

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

На правах рукописи

ОТМАН ШАДИ О.Ю.

УДК 621.327: 681.5

**МЕТОД СНИЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОТОКА ВИДЕОКАДРОВ В  
ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ  
ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ И КОДИРОВАНИЯ БАЗОВЫХ КАДРОВ**

05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети

Диссертация на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель  
БАРАННИК Владимир Викторович  
доктор технических наук, профессор

**Харьков – 2015**

## СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
РАЗДЕЛ 1. ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ СНИЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ СЖАТОГО ВИДЕОПОТОКА В ИНФОКОММУНИКАЦИЯХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВИДЕОИНФОРМАЦИОННЫХ УСЛУГ.....	13
1.1. Оценка технологий (возможности) доставки потока видеокадров в инфокоммуникационных системах.....	14
1.2. Обоснование влияния интенсивности видеопотока на эффективность функционирования инфокоммуникационных систем.....	25
1.3. Оценка характеристик технологий снижения интенсивности потока компрессированных видеокадров.....	29
1.4. Обоснование необходимости совершенствования методов обработки базовых кадров в иерархии MPEG-потока.....	34
Выводы.....	42
РАЗДЕЛ 2. ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ БАЗОВЫХ КАДРОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ КОДОВОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ .....	45
2.1. Обоснование технологической концепции обработки базовых кадров для снижения интенсивности кодового представления.....	46
2.2. Оценка уязвимости стандартизированной технологии обработки базовых кадров MPEG-технологии.....	55
2.3. Разработка методологических рекомендаций по совершенствованию технологии снижения интенсивности кодового представления базовых кадров.....	65

Выводы.....	75
РАЗДЕЛ 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОБРАБОТКИ БАЗОВЫХ КАДРОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ КОДОВОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ .....	79
3.1. Построение методологической базы для представления трансформанты в неравновесном позиционном неравномерно- диагональном пространстве.....	80
3.2. Разработка модели и метода кодирования диагональных неравномерных позиционных чисел.....	95
3.3. Построение метода реконструкции трансформант в диагонально-неравномерном базисе оснований на основе декодирования неравномерных кодограмм.....	107
Выводы.....	115
РАЗДЕЛ 4. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАЗРАБОТАННОГО И СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОТНОСИТЕЛЬНО ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПРЕССИОННОГО КОДИРОВАНИЯ ВИДЕОПОТОКА.....	120
4.1. Оценка интенсивности потока в расчете на базовый кадр.....	121
4.2. Оценка интенсивности видеопотока на группу кадров на основе стандартизированных и разработанной технологий компрессии трансформант.....	126
4.3. Оценка задержки на обработку базовых кадров видеопотока.....	130
Выводы.....	139
ВЫВОДЫ.....	141
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	148
Приложение А. Примеры обработки потока кадров в группе с различным качеством визуального восприятия.....	161
Приложение Б. Акты реализации результатов исследований.....	164

## СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ДКП	– дискретное косинусное преобразование
ДНПЧ	- диагональное неравномерное позиционное число
ИКС	– инфокоммуникационные системы
КБ	- конец блока
ПОСШ	– пиковое отношение сигнал/шум
В	- Bidirectional
NGN	- Next Generation Network
GOP	- Group of Pictures
I	- Intra
EDGE	- Enhanced Data-rates for GSM Evolution
MPLS	- Multiprotocol Label Switching
CDMA2000	- Code Division Multiple Access 2000
UMTS	- Universal Mobile Telecommunications System
P	- Predicted
WiMAX	- Worldwide Interoperability for Microwave Access
LTE	- Long-Term Evolution
OFDMA	- Orthogonal Frequency-Division Multiple Acces

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Доля видеoinформационного трафика в настоящий момент составляет более 80% по отношению к другим видам трафика. Это неизбежно приводит к росту интенсивности видеотрафика, и как следствие повышению нагрузки на инфокоммуникационную систему [3; 6; 8; 19; 24; 29; 37; 53; 54; 66; 76]. Проведенный анализ возможных средств доставки видеотрафика и требований, предъявляемых видеoinформационными сервисами, выявил наличие дисбаланса между интенсивностью видеопотока и пропускной способностью сети. Увеличение интенсивности видеoinформационного трафика существенно снижает эффективность функционирования ИКС и качество предоставляемых сервисов по QoS [54].

Существует практический аспект противоречия, состоящий в том, что пропускные способности инфокоммуникационных систем не соответствуют требованиям относительно интенсивности потоков несжатых кадров. Для преодоления сложившегося дисбаланса между реальной пропускной способностью сети и интенсивностью видеопотока, требуется обеспечить снижение последней на основе технологий компрессии потока видеокадров.

