}^n b_{i\eta}^{(u)} \prod_{\ell=j+1}^{\eta-1} \varphi_{i\ell}^{(u, c\vartheta)} - \\
 & - \sum_{k=i+1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(u)} \left(\prod_{\ell=1}^{\eta-1} \varphi_{k\ell}^{(u, c\vartheta)} \prod_{\zeta=i+1}^{k-1} \prod_{\ell=1}^n \varphi_{k j}^{(u, c\vartheta)} \prod_{\ell=j+1}^n \varphi_{i\ell}^{(u, c\vartheta)} \right) - \\
 & - \sum_{\xi=u+1}^U \sum_{k=1}^m \sum_{\eta=1}^n b_{k\eta}^{(\xi)} \left(\prod_{\ell=1}^{\eta-1} \varphi_{k\ell}^{(\xi, c\vartheta)} \prod_{\zeta=1}^{k-1} \prod_{j=1}^n \varphi_{\zeta j}^{(\xi, c\vartheta)} \prod_{\gamma=u+1}^{\xi-1} \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(\gamma, c\vartheta)} \right) \times \\
 & \times \prod_{\zeta=i+1}^m \prod_{\ell=1}^n \varphi_{k j}^{(u, c\vartheta)} \prod_{\ell=j+1}^n \varphi_{i\ell}^{(u, c\vartheta)} = b_{ij}^{(u)}.
 \end{aligned}$$

Следовательно, соотношения (4.58) и (4.59) обеспечивают восстановление исходных элементов архитектуры рельефа изображения без внесения погрешности.

Теорема доказана.

На основе доказанной теоремы построены системы выражений, обеспечивающие восстановление архитектуры рельефа изображения. Архитектура содержит информацию о позиционировании высот h_u рельефа в изображении. Поэтому для восстановления исходного изображения с учетом непозиционности мультиизотопных уровней на основе полученных ТДС требуется организовать расстановку высот рельефа на их исходные позиции. Для этого предлагается использовать следующие системы выражений:

$$a_{ij} = h_{ij}^{(u)}, \text{ если } b_{ij}^{(u)} = 1, u = \overline{1, U}, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}, \quad (4.63)$$

где a_{ij} – $(i; j)$ -й элемент изображения; $h_{ij}^{(u)}$ – $(i; j)$ -я высота u -го изотопного уровня рельефа изображения.

При этом согласно теоремы о взаимнооднозначности информация о позиционировании высот рельефа восстанавливается без внесения погрешности. Отсюда следует, что расстановка высот проводится на исходные позиции в изображении. Поэтому изображение получается на приемной стороне без потери информации.

Таким образом, разработано взаимнооднозначное восстановление изображений на основе структурного декодирования в непозиционном архитектурном пространстве рельефа.

Резюме

В данном разделе предложено двоичное позиционное структурное кодирование архитектур рельефа с учетом условия связности. Сжатие трехмерных двоичных структур достигается за счет сокращения комбинаторной избыточности, вызванной наличием на каждом изотопном уровне позиций с запретом появления единиц. Недостатки такого представления состоят в том, что:

– степень компрессии зависит от количества изотопных уровней (с ростом количества уровней коэффициент сжатия снижается) и от распределения количества позиций с запретом единиц по уровням архитектуры (чем больше количество запретов для старших изотопных уровней, тем меньше степень сжатия);

– максимальное значение степени сжатия не превышает 8 раз.

Также описывается разработанная нумерация трехмерных двоичных структур с учетом связности изотопных уров-

ней рельефа изображения в двумерном полиадическом пространстве. Отличительные особенности нумерации состоят в:

1) построении лексикографического правила, определяющего старшинство допустимых ТДС, учитывая что:

– обход изотопных уровней проводится в направлении сверху вниз. Это позволяет формировать весовые коэффициенты по мере накапливания количества позиций с запретом появления единиц;

– обход позиционирующих массивов осуществляется в направлении строк слева направо, а затем по столбцам сверху вниз. Это позволяет анализировать изотопные уровни архитектуры в направлении строчной развертки. При этом сокращается время обработки;

2) элементы трехмерной двоичной структуры одновременно удовлетворяют ограничениям относительно позиций с запретом единичных значений и ограничениям на динамический диапазон, определяемыми двумерным полиадическим пространством;

3) нумерации подлежат U -связные трехмерные перестановки с повторениями в двумерном двоичном полиадическом пространстве.

Такому представлению свойственно противоречие:

1) с одной стороны для увеличения количества позиций с запретом единичных элементов требуется в верхнем уровне архитектуры размещать ПМ с наибольшим количеством единиц;

2) с другой стороны такому распределению изотопных уровней свойственны два недостатка:

– минимальное значение максимальной величины кода-номера будет ограничено снизу величиной, равной (mn) бит;

– поскольку элементы первого (верхнего уровня) являются младшими, то их основания Φ_1 будут входить в состав

весовых коэффициентов всех последующих элементов ТДС. Это приводит к увеличению значения кода-номера $C_{ф,св}$.

Еще одним результатом, полученным в данном разделе является построение структурного кодирования в непозиционном архитектурном пространстве мультиизотопного рельефа изображения. Кодирование базируется на:

1) переформатировании архитектуры рельефа изображения, основанного на свойствах непозиционности и взаимоисключаемости изотопных уровней. Данные свойства позволяют:

– перераспределять позиционирующие массивы, не влияя на правильность распределения высот рельефа в изображении. Это предоставляет возможность разместить позиционирующий массив с наибольшим количеством единиц на нижнем уровне архитектуры. Отсюда снижаются значения весовых коэффициентов для младших элементов ТДС;

– заменить информацию о нижнем позиционирующем массиве информацией о верхних ПМ. Это позволяет исключить из обработки нижний уровень архитектуры рельефа, что приводит к снижению количества старших элементов ТДС. Отсюда сокращение времени обработки и увеличение степени сжатия.

2) структурной нумерации переформатированной архитектуры рельефа изображения в непозиционном мультиизотопном пространстве.

Сжатие изображений достигается за счет сокращения:

1) комбинаторной избыточности, обусловленной одновременным учетом позиций с запретом появления единичных элементов и ограничений на динамические диапазоны элементов в ПМ, заданных двумерными полиадическими пространствами

2) структурной избыточности, вызванной:

– выявлением изотопных уровней для фрагментов изображений;

– исключением из обработки изотопного уровня, содержащего наибольшее количество единичных элементов (высот рельефа изображения).

Разработанный метод беспогрешностного восстановления изображений на основе декодирования позиционирующей информации базируется на:

1) структурном декодировании данных в непозиционном архитектурном пространстве

2) проведении обратного переформатирования архитектуры рельефа изображения;

3) распределении высот рельефа в изображении в соответствии с позиционирующей информацией.

Восстановление без внесения погрешности обеспечивается в результате:

– взаимодозначности структурного представления данных в непозиционном архитектурном пространстве;

– использования необходимой и достаточной информации для проведения восстановления ТДС;

– использования целочисленных арифметических операций.

РАЗДЕЛ 5

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ИНФОРМАЦИОННО- ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

5.1. Оценка эффективности процесса компактного представления изображений в сетях с коммутацией каналов

В зависимости от источника информации и уровня представления данных (исходные данные, преобразованные данные, пакеты, двоичные символы) процесс сжатия данных может позиционироваться относительно различных уровней ТС согласно семиуровневой модели OSI [56]. Поскольку разработанные методы оперируют с исходными изображениями, то их процессы обработки осуществляются на уровне представления данных в телекоммуникационной сети (рис. 5.1).

Поскольку процессы сжатия рассматриваются на уровне представления данных, то их характеристики отражаются на функционировании нижестоящих уровней ТС согласно модели OSI. Основной характеристикой производительности ТС является время доведения данных от отправителя к получателю. В свою очередь данная характеристика зависит от особенностей сети, определяемых типом коммутации данных.

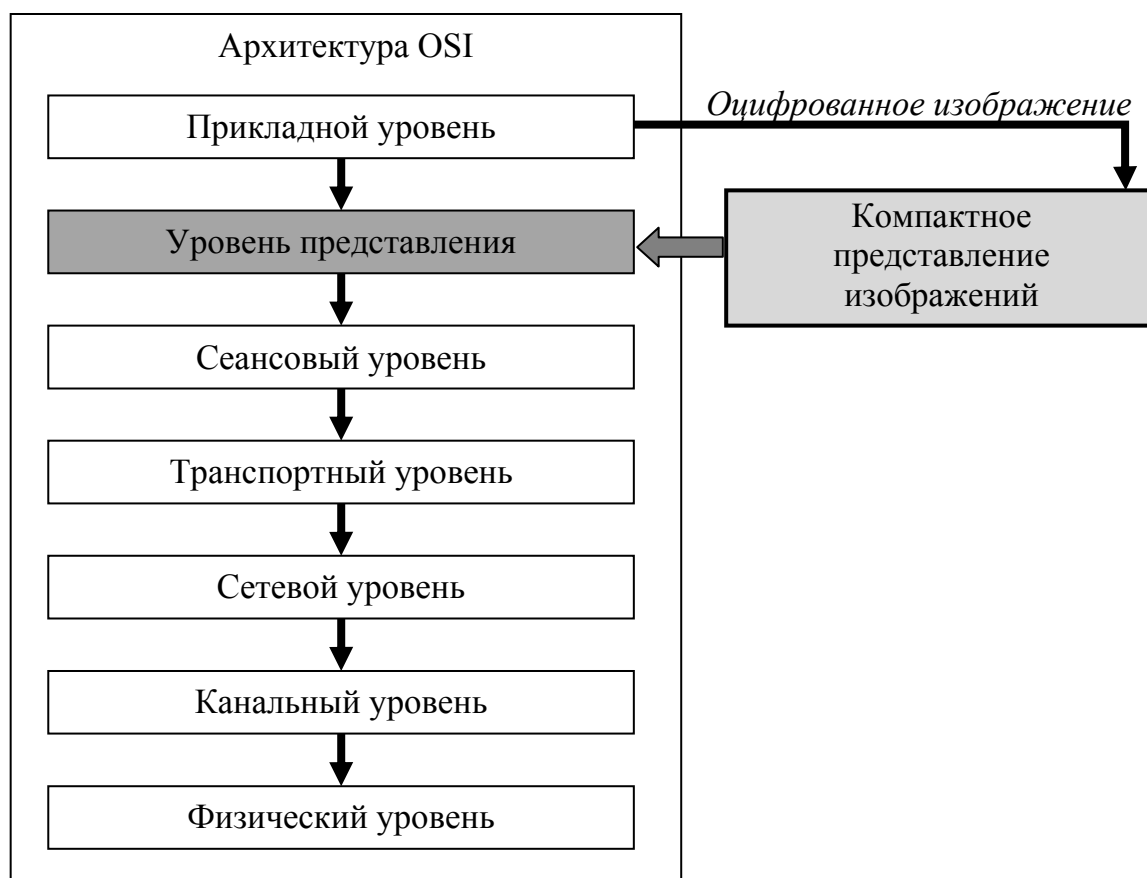


Рис. 5.1. Позиционирование процесса сжатия относительно уровней модели OSI

Поэтому оценим время доведения данных в ТС с различными типами коммутации. В сети с *коммутацией каналов* данные после задержки $T_{ук}$, связанной с установлением канала, начинают передаваться на стандартной для канала скорости. Время доставки данных V адресату равно сумме времени распространения сигнала в канале $T_{рск}$ и времени передачи сообщения в канал $T(V)_n$. Наличие коммутаторов в сети с коммутацией каналов никак не влияет на суммарное время, прохождения данных через сеть.

Примечание. Заметим, что время передачи сообщения в канал в точности совпадает с временем приема сообщения из

канала в буфер узла назначения, в этом случае оно называется временем буферизации $T_{\bar{o}}$.

Время распространения сигнала зависит от расстояния между абонентами L и скорости S распространения электромагнитных волн в конкретной физической среде, которая колеблется от 0,6 до 0,9 скорости света в вакууме $T_{psc} = L / S$.