Анализ интенсивностей сжатого потока позволяет заключить, что существует противоречие, вызванное: с одной стороны ростом требований относительно качества видеoinформационных сервисов, а с другой стороны возникают сложности относительно предоставления видеoinформационных сервисов заданного качества с использованием беспроводных технологий. Это обусловлено недостаточными характеристиками технологий компрессии потоков видеокадров по таким показателям, как степень сжатия и количество операций на обработку в зависимости от качества визуального восприятия реконструируемых видеокадров [5 – 8; 22; 28; 36; 53; 62; 77 – 79; 85; 100 – 112].

Значит, можно заключить, что снижение интенсивности сжатого потока видеокадров в инфокоммуникационных системах для повышения качества

видеоинформационного сервиса является *актуальной научно-прикладной задачей*.

Проведенная оценка значений интенсивности видеопотока, приходящего соответственно на группу кадров и на поток из 24 кадров в секунду выявила следующее. Во-первых, интенсивность видеопотока, который требуется доставлять за одну секунду превышает реальную пропускную способность беспроводных технологий, для которых  $U_{\Pi} = 2 - 4$  Мбит/с. В случае использования кадра формата HD (1280x720) дисбаланс между интенсивностью  $I_k$  и скоростью передачи по сети  $U_{\Pi}$  будет расти. В итоге для передачи информации в реальном времени необходимо будет использовать канал связи с пропускной способностью не ниже, чем  $U_{\Pi} > 16$  Мбит/с. Во-вторых, вклад интенсивности кодового представления базового кадра в суммарную интенсивность  $I_k$  видеопотока в зависимости от качества визуальной реконструкции кадров изменяется от 50 до 75 %. При этом вклад базового кадра в общую интенсивность компрессионного представления возрастает с увеличением качества реконструкции видеопотока. Это указывает на значимое влияние интенсивности базового кадра на суммарную интенсивность видеопотока [8; 12; 14; 16; 54].

Отсюда в качестве направления совершенствования технологий компрессии видеопотока для снижения его интенсивности *предлагается* модернизировать методы обработки базовых кадров. Поэтому **тематика диссертационных исследований**, заключающаяся в создании метода снижения интенсивности видеопотока на основе кодирования базовых кадров для телекоммуникационных систем, является актуальной.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Диссертационные исследования проводились в соответствии со следующими программами и нормативными документами: Закона Украины «Про Концепцію Національної програми інформатизації» от 04.02.1998 № 75/98-ВР, Концепции развития связи Украины от 9.12.1999 р. N 2238, Национальных космических

программ Украины от 30.09.2008 N 608-VI, планами научной, научно-технической деятельности Харьковского национального университета радиоэлектроники, в рамках которых была выполнена НИР “Технології створення інтегрованих інформаційних систем на основі мереж цифрового мобільного зв’язку” (№ 0113U000360), в которой автор диссертации был исполнителем.

**Цель и задачи исследований.** Цель диссертационной работы состоит в разработке метода снижения интенсивности видеопотока в инфокоммуникационных системах для повышения качества видеосервиса на основе трансформирования и кодирования базовых кадров.

Для достижения сформулированной цели необходимо решить такие задачи:

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Обосновать направления совершенствования технологии обработки базовых кадров в составе платформы компрессии видеопотока.

2. Разработать информационную модель кодового представления базовых кадров относительно сокращения их избыточности.

3. Создать метод снижения интенсивности кодового представления базовых кадров в условиях сохранения заданного качества их визуального восприятия.

4. Построить верификацию метода обработки базовых кадров в технологию снижения интенсивности видеопотока для обеспечения требуемого качества видеосервиса с использованием инфокоммуникационных систем.

5. Разработать метод реконструкции базовых кадров в иерархии представления потока кадров.

6. Построить программную реализацию созданного метода обработки базовых кадров и провести сравнительную оценку эффективности их обработки с известными методами.

**Объект исследования.** Процессы повышения качества предоставления видеоинформационных услуг с использованием беспроводных телекоммуникационных технологий.

**Предмет исследования.** Методы и модели снижения интенсивности сжатого видеопотока для повышения качества видеоинформационных услуг.

**Методы исследования.** Обоснование направления повышения качества предоставления видеоинформационных услуг с использованием телекоммуникационных систем осуществлялось на основе системного подхода, базируясь на теоретическом аппарате исследования сложных систем. Разработка метода снижения интенсивности видеопотока на основе его компактного представления проводилось с использованием положений теории информации и кодирования. Исследование свойств трансформированных изображений осуществлялось на базе методов спектрального анализа. Оценка адекватности теоретических и практических результатов проводилась на основе методов математической статистики.

**Научная новизна полученных результатов** исследований заключается в следующем:

1. Впервые разработан метода формирования базиса оснований по неравномерно-диагональному принципу. Отличие в том, что основания для трансформанты выявляются для диагоналей по зигзагообразному обходу с учетом наличия высокочастотных составляющих спектра. Это позволяет дополнительно снизить количество структурной избыточности трансформированного представления фрагмента базовых кадров.

2. Получило дальнейшее развитие модель для оценки информативности представления фрагмента изображений на основе трансформирования и выявления комбинаторной избыточности. Отличие состоит в том, что оценка количества информации осуществляется для трансформанты как комбинаторного объекта формируемого по неравномерной диагональной структуре. Это позволяет оценить нижнюю границу эффективности кодового представления трансформанты.

3. Впервые разработан метод кодирования трансформант в неравновесном диагонально-неравномерном позиционном базисе оснований. Отличия состоят в том, что диагональ трансформанты рассматривается как



неравномерно-диагональное позиционное число с неравномерным кодообразованием кодограмм. Это позволяет дополнительно снизить количество разрядов на представление фрагмента базового кадра.

4. Впервые создана технология реконструкции кодограмм, содержащих кодовые значения ДНП чисел на основе декомпозиции служебной и информационной частей кодовой конструкции сжатого представления текущего фрагмента базового кадра. В отличие от других технологий проводится разметка кодового потока базового кадра на кодовые конструкции трансформант с последующей их разметкой на кодовые конструкции отдельных диагоналей с использованием информации о значениях оснований и фиксированного количества кодограмм. Это позволяет без потерь информации установить кодограммы по назначению, содержащейся в них информации.

5. Впервые построена обобщенная технология прямого и обратного кодовых преобразований диагоналей без учета априорной информации о ее длине и порядковом номере в трансформанте. В отличие от существующих подходов учитывается симметрия структурных свойств трансформанты относительно наибольшей диагонали, и формирование для нее диагонально-неравномерных позиционных чисел. Это позволяет упростить алгоритмические реализации процессов кодирования и декодирования.

Новизна полученных результатов подтверждается отсутствием разработанных моделей и методов в существующих стандартах кодирования видеопотока и технологий снижения интенсивности потока видеокадров.

**Обоснованность и достоверность полученных научных результатов** обеспечивается следующим: адекватностью результатов экспериментальных и теоретических исследований относительно битовой скорости потока видеокадров и временных затрат на обработку, полученных на основе программной реализации и математической модели; не противоречивостью полученных результатов положениям теории информации и методам позиционного кодирования.

**Практическое значение полученных результатов** полученных результатов состоит в том, что программная интеграция разработанных методов в инфокоммуникационные системы относительно использования существующих технологий сжатия обеспечивает:

- степень сжатия кадров I-типа для разработанного метода на основе диагонально-неравномерного позиционного кодирования (ДНПК) превышает степень сжатия для стандартизированных технологий (JPEG-технология), а именно для ПОСШ на уровне 42 дБ на 22 %;

- в случае обработки базового кадра на основе разработанного метода ДНПК его интенсивность снижается относительно случая обработки стандартизированной технологией в среднем от 15 % до 20 % в зависимости от ПОСШ.

Достигается снижение дисбаланса между интенсивностью  $I_k$  и скорость передачи по сети  $U_{\Pi}$  в среднем на 12 %. Это позволяет:

- с одной стороны использовать для передачи видеопотока ИКС технологий с более низкой пропускной способностью, а именно на уровне 4 - 10 Мбит/с;

- с другой стороны повысить качество визуальной оценки видеопотока за счет снижения искажений без повышения интенсивности видеопотока одновременно для Р-кадров с уровня 28дБ до уровня 32 дБ (табл. 4.2, второй и пятый столбцы), и для кадров В-типа с 22 дБ до 24 дБ.

Количество операций для созданного метода на основе ДПН кодирования трансформант относительно технологии JPEG<sub>1</sub>, использующей статические таблицы кодов, будет меньше в среднем на 10 %, относительно технологии JPEG<sub>2</sub> достигается: сокращение количества типовых операций произведения минимум на 53 %, а количества типовых операций сложения/вычитания - минимум на 75%.

В среднем количество операций на обработку видеопотока на основе сжатия базового кадра путем диагонально-неравномерного позиционного

кодирования трансформант относительно стандартизированных технологий обработки кадров сокращается в среднем на 45 %.

Практическая значимость полученных результатов диссертации подтверждается их применением при выполнении опытно-конструкторских работ на государственном научно-производственном предприятии «Объединение Коммунар» НТ СКБ «ПОЛИСВИТ» (акт реализации от 23.03.2014 г.)