Время передачи сообщения в канал (а значит, и время буферизации в узле назначения) равно отношению объема сообщения V в битах к пропускной способности канала U_n в битах в секунду $T(V)_n = T_{\bar{o}} = V / U$.

Тогда суммарное время $T(V)_{\Sigma}^{(kk)}$ передачи данных, объемом равным V битам, в телекоммуникационной сети с **коммутацией каналов** находится по формуле

$$T(V)_{\Sigma}^{(kk)} = T_{yk} + T_{psc} + 2(V / U_n) \approx T_{yk} + 2(V / U_n). \quad (5.1)$$

В случае сжатия видеоданных на уровне представления суммарное время $T(V_c)_{\Sigma}^{(kk)}$ передачи сжатых данных, объемом V_c бит, будет оцениваться по формуле

$$T(V_c)_{\Sigma}^{(kk)} = T(V)_c + T(V)_v + T'_{yk} + 2(V_c / U_n), \quad (5.2)$$

где $T(V)_c$, $T(V)_v$ – временные затраты, связанные соответственно со сжатием и восстановлением изображений.

Дополнительные временные затраты $T(V)_c$ и $T(V)_v$ обусловлены процессом обработки данных на уровне представления (рис. 5.1) и зависят от количества операций кодирования $v(V)_k$, декодирования $v(V)_d$ и характеристик производительности вычислительной системы.

Время установления канала связи T'_{yk} зависит от того на сколько долго будет занят канал в предшествующем сеансе

связи. Понятно, что в случае передачи сжатых данных выполняется условие $T'_{ук} < T_{ук}$.

Тогда эффективность созданного метода сжатия для ТС с коммутацией каналов определяется выполнением условия $T(V_c)_{\Sigma}^{(кк)} < T(V)_{\Sigma}^{(кк)}$ или с учетом выражений (5.1) и (5.2):

$$T(V)_c + T(V)_e + T'_{ук} + 2(V / k_{сж} U_n) < T_{ук} + 2(V / U_n), \quad (5.3)$$

где $k_{сж}$ – коэффициент сжатия видеоданных.

Из анализа выражения (5.3) вытекает, что эффективность метода сжатия определяется количеством операций на обработку $v(V)_k$, $v(V)_d$ и степенью сжатия $k_{сж}$.

Проведем оценку степени сжатия $k_{сж}$ для разработанного метода. Изотопное описание рельефа изображения на основе архитектурного позиционирования высот организуется на основе формирования архитектуры рельефа B , состоящего из позиционирующих двоичных массивов $B^{(u)}$ и совокупности высот H для каждого изотопного уровня $\Omega_u \rightarrow B^{(u)}, h_u$, т.е. фрагмент изображения описывается как

$$A^{(r)} = \begin{cases} H = \{h_u\}; \\ B = \{B^{(u)}\}, u = \overline{1, U}. \end{cases}$$

На представление вектора величин $h_u, u = \overline{1, U}$ требуется максимум требуется затратить количество разрядов, равное $U \log_2 D$ бит, где D – количество уровней квантования видеосигнала, $D = 256$.

В свою очередь для совокупности двоичных представлений позиционирующих массивов формируется:

– код-номер трехмерной связной двоичной структуры, значение которого $C(U-1)_{\varphi,св}$ вычисляется по выражению

(4.42). Количество разрядов на кодовое представление величины $C(U-1)_{\varphi, c\varphi}$ равно

$$\log_2 \left(\sum_{u=1}^{U-1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij}^{(u)} \prod_{\eta=1}^{j-1} \varphi_{i\eta}^{(u, c\varphi)} \prod_{k=1}^{i-1} \prod_{j=1}^n \varphi_{kj}^{(u, c\varphi)} \prod_{\gamma=1}^{u-1} \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(\gamma, c\varphi)} \right)$$

битам;

– система Φ оснований элементов ТДС с учетом условия связности в двумерных полиадических пространствах $\Phi = \{\Phi_u\}$, $u=1, \overline{U}$, где Φ_u – система оснований элементов u -го позиционного массива архитектуры рельефа изображения в двумерном полиадическом пространстве φ , основания которого находятся по формуле (3.26). На представление оснований максимум затрачивается $U M N$ бит, где $M \times N$ – размеры плоскости изображения.

Тогда величина $k_{сж}$ равна

$$k_{сж} = \frac{M N \log_2 D}{\log_2 C(U-1)_{\varphi, c\varphi} + U(\log_2 D + M N)}. \quad (5.4)$$

Соответственно минимальное значение степени сжатия k_{\min} определяется с учетом соотношения (4.44) по формуле

$$k_{\min} = M N \log_2 D / (U(\log_2 D + M N) + \sum_{u=1}^{U-1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \log_2 (((\varphi_{ij}^{(u)} - 1) \otimes (\varphi_{ij}'^{(u, c\varphi)} - 1)) + 1)) \quad (5.5)$$

Сравнительная оценка по степени сжатия для созданного метода сжатия и существующих методов внутрикадровой обработки без потери качества в зависимости от степени насыщенности изображений (от величины коэффициента корреляции между элементами изображения) приведена на рис. 5.2.

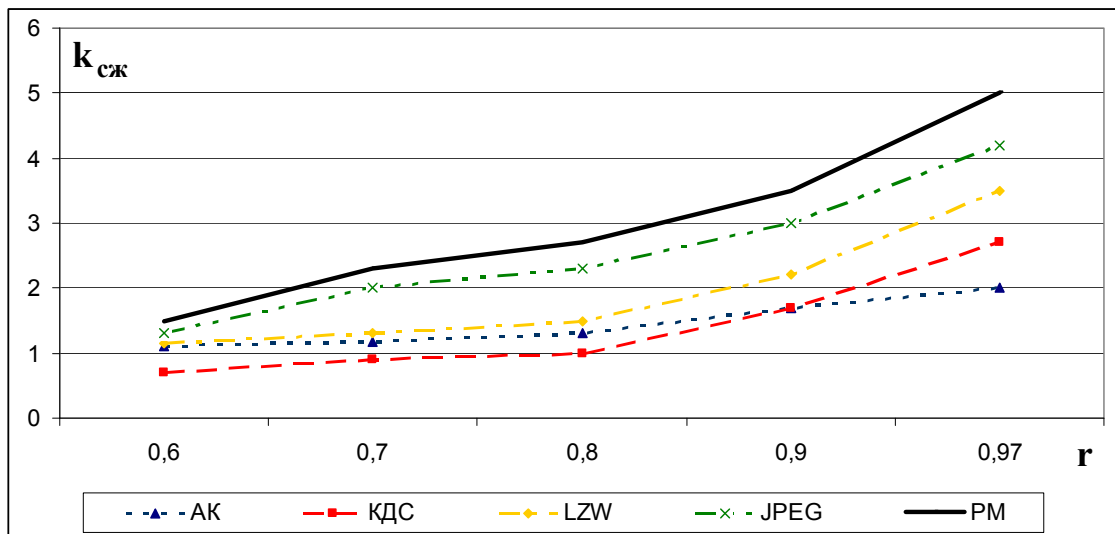


Рис. 5.2. Зависимость величины $k_{сж}$ от r для разных методов сжатия

Из анализа графиков на рис. 5.2 следует, что:

- степень сжатия для разработанного метода изменяется в среднем от **1,5** до **5 раз** в зависимости от корреляции между элементами изображения (степени когерентности).

- выигрыш по степени сжатия относительно существующих методов достигается за счет выявления интегрированных характеристик по всему фрагменту изображения и равен соответственно **15%** – для сильнонасыщенных изображений ($r \leq 0,7$) и **20%** – для сильнонасыщенных ($0,9 \leq r \leq 0,97$).

Вторым параметром, влияющим на время доведения данных $T(V_c)_{\Sigma}^{(kk)}$ является количество операций на кодирование и декодирование. Поскольку для созданного метода компактного представления процессы сжатия и восстановления являются симметричными, то $\nu(V)_k = \nu(V)_d$. Значит, для оценки суммарного времени обработки достаточно оценить время на сжатия изображений.

Проведем оценку количества операций $\nu(V)_k$ на кодирование изображений построенным методом. В зависимости от проводимого этапа сжатия требуется затратить следующее количество операций:

1) переформатирование архитектуры рельефа изображения. Для этого нужно знать количества единиц (сумму единиц) на всех слоях (уровнях) архитектуры. Поэтому проводится $U m n$ – операций сложения и U -операций сравнения;

2) формирование оснований элементов ТДС. Такой этап обработки связан с выполнением $(U - 1) m n$ операций сравнения. Здесь не учитывается обработка нижнего U -го уровня ТДС, исключаемого в результате переформатирования из процесса кодирования;

3) рекуррентное вычисление кода $C(U - 1)_{\varphi, cв}$ для элементов. Это связано с выполнением:

– $(U - 1) m n$ операций умножения и $(U - 1) m n$ операций сложения.

Всего на построение сжатого представления изображения требуется затратить количество операций $\nu(V)_k$ равное:

- $\frac{M N}{m n} (2U m n - m n) = M N (2U - 1)$ операций сложения;

- $\frac{M N}{m n} (U - 1) m n = M N (U - 1)$ операций умножения;

- $\frac{M N}{m n} (U - 1) m n + U = M N ((U - 1) + U / m n)$ операций

сравнения.

Поскольку элементами позиционирующих массивов являются двоичные данные, то операции умножения при формировании кода для ТДС исключаются.

Временные затраты $T(V)_c$ и $T(V)_e$ оцениваются по формулам (1.5) и (1.6). Временные характеристики зависят от производительности информационно-вычислительной системы, в которой осуществляется обработка оцифрованных изображений. Обработка изображений проводится на вычислительном комплексе, базирующемся на микропроцессоре Intel Pentium IV с тактовой частотой 2,1 ГГц. Для данных вычислительной среды сравнительная оценка по суммарному времени ($T(V)_c + T(V)_e$) для различных методов сжатия без потери качества в зависимости от коэффициента корреляции изображений представлены на рис. 5.3. На обработку подаются реалистические изображения с различной степенью насыщенности размером 800×600 и 2048×1536 элементов.

Анализ графиков на рис. 5.3 и рис. 5.4 показывает, что:

- среднее время сжатия изображения на основе разработанного метода (PM) размером 800×600 и 2048×1536 элементов изменяется в зависимости от степени насыщенности соответственно от **0,8** до **1,5** с. и от **5** до **8** с. Сокращение времени обработки видеоданных для слабонасыщенных (сильно когерентных) изображений обусловлено: сокращением количества изотопных уровней (позиционирующих массивов), участвующих в описании рельефа изображения; увеличением количества единичных элементов в нижнем позиционирующем массиве переформатированной архитектуры ТДС;
- наименьшее время достигается в случае сжатия изображений на основе кодирования длин серий (КДС).

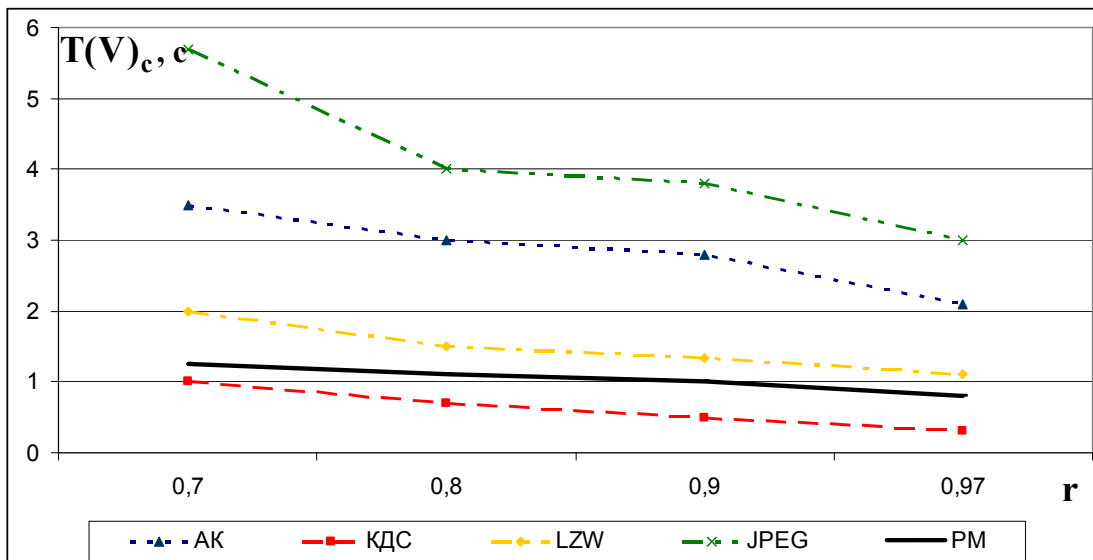


Рис. 5.3. Зависимость величины $T(V)_c$ от r для разных методов сжатия и для $M N = 800 \times 600$

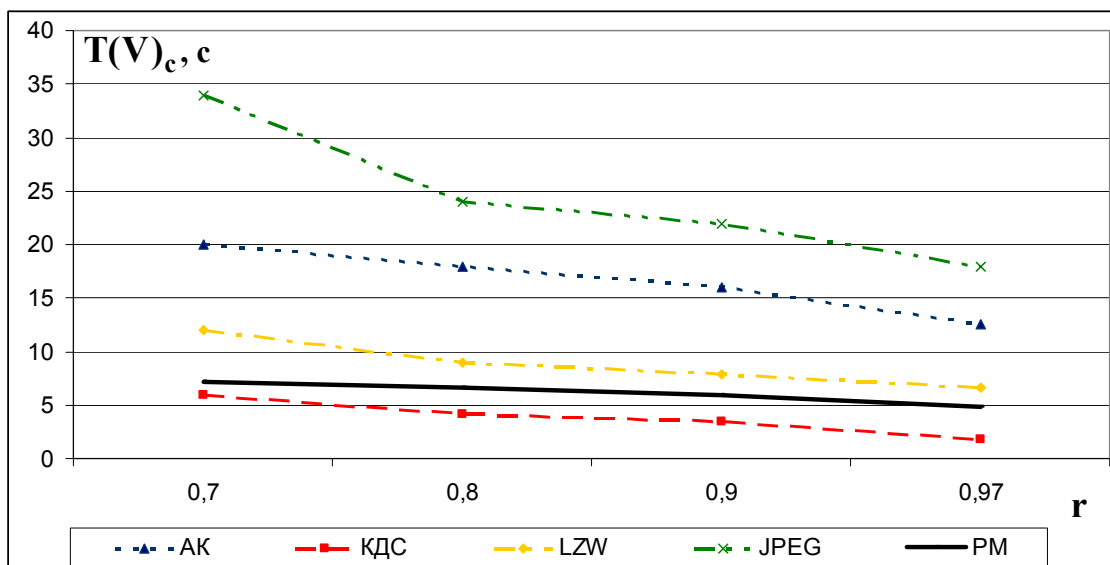


Рис. 5.4. Зависимость величины $T(V)_c$ от r для разных методов сжатия и для $M N = 2048 \times 1536$

Проведем оценку времени доведения данных в сетях с *коммутацией каналов* в случае передачи исходных видеоданных – $T(V)_\Sigma^{(KK)}$ (формула (5.1)) и в случае предваритель-

ного их сжатия – $T(V_c)_{\Sigma}^{(kk)}$ (формула (5.2)) на основе различных методов. Для оценки времени $T(V_c)_{\Sigma}^{(kk)}$ используются предварительно полученные количественные оценки величин $k_{сж}$ и $T(V)_c$. Предполагается, что $T'_{ук} \approx T_{ук}$. Скорости передачи данных равны $U_n = 57 \text{Кбит/с}$ и $U_n = 2,048 \text{Мбит/с}$. Если принять, что расстояние между отправителем и получателем находится в пределах **1000 км.**, то временем распространения сигнала можно пренебречь. Для рассматриваемых условий сравнительная оценка величин $T(V)_{\Sigma}^{(kk)}$ и $T(V_c)_{\Sigma}^{(kk)}$ приведена на рис. 5.5 и 5.6.

Анализ диаграмм на рис. 5.5 и 5.6 показывает следующее:

1) в зависимости от объемов изображений в битах и скорости передачи данных по каналу связи усредненное по классам реалистических изображений время $T(V_c)_{\Sigma}^{(kk)}$ для разработанного метода (PM) находится на уровне: для $M N = 800 \times 600$, $U_n = 57 \text{Кбит/с}$ – от **120** до **160 с.**; для $M N = 2048 \times 1536$, $U_n = 2,048 \text{Мбит/с}$ – от **32** до **46 с.** Значит созданный метод обладает возможностью обеспечить передачу оцифрованных изображений, размером $M N = 800 \times 600$ в реальном времени при скорости передачи данных $U_n = 2,048 \text{Мбит/с}$;

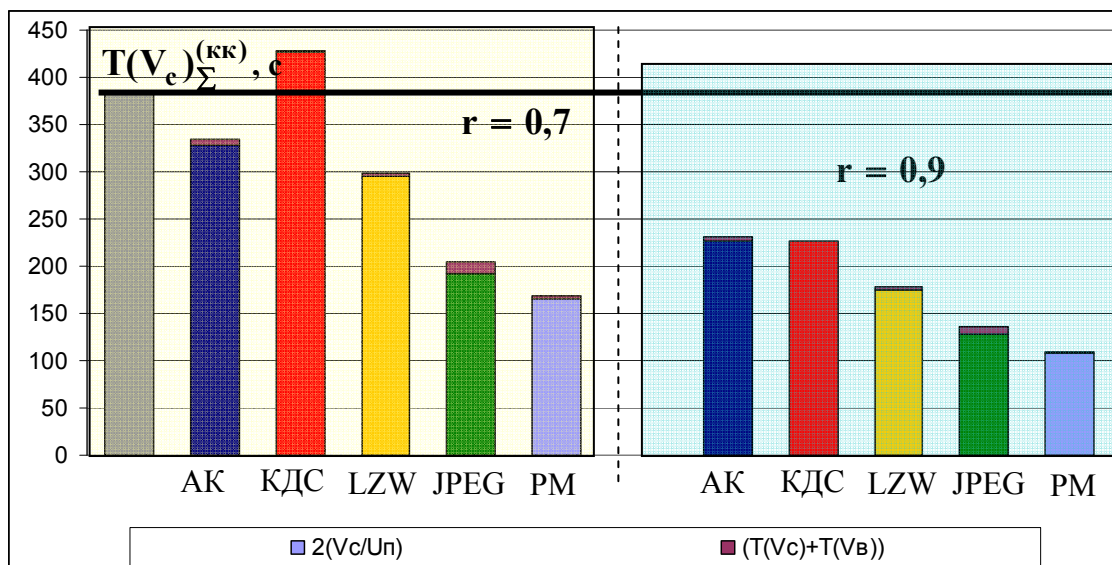


Рис. 5.5. Зависимость величины $T(V_c)_{\Sigma}^{(KK)}$ от r для разных методов сжатия и для $MN = 800 \times 600$, $U_i = 57$ Кбит/с

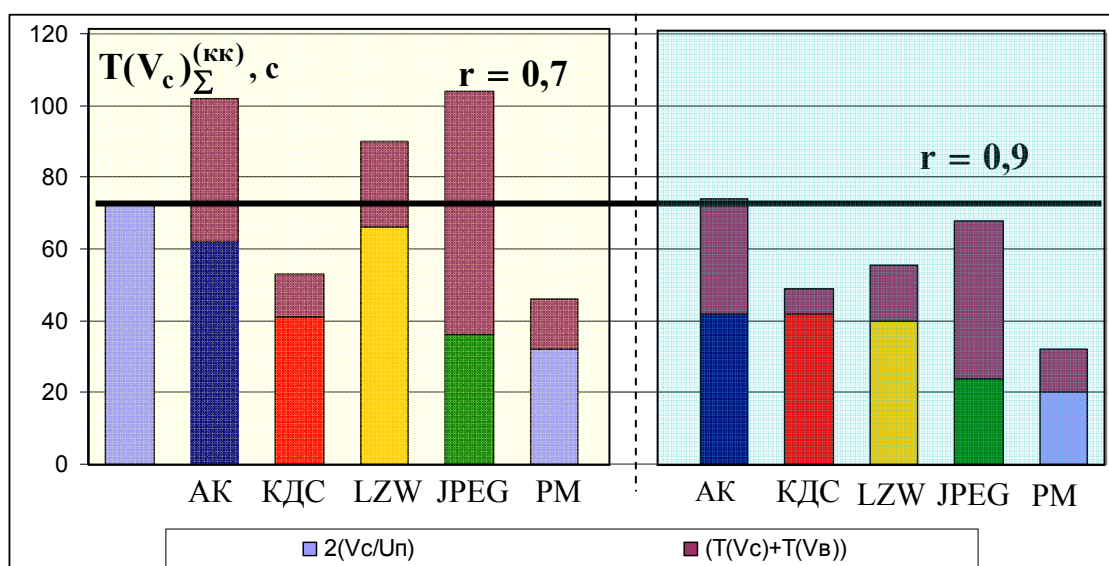


Рис. 5.6. Зависимость величины $T(V_c)_{\Sigma}^{(KK)}$ от r для разных методов сжатия и для $MN = 2048 \times 1536$, $U_n = 2,048$ Мбит/с

2) для построенного метода в режиме $M N = 800 \times 600$, $U_n = 57$ Кбит/с обеспечивается средний выигрыш по времени доведения относительно:

- метода JPEG на уровне **16%**;
- передачи видеоданных без сжатия на уровне **2,7 раз**;

3) для разработанного метода в режиме $M N = 2048 \times 1536$, $U_n = 2,048$ Мбит/с обеспечивается средний выигрыш по времени доведения относительно:

– метода JPEG на уровне в среднем **2,26 раз**. Увеличение выигрыша для разработанного метода относительно метода JPEG с ростом скорости передачи данных в канал обусловлено влиянием на суммарное время процесса обработки данных;

– метода кодирования длин серий КДС на уровне от **15%** (сильнонасыщенные изображения) до **35%** (слабонасыщенные изображения);

- передачи видеоданных без сжатия на уровне **2 раз**;

Следовательно, в сетях с коммутацией каналов организацией сжатия на основе созданного метода обеспечивает снижение времени доведения видеоданных от отправителя к получателю относительно существующих методов сжатия без потери качества.

5.2. Оценка роли процесса компактного представления для передачи изображений в телекоммуникационных сетях с коммутацией пакетов

Рассмотрим составные временных задержек при передаче данных по ТС с *коммутацией пакетов*. В отличие от сети с коммутацией каналов для сети с коммутацией пакетов передача данных не требует обязательного установления соединения [21; 56; 64].

В сеть, показанную на рис. 5.7, передаются видеоданные объемом V бит. Видеоданные разделяется на пакеты, каждый из которых снабжен заголовком. Пакеты передаются от узла 1 (отправитель) в узел 2 (получатель), между которыми расположены z коммутаторов (на рис. 5.7 рассматривается вариант наличие двух коммутаторов).

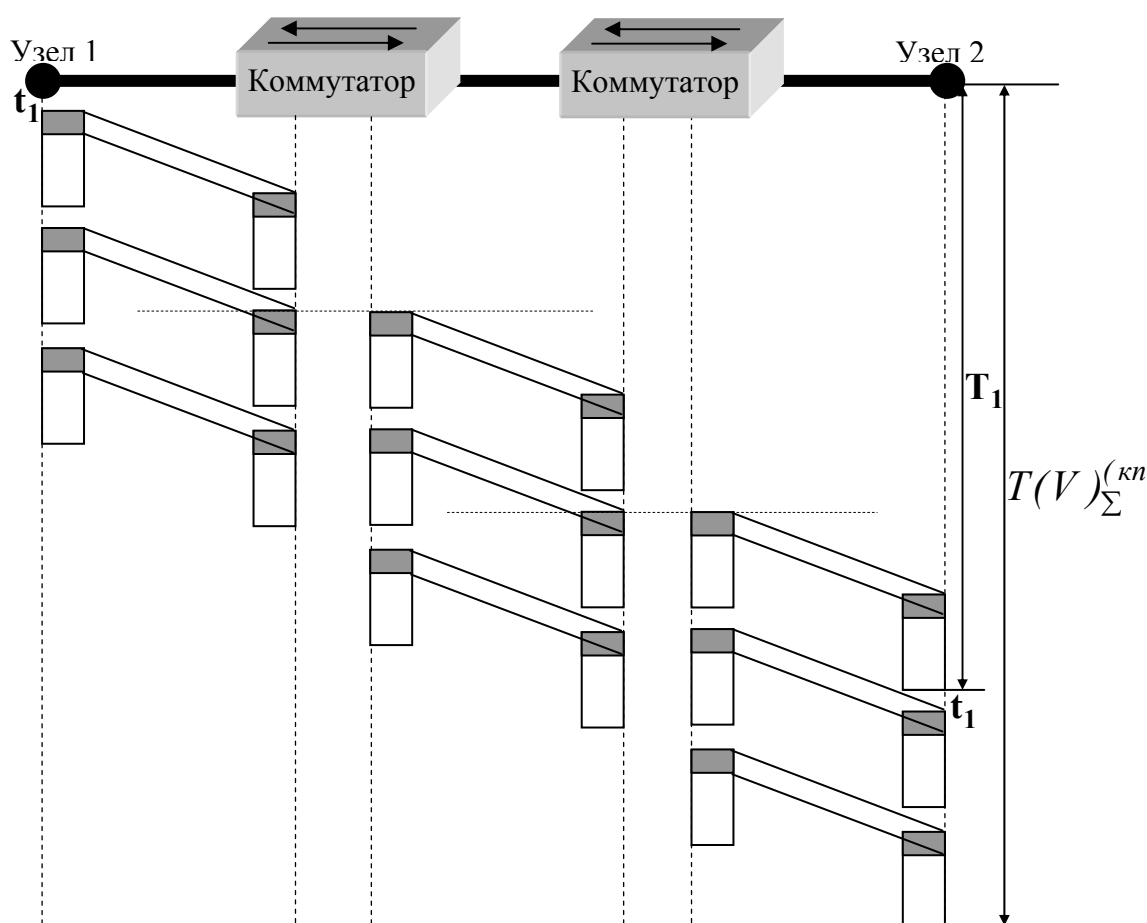


Рис. 5.7. Временная диаграмма передача видеоданных, разделенных на пакеты в сети с коммутацией пакетов

На каждом коммутаторе каждый пакет изображен дважды: в момент прихода на входной интерфейс и в момент передачи в сеть с выходного интерфейса. Из рис. 5.7 видно, что коммутатор задерживает пакет на некоторое время. Здесь T_1 – время доставки адресату первого пакета видеоданных, а

$T(V)_{\Sigma}^{(kn)}$ – всего оцифрованного изображения в ТС с коммутацией пакетов.

По аналогии с передачей данных в сети с коммутацией каналов получим, что время T_{psc} распространения сигнала в физической среде равно $T_{psc} = L / S$, время $T(V)_n$ передачи видеоданных в канал будет также равно $T(V)_n = T_{\delta} = V / U_n$.

Однако разбиение передаваемого сообщения на пакеты с последующей их передачей по сети с коммутацией пакетов приводит к дополнительным задержкам. Для оценки таких задержек рассмотрим путь первого пакета и отметим, из каких составляющих складывается время его передачи в узел назначения и какие из них специфичны для сети с коммутацией пакетов.

Время передачи одного пакета от узла 1 до коммутатора 1 можно представить в виде суммы нескольких слагаемых.

1. Во-первых, время тратится в узле-отправителе (узел 1), включающего следующие временные составляющие:

– t_1 – время формирования пакета, также называемое временем пакетизации (значение этой задержки зависит от различных параметров работы программного и аппаратного обеспечения узла-отправителя и не зависит от параметров сети);

– t_2 – время передачи в канал заголовка;

– t_3 – время передачи в канал поля данных пакета.

2. Во-вторых, дополнительное время тратится на распространение сигналов по каналам связи. Обозначим через t_4 время распространения сигнала, представляющего один бит информации, от узла 1 до коммутатора 1.

3. В-третьих, дополнительное время тратится в промежуточном коммутаторе (промежуточных коммутаторах), состоящее из:

– t_5 – времени приема пакета с его заголовком из канала во входной буфер коммутатора; как уже было отмечено, это время равно $(t_2 + t_3)$, т.е. времени передачи пакета с заголовком в канал из узла источника;

– t_6 – времени ожидания пакета в очереди колеблется в очень широких пределах и заранее неизвестно, так как зависит от текущей загрузки сети;

– t_7 – времени коммутации пакета при его передаче в выходной порт фиксировано для конкретной модели и обычно невелико (от нескольких микросекунд до нескольких миллисекунд).

Обозначим через $T_{N1/S1}$ время передачи пакета из узла 1 на выходной интерфейс коммутатора 1. Это время складывается из следующих составляющих:

$$T_{N1/S1} = t_1 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7. \quad (5.6)$$

Обратите внимание, что среди слагаемых отсутствуют составляющие t_2 и t_3 . Передача битов из передатчика в канал совмещается по времени с передачей битов по каналу связи.

Время, затрачиваемое на передачу данных на отрезки между двумя коммутаторами обозначим как T_{S_{i-1}/S_i} :

$$T_{S_{i-1}/S_i} = t_4 + t_5 + t_6 + t_7, \quad (5.7)$$

а на отрезке между последним коммутатором и получателем как $T_{S_z/N2}$:

$$T_{S_z/N2} = t_4 + t_5 + t_6. \quad (5.8)$$

Эти величины имеют такую же структуру, что и $T_{N1/S1}$, за исключением того, что в них не входит время пакетизации, и,

кроме того, T_{S_2/N_2} не включает время коммутации (так как отрезок заканчивается конечным узлом).

Полное время передачи одного пакета по сети составляет:

$$T_1 = T_{N_1/S_1} + z T_{S_{i-1}/S_i} + T_{S_z/N_2}, \quad (5.9)$$

где z – количество коммутаторов между отправителем (узел 1) и получателем (узел 2).

Найдем теперь время передачи сообщения, состоящего из нескольких пакетов. Сеть с коммутацией пакетов работает как конвейер (см. рис. 5.7): пакет обрабатывается за несколько этапов, и все устройства сети выполняют эти этапы параллельно. Поэтому время передачи такого сообщения будет значительно меньше, чем сумма значений времени передачи каждого пакета сообщения. Точно рассчитать это время сложно из-за неопределенности состояния сети и, вследствие этого, неопределенности значений времени ожидания пакетов в очередях коммутаторов. Однако, если предположить, что пакеты стоят в очереди примерно одинаковое время, то общее время передачи видеоданных, состоящего из g пакетов, оценивается следующим образом:

$$T(V)_{\Sigma}^{(kn)} = T_1 + (r-1)(t_1 + t_5) = T_{N_1/S_1} + z T_{S_{i-1}/S_i} + T_{S_z/N_2} + (g-1)(t_1 + t_5). \quad (5.10)$$

или с учетом соотношений (5.7) и (5.8):

$$\begin{aligned} T(V)_{\Sigma}^{(kn)} &= (t_1 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7) + z(t_4 + t_5 + t_6 + t_7) + (t_4 + t_5 + t_6) + \\ &+ (g-1)(t_1 + t_5) = t_1 + t_7(z+1) + (z+2)(t_4 + t_5 + t_6 + \\ &+ t_7) + (g-1)(t_1 + t_5) \end{aligned} \quad (5.11)$$

Для известной длины информационного поля пакета v_u в битах количество пакетов рассчитывается по формуле

$$g = V / v_u. \quad (5.12)$$

При этом длина пакета с учетом количества разрядов v_c для служебных данных равна v_n битам

$$v_n = v_u + v_c. \quad (5.13)$$

Если учесть, что в среднем объем v_c составляет 10% от объема v_u , то длина пакета оценивается как $v_n = 1,1 v_u$.

В случае предварительного сжатия видеоданных на уровне представления данных в ТС время доведения $T(V_c)_{\Sigma}^{(kn)}$ оценивается по формуле

$$\begin{aligned} T(V_c)_{\Sigma}^{(kn)} = & T(V)_c + T(V)_v + t_1 + t_7(z+1) + \\ & + (z+2)(t_4 + t_5 + t_6 + t_7) + (g_c - 1)(t_1 + t_5) \end{aligned} \quad (5.14)$$

где g_c – количество пакетов данных, на которое разбивается сжатое изображение, объемом V_c :

$$g_c = V_c / v_u. \quad (5.15)$$

Понятно, что $g_c < g$.

Проведем оценку времени доведения данных в сетях с **коммутацией пакетов** в случае передачи исходных видеоданных – $T(V)_{\Sigma}^{(kn)}$ (формула (5.11)) и в случае предварительного их сжатия – $T(V_c)_{\Sigma}^{(kn)}$ (формула (5.14)) на основе различных методов. Для оценки времени $T(V_c)_{\Sigma}^{(kn)}$ используются предварительно полученные количественные оценки величин $k_{сж}$ и $T(V)_c$. Скорости передачи данных равны $U_n = 57 \text{Кбит/с}$ и $U_n = 2,048 \text{Мбит/с}$. Если принять, что расстояние между отправителем и получателем находится в пре-

делах 1000 км., то временем распространения сигнала можно пренебречь. Будем считать, что:

– путь от отправителя до получателя пролегает через $z=5$ коммутаторов;

– сеть работает в недогруженном режиме и очереди в коммутаторах отсутствуют;

– длина пакета $v_n = 1024$ бит;

– интервал между отправкой пакетов равен **1 мс**, тогда время передачи видеоданных увеличится на дополнительные **g мс**;

– доля служебной информации, размещенной в заголовках пакетов, по отношению к общему объему сообщения составляет **10%**. Следовательно, дополнительная задержка, связанная с передачей заголовков пакетов, составляет **10%** от времени передачи исходного сообщения, то есть $T(V)_{\Sigma}^{(KK)} / 10$ мс;

– задержка буферизации *одного* пакета с учетом задержки коммутации, равной **2 мс** оценивается по формуле $(v_n / U_n + 2 \times 10^{-3})z$ секунд.

В результате дополнительная задержка, созданная сетью с коммутацией пакетов относительно времени передачи данных в сети с коммутацией каналов составляет $T(V)_{\Sigma}^{(KK)} / 10 + (v_n / U_n + 2 \times 10^{-3})z + g \times 10^{-3}$ с.

Для приведенных условий сравнительная оценка величин $T(V)_{\Sigma}^{(kn)}$ и $T(V_c)_{\Sigma}^{(kn)}$ рассматривается на рис. 5.8 и 5.9.

Анализ диаграмм на рис. 5.8 и 5.9 показывает следующее:

1) для построенного метода в режиме $M N = 800 \times 600$, $U_n = 57$ Кбит/с обеспечивается время передачи данных в сети с коммутацией пакетов на уровне от **120** до **190** с. в

зависимости от степени насыщенности изображений. При этом средний выигрыш по времени доведения составляет относительно:

– метода JPEG на уровне **19%**, что на **3%** больше, чем для сетей с коммутацией каналов;

– передачи видеоданных без сжатия в среднем в **3,4 раза**.

Увеличение выигрыша для разработанного метода (PM) по времени доведения данных для сетей с коммутацией пакетов по сравнению с временем передачи данных в сетях с коммутацией каналов обуславливается сокращением временных затрат связанных на этапе буферизации пакетов на коммутаторах. Это достигается в результате уменьшения количества передаваемых в канал связи пакетов;

2) для разработанного метода в режиме $M N = 2048 \times 1536$, $U_n = 2,048$ Мбит/с в сети с коммутацией пакетов обеспечивается время доведения данных на уровне от **50** до **90** с. Средний выигрыш по времени доведения относительно:

– метода JPEG на уровне достигает в среднем **37 ÷ 42%**. Увеличение выигрыша для разработанного метода относительно метода JPEG с ростом скорости передачи данных в канал обусловлено влиянием на суммарное время процесса обработки данных и сокращения суммарного времени буферизации пакетов на коммутаторах в следствии сокращения количества пакетов;

– передачи видеоданных без сжатия равен в среднем от **1,7** до **2,8** раза.

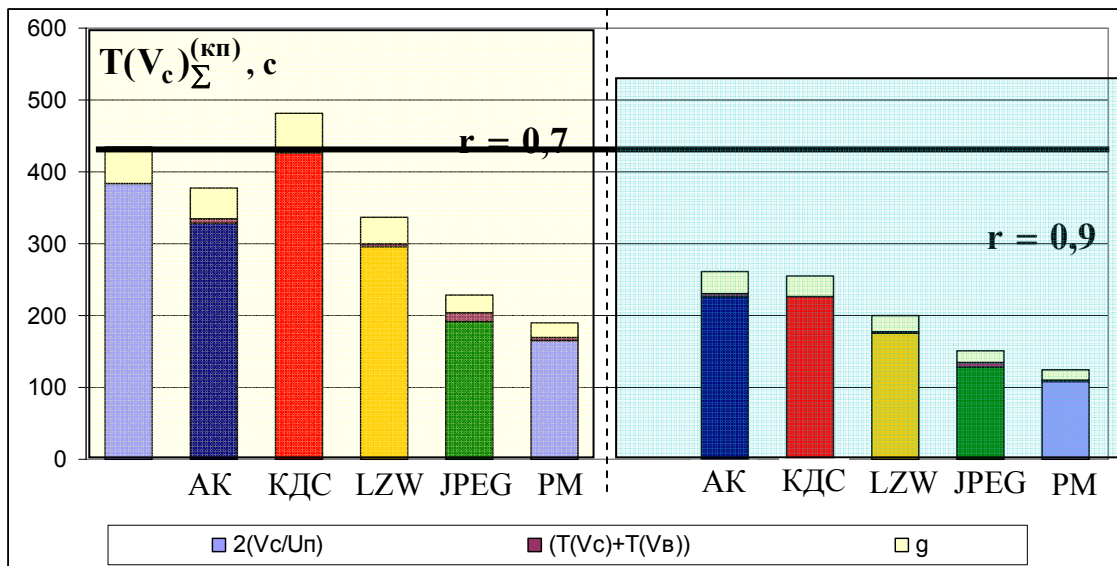


Рис. 5.8. Зависимость величины $T(V_c)_\Sigma^{(kn)}$ от r для разных методов сжатия и для $M N = 800 \times 600$, $U_n = 57$ Кбит/с

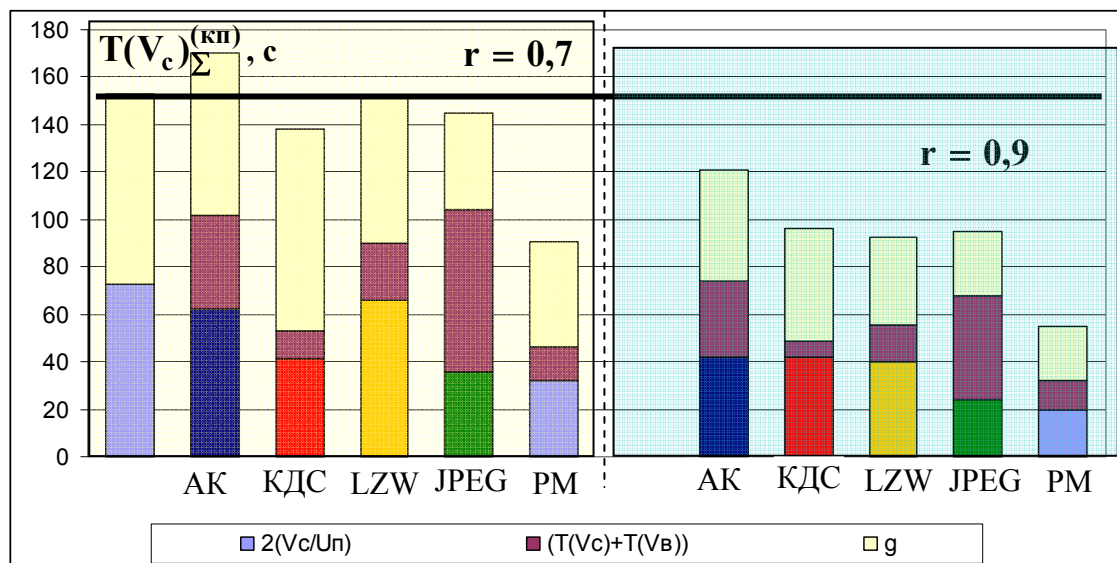


Рис. 5.9. Зависимость величины $T(V_c)_\Sigma^{(kn)}$ от r для разных методов сжатия и для $M N = 2048 \times 1536$, $U_i = 2,048$ Мбит/с

Отсюда вытекает, что в сетях с коммутацией пакетов влияние процессов сжатия видеоданных на время их доведения оказывается более существенным, чем в сетях с комму-

тацией пакетов. Это объясняется появлением дополнительных задержек вызванных особенностями пакетной технологии передачи данных. Поэтому увеличение степени сжатия позволяет добиться большего сокращения времени передачи данных относительно случае передачи не сжатых данных.

5.3. Схемотехническая реализация разработанных методов компактного представления

Рассмотрим схемотехническую реализацию устройства цифровой обработки изображений (рис. 5.10).

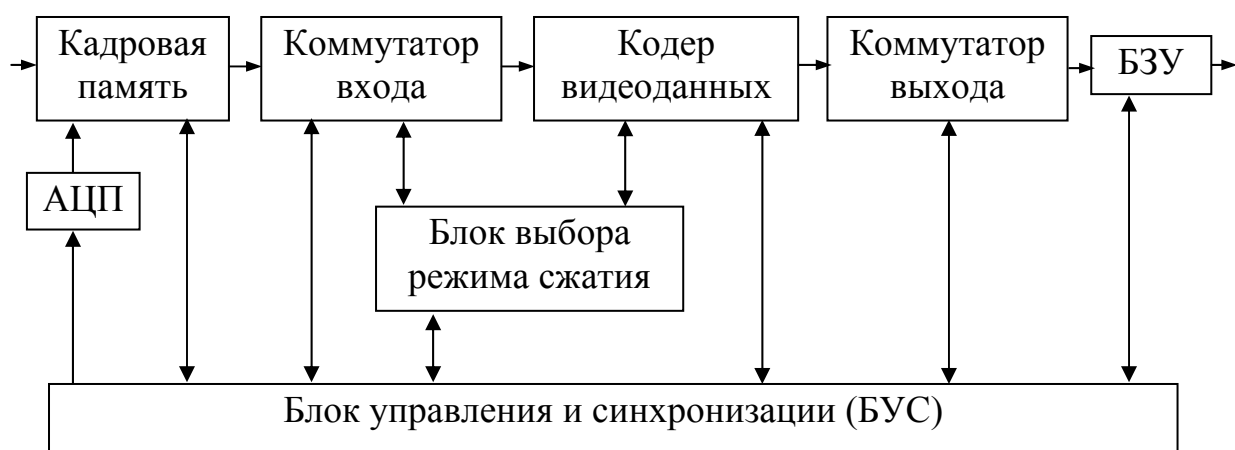


Рис. 5.10. Структурная схема устройства сжатия

Телевизионный сигнал поступает на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), в котором осуществляется преобразование аналогового сигнала в цифровой вид. Цифровой код записывается в блок кадровой памяти. Блок коммутации 1 осуществляет коммутацию блока кадровой памяти с входом кодера. Блок коммутации 2 проводит коммутацию выхода кодера с буферным запоминающим устройством (БЗУ). Кодировальное устройство осуществляет сжатие оцифрованных изображений путем формирования кодов-номеров для трех-

мерных двоичных структур, построенных для изотопных уровней рельефа изображений. Блок выбора режима сжатия устанавливает состояние параметров кодера и подключает (отключает) устройства кодера.

Рассмотрим принцип работы схемы компрессии. В начальном состоянии устройства кодера подключены, а промежуточные запоминающие устройства обнулены. После того как параметры кодера установлены в выбранное состояние (режим сжатия) поступает сигнал на блок управления и синхронизации (БУС) о готовности кодера к работе. От блока БУС идет сигнал на коммутаторы 1 и 2. В результате этого вход кодера подключается к выходу блока кадровой памяти, а выход кодера соединяется со входом БЗУ. Перед считыванием данных из кадровой памяти проверяется значение регистра состояния БЗУ. Регистр состояния БЗУ содержит информацию о переполнении буфера. Если буфер переполнен, то поступает сигнал на блок БУС. Устройство синхронизации передает сигнал коммутаторам 1 и 2 об их отключении. В блок выбора режима сжатия поступает сигнал от блока БУС о смене параметров кодера. После того как параметры кодера изменены от блока БУС идет сигнал включения на коммутаторы 1 и 2.

Техническая реализация метода сжатия связана с разработкой схемотехнического решения процесса компрессии оцифрованных изображений, реализующего этапы компактного представления:

- построение позиционирующих массивов (ПМ) и связывание их в единую архитектуру изотопного рельефа;
- переформатирование трехмерной двоичной структуры (ТДС) состоящей из ПМ;
- формирование системы оснований элементов ТДС;

– вычисление кода-номера для элементов ТДС.

Структурная схема устройства кодирования изображений приведена на рис. 5.11.

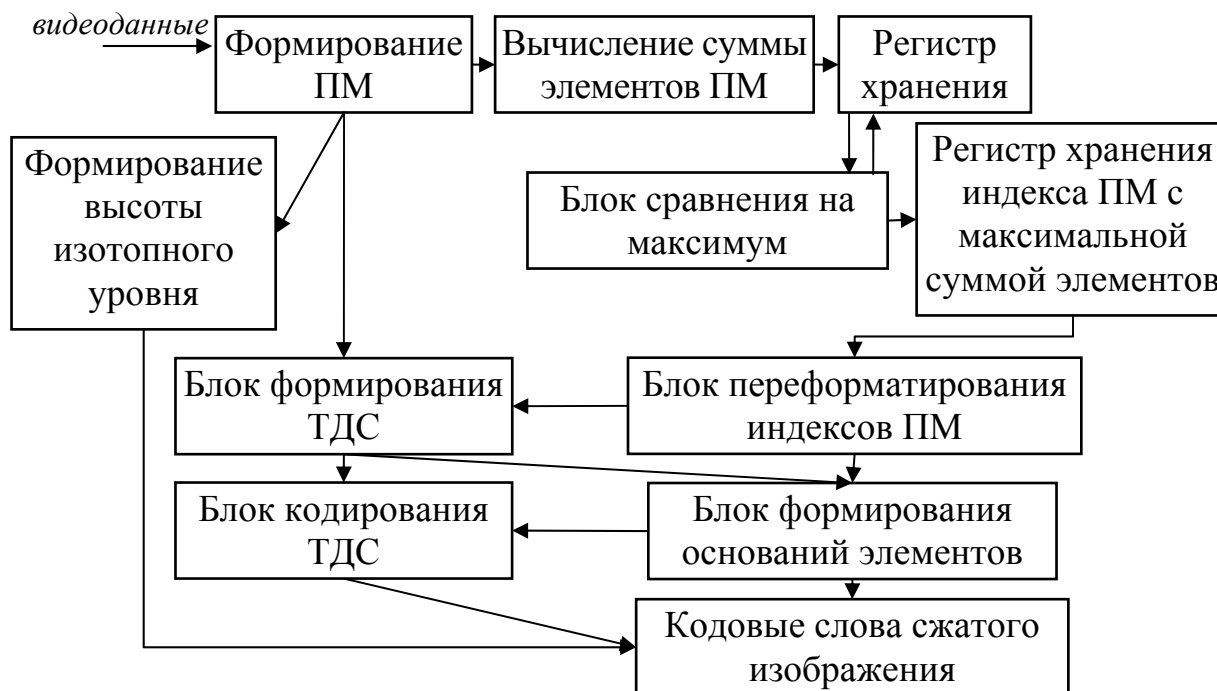


Рис. 5.11. Схематехническая реализация метода кодирования изображений

Видеоданные поступают на блок формирования позиционирующих массивов (блок формирования ПМ). Данный блок служит для выявления элементов видеоданных, принадлежащих одному изотопному уровню рельефа изображений.

После чего в блоке нахождения количества единиц проводится вычисление суммы элементов ПМ для определения количества элементов, принадлежащих текущему изотопному уровню.

В блоке сравнения на максимум осуществляется проверка сумм элементов ПМ. Определяется максимальное значе-

ние, которое записывается в блок хранения индекса ПМ, имеющего максимальное количество единичных элементов.

Данная информация используется для организации переформатирования трехмерных двоичных структур (ТДС). Эта операция проводится в блоке переформатирования. В результате строится ТДС, учитывающее условие непозиционности изотопных уровней, и обеспечивающая исключение ПМ, содержащего наибольшее количество элементов.

На основе элементов ТДС образуются основания элементов ТДС с учетом их связности. Для этого служит блок формирования оснований. Формирование оснований проводится в двоичном полиадическом пространстве, на основе определения позиций ПМ, запрещающих нахождение на них единичных элементов.

Информация с блоков оснований и формирования ТДС поступает в блок кодирования, в котором вычисляется значение кода-номера элементов ТДС. Нахождение кода-номера ТДС организуется на основе накопленного суммирования произведений элементов ПМ на соответствующее значение весового коэффициента. В свою очередь значение весового коэффициента определяется как накопленное произведение оснований элементов ПМ, предшествующих текущему элементу.

Значение кода-номера, высоты уровней изотоп и система оснований являются компонентами для построения кодовых слов сжатого представления изображений.

Таким образом, построены схемотехнические решения метода сжатия изображений на основе формирования архитектуры изотопного представления рельефа изображения.

Резюме

Степень сжатия для разработанного метода изменяется в среднем от 1,5 до 5 раз в зависимости от корреляции между элементами изображения (степени когерентности). Выигрыш по степени сжатия относительно существующих методов достигается за счет выявления интегрированных характеристик по всему фрагменту изображения и равен соответственно 15% – для сильнонасыщенных изображений $r \leq 0,7$, и 20% – для насыщенных изображений с $0,9 \leq r \leq 0,97$.

Обработка изображений на вычислительном комплексе, базирующемся на микропроцессоре Intel Pentium IV с тактовой частотой 2,1 ГГц, выявила, что:

– среднее время сжатия изображения на основе разработанного метода (PM) размером 800×600 и 2048×1536 элементов изменяется в зависимости от степени насыщенности соответственно от 0,8 до 1,5 с. и от 5 до 8 с. Сокращение времени обработки видеоданных для слабонасыщенных (сильно когерентных) изображений обусловлено: сокращением количества изотопных уровней (позиционирующих массивов), участвующих в описании рельефа изображения; увеличением количества единичных элементов в нижнем позиционирующем массиве переформатированной архитектуры ТДС.

В зависимости от объемов изображений в битах и скорости передачи данных по каналу связи в сети с коммутацией каналов усредненное по классам реалистических изображений время $T(V_c)_{\Sigma}^{(KK)}$ для разработанного метода (PM) находится на уровне: для $M N = 800 \times 600$, $U_n = 57 \text{Кбит/с}$ – от 120 до 160 с.; для $M N = 2048 \times 1536$, $U_n = 2,048 \text{Мбит/с}$ – от 32 до 46 с. Значит, созданный метод обладает возможностью обеспечить передачу оцифрованных изображений, размером

$M N = 800 \times 600$ в реальном времени при скорости передачи данных $U_n = 2,048$ Мбит/с;

Для построенного метода в режиме $M N = 800 \times 600$, $U_n = 57$ Кбит/с обеспечивается средний выигрыш по времени доведения относительно:

- метода JPEG на уровне 16%;
- передачи видеоданных без сжатия на уровне 2,7 раз;

Для разработанного метода в режиме $M N = 2048 \times 1536$, $U_n = 2,048$ Мбит/с обеспечивается средний выигрыш по времени доведения относительно:

– метода JPEG на уровне в среднем 2,26 раз. Увеличение выигрыша для разработанного метода относительно метода JPEG с ростом скорости передачи данных в канал обусловлено влиянием на суммарное время процесса обработки данных;

– метода кодирования длин серий КДС на уровне от 15% (сильнонасыщенные изображения) до 35% (слабонасыщенные изображения);

- передачи видеоданных без сжатия на уровне 2 раз;

Следовательно, в сетях с коммутацией каналов организация сжатия на основе созданного метода обеспечивает снижение времени доведения видеоданных от отправителя к получателю относительно существующих методов сжатия без потери качества.

Для построенного метода в режиме $M N = 800 \times 600$, $U_n = 57$ Кбит/с обеспечивается время передачи данных в сети с коммутацией пакетов на уровне от 120 до 190 с. в зависимости от степени насыщенности изображений. При этом средний выигрыш по времени доведения составляет относительно:

– метода JPEG на уровне 19%, что на 3% больше, чем для сетей с коммутацией каналов;

– передачи видеоданных без сжатия в среднем в 3,4 раза.

Увеличение выигрыша для разработанного метода (PM) по времени доведения данных для сетей с коммутацией пакетов по сравнению с временем передачи данных в сетях с коммутацией каналов обуславливается сокращением временных затрат связанных на этапе буферизации пакетов на коммутаторах. Это достигается в результате уменьшения количества передаваемых в канал связи пакетов;

Для разработанного метода в режиме $M N = 2048 \times 1536$, $U_n = 2,048$ Мбит/с в сети с коммутацией пакетов обеспечивается время доведения данных на уровне от 50 до 90 с. Средний выигрыш по времени доведения относительно:

– метода JPEG на уровне достигает в среднем $37 \div 42\%$. Увеличение выигрыша для разработанного метода относительно метода JPEG с ростом скорости передачи данных в канал обусловлено влиянием на суммарное время процесса обработки данных и сокращения суммарного времени буферизации пакетов на коммутаторах вследствие сокращения количества пакетов;

– передачи видеоданных без сжатия равен в среднем от 1,7 до 2,8 раза.

Отсюда вытекает, что в сетях с коммутацией пакетов влияние процессов сжатия видеоданных на время их доведения оказывается более существенным, чем в сетях с коммутацией каналов. Это объясняется появлением дополнительных задержек вызванных особенностями пакетной технологии передачи данных. Поэтому увеличение степени сжатия позволяет добиться большего сокращения времени передачи данных относительно случае передачи не сжатых данных.

Таким образом, построены схемотехнические решения метода сжатия изображений на основе формирования архитектуры изотопного представления рельефа изображения.

Построена схемотехническая реализация предложенного метода сжатия изображений на основе формирования архитектуры изотопного представления рельефа изображения, в котором реализованы следующие основные этапы обработки:

- построение позиционирующих массивов (ПМ) и связывание их в единую архитектуру изотопного рельефа;
- переформатирование трехмерной двоичной структуры (ТДС) состоящей из ПМ;
- формирование системы оснований элементов ТДС;
- вычисление кода-номера для элементов ТДС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предлагается вариант решения актуальной научно-прикладной проблемы, состоящей в сокращении суммарного времени на обработку и передачу в телекоммуникационных системах различных классов статических изображений с сохранением заданного уровня достоверности за счет кодирования источников видеоданных. Разработаны: метод сжатия изображений на основе структурного кодирования в непозиционном архитектурном пространстве мультиизотопного рельефа изображения; метод беспогрешностного восстановления изображений на основе декодирования позиционирующей информации. Это позволило обеспечить выигрыш по степени сжатия и времени доведения видеоданных в телекоммуникационных сетях относительно существующих методов сжатия без потери качества.

Характерные особенности инфраструктуры крупных производств состоят в: территориальной распределенности организационных и технологических процессов; обработки и передачи больших объемов видеоинформации; автоматизации функций относительно обработки, анализа и принятия решений, с сохранением важной роли человека; повышении требований относительно оперативности и достоверности получаемой информации; использовании различных информационных и телекоммуникационных технологий для организации функционирования.

Анализ возможностей существующих телекоммуникационных систем выявил наличие противоречия, состоящего с

одной стороны в необходимости своевременного доведения видеоданных больших объемов, а с другой стороны ограниченными возможностями вычислительных средств и техническими возможностями телекоммуникационных технологий. Следовательно, существует научно-прикладная задача, заключающаяся в сокращении суммарного времени на обработку и передачу в телекоммуникационных системах различных классов статических изображений с сохранением заданного уровня качества их восстановления.

Анализ известных методов сжатия видеoinформации показал, что наибольшие коэффициенты сжатия (до 30 раз) достигаются путем затраты большого количества операций и при применении методов с потерей информации, использующих различные ортогональные преобразования (ДКП, Хаара, Уолша). Поэтому, использование методов сжатия данного класса невозможно в системах обеспечения передачи жизненно-важной информации.

Проведенный анализ характеристик известных методов, осуществляющих сжатие без потери информации, показал, что данным методам свойственны такие недостатки как: резкое снижение степени сжатия при обработке реалистических изображений (степень сжатия в среднем 1,2 раза); снижение помехоустойчивости сжатых данных при их передаче по каналам связи с ошибкой; сокращение избыточности изображений проводится за счет выявления локальных закономерностей изображений (длина серия – для реалистических изображений распространяется в среднем на 2 элемента, законы распределения оцениваются для локальных блоков кадра). Это приводит к увеличению времени передачи данных по каналам связи и к снижению степени достоверности восстанавливаемых данных; для различных классов изображений свойственно наличие распределенных областей серий одинаковых эле-

ментов. Однако подходы и методы, обеспечивающие сжатия видеоданных, за счет сокращения данных видов избыточности не получили необходимой проработки в теории информации и кодирования.

Таким образом, разработка методов компактного представления видеоданных с заданным уровнем достоверности в телекоммуникационных системах на основе сокращения избыточности, обусловленной наличием в изображениях интегрированных характеристик, обеспечивающих дополнительное повышение степени сжатия является актуальным направлением научно-прикладных исследований.

К одному из основных научных результатов, полученных в данной работе, можно отнести разработку мультиизотопного представления рельефного описания изображений на основе выделения уровней, представляющих собой горизонтальные плоскости, проходящие через высоты рельефа, расположенные на одном уровне. Это позволяет выявить интегрированные признаки для отдельных фрагментов и для всего кадра изображения.

Кроме того, в работе описывается методика создания архитектурного позиционирования высот рельефа изображения. В этом случае изотопный уровень заменяется значением высоты и двумерным двоичным массивом, элементы которого содержат информацию о наличии на соответствующей позиции высоты текущего изотопного уровня. Тем самым снижается время формирования и обработки видеоданных, представленных на основе изотопного описания рельефа изображения и архитектурного позиционирования.

Еще одним научным результатом является построенная информационная модель архитектурного представления мультиизотопного описания рельефа изображения. Данная

модель основана на интерпретации архитектуры рельефа в виде комбинаторного объекта – трехмерной двоичной структуры, горизонтальные сечения которых рассматриваются как перестановки с повторениями в двумерном полиадическом пространстве с дополнительным ограничением на число позиций, на которых допускается появление единичных элементов. Созданная модель позволяет оценить количество комбинаторной избыточности, устраняющееся на основе архитектурного позиционирования высот мультиизотопного описания рельефа изображения с учетом одновременного учета ограничений на количество позиций допускающих появления единичных элементов и ограничений на динамические диапазоны элементов ПМ.

В работе авторами предлагается нумеровать трехмерные двоичные структуры с учетом связности изотопных уровней рельефа изображения в двумерном полиадическом пространстве. Отличительные особенности данной нумерации состоят в:

1) построении лексикографического правила, определяющего старшинство допустимых ТДС, учитывая что: ***обход изотопных уровней проводится в направлении сверху вниз***. Это позволяет формировать весовые коэффициенты по мере накопления количества позиций с запретом появления единиц; обход позиционирующих массивов осуществляется в направлении строк слева направо, а затем по столбцам сверху вниз. Это позволяет анализировать изотопные уровни архитектуры в направлении строчной развертки. При этом сокращается время обработки;

2) элементы трехмерной двоичной структуры одновременно удовлетворяют ограничениям относительно позиций с запретом единичных значений и ограничениям на динамический диапазон, определяемыми двумерным полиадическим пространством;

3) нумерации подлежат U -связные трехмерные перестановки с повторениями в двумерном двоичном полиадическом пространстве.

Также в данной работе строится структурное кодирование в непозиционном архитектурном пространстве мультиизотопного рельефа изображения. Кодирование базируется на:

1) переформатировании архитектуры рельефа изображения, основанного на свойствах непозиционности и взаимоисключаемости изотопных уровней. Это позволяет исключить из обработки нижний уровень архитектуры рельефа, что приводит к снижению количества старших элементов ТДС. Отсюда сокращение времени обработки и увеличение степени сжатия.

2) структурной нумерации переформатированной архитектуры рельефа изображения в непозиционном мультиизотопном пространстве.

Сжатие изображений достигается за счет сокращения: комбинаторной избыточности, обусловленной одновременным учетом позиций с запретом появления единичных элементов и ограничений на динамические диапазоны элементов в ПМ, заданных двумерными полиадическими пространствами; структурной избыточности, вызванной: выявлением изотопных уровней для фрагментов изображений, исключением из обработки изотопного уровня, содержащего наибольшее количество единичных элементов (высот рельефа изображения).

Последним научным результатом является разработка метода беспогрешностного восстановления изображений на основе декодирования позиционирующей информации. Метод восстановления базируется на: структурном декодировании данных в непозиционном архитектурном пространстве; проведении обратного переформатирования архитектуры

рельефа изображения; распределения высот рельефа в изображении в соответствии с позиционирующей информацией.

Степень сжатия для разработанного метода изменяется в среднем от 1,5 до 5 раз в зависимости от корреляции между элементами изображения (степени когерентности). Выигрыш по степени сжатия относительно существующих методов достигается за счет выявления интегрированных характеристик по всему фрагменту изображения и равен соответственно 15% – для сильнонасыщенных изображений ($r \leq 0,7$) и 20% – для сильнонасыщенных ($0,9 \leq r \leq 0,97$).

Обработка изображений на вычислительном комплексе, базирующемся на микропроцессоре Intel Pentium IV с тактовой частотой 2,1 ГГц, выявила, что:

– среднее время сжатия изображения на основе разработанного метода (PM) размером 800×600 и 2048×1536 элементов изменяется в зависимости от степени насыщенности соответственно от 0,8 до 1,5 с. и от 5 до 8 с.

Для построенного метода обеспечивается следующий средний выигрыш по времени доведения в сетях с коммутацией каналов:

– в режиме $M N = 800 \times 600$, $U_n = 57$ Кбит/с относительно: метода JPEG на уровне 16%; передачи видеоданных без сжатия на уровне 2,7 раз;

– в режиме $M N = 2048 \times 1536$, $U_n = 2,048$ Мбит/с относительно: метода JPEG на уровне в среднем 2,26 раз; метода кодирования длин серий КДС на уровне от 15% (сильнонасыщенные изображения) до 35% (слабонасыщенные изображения); передачи видеоданных без сжатия на уровне 2 раз.

Для построенного метода в сети с коммутацией пакетов обеспечивается средний выигрыш по времени доведения:

– в режиме $M N = 800 \times 600$, $U_n = 57$ Кбит/с относительно: метода JPEG на уровне 19%, что на 3% больше, чем для сетей с коммутацией каналов; передачи видеоданных без сжатия в среднем в 3,4 раза.

– в режиме $M N = 2048 \times 1536$, $U_n = 2,048$ Мбит/с относительно: метода JPEG на уровне достигает в среднем $37 \div 42\%$; передачи видеоданных без сжатия равен в среднем от 1,7 до 2,8 раза.

Полученные научно-практические результаты целесообразно использовать при обработке и передаче видеoinформации в информационно-телекоммуникационных системах, при проведении конструкторских и научно – исследовательских работ по созданию новых технических и программных средств по обработке видеoinформации, а также при изучении учебных дисциплин по кодированию и обработке видеoinформации для подготовки специалистов в ВУЗах Украины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ансон Л. Фрактальное сжатие изображений / Л. Ансон, М. Барнсли // Мир ПК. – 1992. – №4. – С. 23 – 27.
2. Асташкин А.А. Космические системы аппараты и приборы для решения задач природоиспользования и экономического контроля. / А.А. Асташкин. – М.: ВИНТИ, 1991. – 142 с.
3. Аудиовизуальные системы связи и вещания: новые технологии третьего тысячелетия, задачи и проблемы внедрения в Украине / О.В. Гофайзен, А.И. Ляхов, Н.К. Михалов, Н.П. Орленко, В.В. Шишкин, О.И. Яремчук // Праці УНДІРТ. – 2000 р. – №3. – С. 3 – 40.
4. Бабкин В.Ф. Универсальное кодирование дискретных, независимых источников со счетным алфавитом / В.Ф. Бабкин // Вопросы кибернетики. – 1977. – №34. – С. 3 – 10.
5. Баранник В.В. Рельефное представление изображений пирамидальным кодированием / В.В. Баранник // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2001. – № 1. – С. 17 – 25.
6. Баранник В.В. Метод трехмерного кодирования данных / В.В. Баранник // Системи обробки інформації. – Харків: ХВУ. – 2003. – Вип. 1. – С. 42 – 46.
7. Баранник В.В. Информационная оценка архитектурного позиционирования высот рельефа изображения / В.В. Баранник, А.В. Слободянюк // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС. – 2008. – Вип. 3 (18). – С. 88 – 90.

8. Баранник В.В. Методология позиционирования высот рельефа изображений в изотопах / В.В. Баранник, А.В. Слободянюк // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ “ХАИ”, 2008. – Вып. 40. – С. 229 – 234.

9. Баранник В.В. Архитектурное представление изотопных уровней рельефа изображений для их компактной передачи в телекоммуникационных сетях / В.В. Баранник, А.В. Слободянюк, В.П. Поляков // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2008. Вып. 154. С. 121 – 126.

10. Баранник В.В. Модель оцінки інформативності мультиізотопного зв'язного архітектурного представлення в поліадичному просторі / В.В. Баранник, А.В. Слободянюк // Системи озброєння і військова техніка – Х.: ХУПС. – 2008. – Вип. 3(15). – С. 77 - 80.

11. Баранник В.В. Нумерация связных двоичных структур в двумерном полиадическом пространстве / В.В. Баранник, А.В. Слободянюк // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС. – 2008. – Вип. 7(74). – С. 2 – 5.

12. Баранник В.В. Метод сборки изображений на основе структурного двоичного декодирования архитектурных кодовых конструкций / В.В. Баранник, А.В. Слободянюк // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС. – 2009. – Вип. 1(75). – С. 13 – 16.

13. Баранник В.В. Структурное двоичное кодирование в непозиционном пространстве изотопных уровней архитектуры рельефа изображения / В.В. Баранник, А.В. Слободянюк // Радиоэлектроника и информатика. – 2008. – №3. С. 44 – 47.

14. Баранник В.В. Рельефная модель изображений на основе выделения изотопных уровней / В.В. Баранник, А.В. Слободянюк // Матер. VIII міжнародної науково-технічної конференції “Проблеми інформатики и моделирования”. – Харків: НТУ “ХП”. – 2008. – С. 62.

15. Баранник В.В. Оценки информативности архитектурного представления рельефа изображения в мультиизотопном связанном полиадическом пространстве / В.В. Баранник, А.В. Слободянюк // Четверта наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, 2008. – С. 120.

16. Баранник В.В. Метод компактного представления изображений на основе кодирования архитектуры рельефа // В.В. Баранник, А.В. Слободянюк // I міжнародна науково-практична конференція “Безпека та захист інформації в інформаційних і телекомунікаційних системах”. – Харків: ХНЕУ. – 2008. – С. 60.

17. Баранник В.В. Метод сборки и восстановления архитектуры рельефа изображения в инфокоммуникационных системах / В.В. Баранник, А.В. Слободянюк // Науково-практична конференція “Проблема інтеграції інформації – 2008: дослідження, розробки, інтелектуальна власність” Національний технічний університет “ХПІ”. – 2008. – С. 22.

18. Баранник В.В. Метод нумерации трехмерных связанных двоичных структур в двумерном полиадическом пространстве / В.В. Баранник, А.В. Слободянюк // П’ята наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. Х.: ХУ ПС. – 15-16.02.2009. – С. 35.

19. Баранник В.В. Структурно-комбинаторное представление данных в АСУ / В.В. Баранник, Ю.В. Стасев, Н.А. Королева – Х.: ХУПС, 2009. – 252 с.

20. Баранник В.В. Кодирование трансформированных изображений в инфокоммуникационных системах / В.В. Баранник, В.П. Поляков – Х.: ХУПС, 2010. – 212 с.

21. Багатоканальний електрозв’язок та телекомунікаційні технології: Підручник для студентів вищих навч. закладів / За редакцією Поповського В.В. – Харків: “Компанія СМІТ”, 2003. – 512 с.

22. Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории. – М.: Техносфера, 2006, – 279 с.

23. Божко А.Н., Жук Д.М., Маничев В.Б. Компьютерная графика: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 392 с.: ил. – (Информатика в техническом университете)

24. Бондарев В.Н. Цифровая обработка сигналов: методы и средства. / В.Н. Бондарев, Г. Трестер, В.С. Чернеча. – Харьков: Конус, 2001. – 398 с.

25. Борисенко А.А. Сжатие информации методом локальных срезов / А.А. Борисенко, Ю.А. Зубань // Вісник СумДУ, 2000. – №16. – С. 70 – 72.

26. Буров Є. Комп'ютерні мережі. / Є. Буров. – Львів: Бак, 1999. – 468 с.

27. Васильев В.Н. Компьютерная обработка сигналов / В.Н. Васильев, И.П. Гуров. – СПб: БХВ Санкт-Петербург, 1998. – 240 с.

28. Ватолин В.И. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео / В.И. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкин. – М.: ДИАЛОГ – МИФИ, 2002. – 384 с.

29. Галлагер Р. Теория информации и надежности связи: Пер. с англ. / Под ред. М.С. Пинскера и Б.С. Цыбакова. – М.: Сов. радио, 1974. – 720 с.

30. Гольденберг Л.М. Цифровая обработка сигналов / Л.М. Гольденберг, Б.Д. Матюшкин, М.Н. Поляк. – М.: Радио и Связь, 1985. – 312 с.

31. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

32. Горелов Г.В. Теория передачи сигналов на железнодорожном транспорте / Г.В. Горелов, А.Ф. Фомин, А.А. Волков, В.К. Котов. – М.: Транспорт, 1999. – 415 с.

33. Джайн А.К. Сжатие видеоданных: Обзор / А.К. Джайн // ТИИЭР. – 1981. – №3. – С. 71 – 117.

34. Девиссон Л.Д. Скорость создания сообщений. Теория и применение / Л.Д. Девиссон // Обработка изображений на ЦВМ. – М.: Мир, 1973. – 87 с.

35. Дмитриев В.И. Прикладная теория информации / В.И. Дмитриев. – М.: Высшая школа, 1989. – 320 с.
36. Дьякунов В.П. Вейвлеты. От теории к практике / В.П. Дьякунов. – М.: СОЛОН – Р, 2002. – 448 с.
37. Зив Дж. Универсальный алгоритм сжатия данных / Дж. Зив, А. Лемпел // ТИИЭР. – 1977. – №3. – С. 337 – 343.
38. Зив Дж. Алгоритм универсального сжатия данных / Дж. Зив // Проблемы передачи информации. – 1996. – №2. – С. 47 – 55.
39. Зубарев Ю.В. Цифровая обработка телевизионных и компьютерных изображений / Ю.В. Зубарев, В.П. Дворкович. – М.: Международный центр научной и технической информации, 1997. – 212 с.
40. Кларк Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи: Пер. с англ. / Под ред. Б.С. Цыбакова. – М.: Радио и связь, 1987. – 391 с.
41. Концепция построения и модернизации цифровой сети и передачи данных железнодорожного транспорта. – К.: Укрзалізниця, 1999. – 78 с.
42. Королев А.В. Оценка степени сжатия изображения / А.В. Королев, В.В. Баранник // Электрон. моделирование. – 2002. – № 4. – С. 33 – 42.
43. Королев А.В. Адаптивная маршрутизация в корпоративных сетях / А.В. Королев, Г.А. Кучук, А.А. Пашнев. – Х.: ХВУ, 2003. – 224 с.
44. Королёва Н.А. Сжимающее отображение на основе кодирования массивов длин серий / Н.А. Королёва // Системи обробки інформації. – Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2001. – Вип 5(15). – С. 67 – 74.
45. Красильников Н.Н. Теория передачи и восприятия изображений. Теория передачи изображений и ее приложения / Н.Н. Красильников. – М.: Радио и связь, 1986. – 248 с.
46. Кривошеев М.И. Цифровое телевидение / Кривошеев М.И. – М.: Связь, 1980. – 285 с.

47. Крук Б.И. Телекоммуникационные системы и сети. Том 1, 2, 3 / Б.И. Крук, В.Н. Попантонопуло, В.П. Шувалов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2003. – 647 с.
48. Лидовский В.В. Теория информации / В.В. Лидовский. – М.: Компания Спутник+, 2004. – 111 с.
49. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
50. Мастрюков Д. Алгоритмы сжатия информации. Часть 2. Арифметическое кодирование / Д. Мастрюков // Монитор. – 1994. – №1. – С. 20 – 23.
51. Мастрюков Д. Алгоритмы сжатия информации. Часть 4. Алгоритм LZW / Д. Мастрюков // Монитор. – 1994. – №2. – С. 8 – 11.
52. Миано Дж. Форматы сжатия изображений в действии / Дж. Миано. – М.: Триумф, 2003. – 354 с.
53. Методы передачи изображений. Сокращение избыточности. / Под. ред. У.К. Прэтта. – М.: Радио и связь, 1983. – 263 с.
54. Назаров Л.Е. Нейросетевой, фрактальный и JPEG алгоритмы сжатия / Л.Е. Назаров, З.Т. Назарова // Информационные технологии. – 2001. – №1. – С. 2 – 9.
55. Николаев Ф.А. Проблемы повышения достоверности в информационных системах / Ф.А. Николаев, В.И. Фолин, Л.М. Хохлачев. – Л.: Энергоатомиздат, 1982. – 138 с.
56. Олифер В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 3-е изд. / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – СПб.: Питер, 2006. – 958 с.
57. Орищенко В.И. Сжатие данных в системах сбора и передачи информации / В.И. Орищенко, В.Г. Сонников, В.А. Свириденко. – М.: Радио и связь, 1985. – 184 с.
58. Осипов Л.А. Обработка сигналов на цифровых процессорах / Л.А. Осипов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 112 с.

59. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработка изображений / Т. Павлидис. – М.: Радио и связь, 1986. – 400 с.

60. Параллельно-иерархический подход для обработки изображений / Тимченко Л.И., Грудин М.А., Кутаев Ю.Ф. и др. // Электрон. моделирование. – 1999. – №4. – С. 35 – 46.

61. Петров И.И. Телевидение на железнодорожном транспорте / И.И. Петров, Р.А. Косилов. – М.: Транспорт, 1991. – 198 с.

62. Петров М., Молочков В. Компьютерная графика (+CD): Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2002. – 736 с.: ил.

63. Пивоваров А.М. Методы обеспечения достоверности информации в АСУ / А.М. Пивоваров. – М.: Радио и связь, 1982. – 144 с.

64. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ. / Под ред, Д.Д Кловского. – М.: Радио и связь. 2000. – 800 с.

65. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Том 1, 2. / У. Прэтт. – М.: Мир, 1985. – 736 с.

66. Синепол В.С. Системы компьютерной видео-конференцсвязи / В.С. Синепол, И.А. Цикин. – М.: ООО “Мобильные коммуникации”, 1999. – 166 с.

67. Складар Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр.: Пер. с англ. / Б. Складар. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003. – 1104 с.

68. Слободянюк А.В. Методика анализа подходов относительно сокращения избыточности изображений с различной степенью достоверности в телекоммуникационных системах / А.В. Слободянюк // Системи управління, навігації та зв'язку. – ЦНДІ НіУ. – 2008. – № 4(8). – С. 158 – 160.

69. Современные компьютерные сети. 2-е изд. / В. Столлингс. – СПб.: Питер, 2003. – 783 с.

70. Cover Story. Современные технологии сжатия видеоданных // ВУТЕ/РОССИЯ. – 2000. – №11. – С.14 – 20.

71. Спортак Марк А. Компьютерные сети. Книга 2: Networking Essentials. Энциклопедия пользователя: Пер. с англ. / Марк А. Спортак и др. – К.: Издательство “ДиаСофт”, 1999. – 432 с.

72. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука / Д. Сэломон. – М: Техносфера, 2004. – 368 с.

73. Телекоммуникационные технологии на железнодорожном транспорте: Учебник для вузов ж. – д. транспорта / Г.В. Горелов, В.А. Кудряшов, В.В. Шмытинский и др. / Под ред. Г.В. Горелова. – М.: УМК МПС России, 1999. – 576 с.

74. Тропченко А.Ю., Тропченко А.А. Методы сжатия изображений, аудиосигналов и видео: Учебное пособие – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 108 с.

75. Хаханов В.И. Модели и архитектура вейвлет преобразований для стандарта JPEG 2000 / В.И. Хаханов, И.В. Хаханова, И.А. Побеженко // АСУ и приборы автоматики. – 2007. – № 2(139). – С. 4 – 12.

76. Цифровая обработка изображений в информационных системах / И.С. Грузман, В.С. Киричук и др. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.

77. Чернега В.С. Сжатие информации в компьютерных сетях / В.С. Чернега. – Севастополь: Изд – во СевГТУ, 1997. – 214 с.

78. Шелухин В.И. Телевидение и радиолокация на железнодорожном транспорте / В.И. Шелухин, О.И. Шелухин, Р.А. Косилов. – М.: Транспорт, 1994. – 176 с.

79. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1963. – 793 с.

80. Шлихт Г.Ю. Цифровая обработка цветных изображений. / Г.Ю. Шлихт. – М.: ЭКОМ, 1997. – 336 с.

81. Andrews H.C. Digital Image Restoration / H.C. Andrews, B.R. Hunt. – Englewood Cliffs (NJ): Prentice Hall, 1977. – XVIII, 238 p.

82. Barannik V.V. Architectural Presentation of Isotopic Levels of Relief of Images / V.V. Barannik, A.V. Slobodyanuk // Modern problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proceedings of the International Conference TCSET'2009, Lviv-Slavsko, Ukraine, February 20 – 24, 2009. – P. 115 – 117.

83. Barannik V.V. Isotopic Levels Architectural Presentation of Images Relief / V.V. Barannik, A.V. Slobodyanuk // IEEE East-West Design & Test International Symposium. Moscow, Russia, September 18 – 21, 2009. – P. 502 – 504.

84. Barlaud M. Pyramidal lattice vector quantization for multiscale image coding / M. Barlaud // IEEE Trans. image Proc. – 1994. – V3. – №4. P.367-381.

85. Beaumont J.M. Image data compression using fractal techniques / J.M. Beaumont // BT Technological Journal. – 1991. – V. 9 – №4. – P. 92–109.

86. Digital image processing / Collect.: Chellappa R. – los Alamitos (Ca) etal.: IEEE computer soc. press, 1992. – IX, 801p.

87. Fractal image compression: theory and application./ Ed.: Y.Fisher. – New York, 1995. - XVIII, 341 p.

88. Gonzalez D. Digital Image Processing, 2nd ed. / D. Gonzalez, C. Rafael, C. Richard – published by Pearson Education, Inc. publishing as Prentice Hall., 2002. – 793 p.

89. Gopinath R.A. On cosine-modulated wavelet orthogonal bases / R.A. Gopinath, C.S. Burrus // IEEE Trans. Image Proc. – 1995. – V.4. – №2. – P. 162-177.

90. Good J. The interaction algorithm and practical Fourier analysis // J. Royal Stat. Soc. (London). – 1958. – V. B-20. – P. 361-372.

91. Gofaizen O.V. On choice of parameters of digital sound for Enhanced SECAM TV system / O.V. Gofaizen, M.K. Mykhaylov, A.A. Zaitsev, K.V. Fomin, V.V. Shishkin. – Proceeding of the UNIRT, No. 7, 1996.

92. Habibi A. Image coding by linear transformation and block quantization / A. Habibi, P.F. Wintz // IEEE Trans. Commun. Tech. – 1971. V. COM – 19. – №1. P. 50-63.

93. Jaquin A.E. Image coding based on a fractal theory of iterated contractive image transformations / A.E. Jaquin // IEEE Trans. Image Proc. – 1992. – V.1. – №1. – P. 18-30.

94. Kossentini F. Subband image coding using entropy-constrained residual vector quantization / F. Kossentini, W.C. Chung, M. Smith // Information Processing and Management. – 1994. – V.30. – №6. – P. 887-896.

95. Nanda S. Tree coding of image subbands / S. Nanda, W.A. Pearlman // IEEE Trans. Image Proc. – 1992. – V.1. – №2. – P.133-147.

96. Ponomarenko N. Partition Schemes in DCT Based Image Compression / N. Ponomarenko, V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola // Technical Report 3-2002, ISBN 952-15-0811-6, Tampere University of Technology, Finland, 2002, 100 p.

97. Pratt W.K. Slant transform image coding / W.K. Pratt, W.H. Chen, L.R. Welch // Proc. Computer Processing in communications. – New York: Polytechnic Press, 1969. P. 63-84.

98. Sayood Khalid. Introduction to Data Compression. – San Francisco: Morgan Kaufman Publishers Inc., 1995. – 453p.

99. Schoenberg, Contributions to the problem of approximation of equidistant data by analytic functions, Quart. Appl. Math., vol. 4, pp. 45-99 and 112—141, 1946.

100. Senoo T. Vector quantization for entropy coding of image subbands / T. Senoo, B. Giord // IEEE Trans. Image Proc. – 1992. – V.1. – №4. – P. 526-532.

101. Stefanoiu D. Introduction to signal processing with wavelets / D. Stefanoiu // Studies on Information and Control. – 1994. – V.3. – №1. – P. 97-110.

102. Storer J.A. Data compression: Methods and theory / J.A. Storer. – Rockville (Md): Computer science press, 1988. – X, 413p.

103. Tan K.H. Layered image coding using the DCT pyramid / K.H. Tan, M. Ghanbari // IEEE Trans. Image Proc. – 1995. – V.4. – №4. – P. 512-516.

104. Wallace G.K. Overview of the JPEG (ISO/CCITT) Still image compression: image processing algorithms and techniques / G.K. Wallace // *Processing of the SPIE*. 1990. – Vol.1244. – p.220-233.

105. Wallace G.K. The JPEG algorithm for image compression standard / G.K. Wallace // *Communications of the ACM*. – 1991. Vol. 34, №4. – P.30-44.

106. Wallace G.K. The JPEG Still Picture Compression Standard / G.K. Wallace // *Communication in ACM*. – 1991. – V34 – №4. – P.31-34.

107. Windows Media Photo and JPEG 2000 Codecs Comparison./ Dmitriy Vatolin, Alexey Moskvina, Oleg Petrov. // Moscow: CS MSU Graphics&Media Lab. Video Group. – August, 2006. – 27 p.

Научное издание

БАРАННИК Владимир Викторович

ПОЛЯКОВ Владимир Петрович

СЛОБОДЯНЮК Александр Васильевич

КОДИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ВИДЕОКАДРОВ В ИНФОТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Монография

Редактор Л. М. Шевченко

Техн. редактор Т. В. Василенко

Компьютерная верстка А.В. Слободянюк

Підписано до друку 05. 01. 2010 р. формат 60 x 84 1/16.

Гарнітура Times New Roman

Ум.-друк. арк. 12,2

Тираж 500 пр. Зам. №

Видавець і виготівник

Вид-во «Каліграф»

32300 Кам'янець-Подільський, вул. Сумська 77/79

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК №2535 від 22.06.2006