**Личный вклад автора** диссертационной работы в публикациях, выполненных в соавторстве, заключается в следующем: в статье [96] - создается метод оценки интенсивности видеопотока с учетом дифференциального вноса типов кадров и компрессии базовых кадров на основе диагонально-неравномерного позиционного кодирования; в статье [10] - разработана технология реконструкции с учетом разметки кодового потока базового кадра на кодовые конструкции трансформант и отдельных диагоналей без учета априорной информации о ее длине и порядковом номере в трансформанте; в статье [11] - получена модель для оценки информативности и разработан метод кодирования трансформант в неравновесном диагонально-неравномерном позиционном базисе оснований с неравномерным кодообразованием кодограмм; в статье [12] - разрабатывается метод снижения дисбаланса между интенсивностью и скоростью передачи по сети с учетом кодирования трансформант на основе устранения структурной избыточности в диагональном направлении; в статье [13] - построена технологическая концепция формирования неравновесного диагонально-неравномерного базиса оснований на основе выявления динамических диапазонов для отдельных диагоналей; в статье [14] - разработаны методологические рекомендации по совершенствованию технологии снижения интенсивности кодового представления базовых кадров. Показано, что обеспечивается повышение качества предоставления видеoinформационных сервисов с использованием инфокоммуникационных систем; в статье [15] - построен метод и проведена сравнительная оценки эффективности метода обработки базовых кадров в

неравновесном базисе оснований; в статье [16] - разработан метод оценки интенсивности потока с учетом формирования кодовых конструкций на основе диагонально-неравномерного кодирования и статистической кодирования DC-компонент. Проведены экспериментальные оценки относительно повышения эффективности функционирования телекоммуникационных сетей.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты диссертации докладывались и были одобрены на следующих научно-технических конференциях и семинарах: International Symposium «Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2014)», (Kiev, Ukraine, September 26–30, 2014); Чотирнадцятій міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатики та моделювання», (Харків-Ялта 22-28 вересня 2014 р.); Науково-методичній конференції «Сучасні проблеми телекомунікації і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2014»; Науково-технічній конференції «Інформатика, управління та штучний інтелект» / Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», (Харків, 26 – 27 листопада 2014 р.); Третій міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатизації», (Київ, 11 – 13 грудня 2014 р.); XIII International Conference «The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)», (Lviv – Polyana, Ukraine, February 26 – 29, 2015); Науково-технічна конференція «Інформаційна безпека України» / Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, 12-13 березня 2015 р.).

**Публикации.** Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 16 научных трудах, среди которых 9 статей, в частности - одна статья без соавторов и четыре статьи опубликованы в журналах, которые входят в международные науко-метричних бази. Апробация результатов диссертации отображена в 7 тезисах докладах на международных научно-технических конференциях. В частности две апробации на конференциях, которые входят в базу международной организации IEEE.

## РАЗДЕЛ 1

### ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ СНИЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ СЖАТОГО ВИДЕОПОТОКА В ИНФОКОММУНИКАЦИЯХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВИДЕОИНФОРМАЦИОННЫХ УСЛУГ

Проводится анализ тенденций развития инфокоммуникационных систем за последнее десятилетие. В результате чего показано, что увеличивается рост относительно использования беспроводных технологий для доставки видеоинформационного трафика. Обосновывается, что интенсивность видеопотока значимым образом влияет на снижение эффективности функционирования инфокоммуникационной системы. Выявляется наличие противоречия, вызванного: с одной стороны ростом требований относительно качества видеоинформационных сервисов, а с другой стороны возникают сложности относительно предоставления видеоинформационных сервисов заданного качества с использованием беспроводных технологий. Это обусловлено недостаточными характеристиками технологий компрессии потоков видеокадров по таким показателям, как степень сжатия и количество операций на обработку в зависимости от качества визуального восприятия реконструируемых видеокадров. Проводится оценка значений интенсивности видеопотока, приходящего соответственно на группу кадров и на поток из 24 кадров в секунду. В результате чего показано следующее. Во-первых, интенсивность видеопотока, который требуется доставлять за одну секунду превышает реальную пропускную способность беспроводных технологий. Во-вторых, вклад интенсивности кодового представления базового кадра в суммарную интенсивность видеопотока является достаточно значимым. Отсюда обосновывается направление совершенствования технологий компрессии видеопотока для снижения его интенсивности.

## **1.1 Оценка технологий (возможности) доставки потока видеок кадров в инфокоммуникационных системах**

Инфокоммуникационные системы за последнее десятилетие претерпевают значительное развитие. Основная причина здесь заключается в стремлении компаний и частных лиц осуществлять обмен значительным количеством различных типов информации.

Для современных инфокоммуникационных систем выделяют следующие ее составные компоненты (рис. 1.1) [19; 23; 24; 29; 35; 37; 45; 56; 66]:

1) транспортная сеть (backbone или core network), которая объединяет отдельные сети доступа, обеспечивая транзит трафика между ними по относительно высокоскоростным каналам. Среди технологий транспортной сети могут быть использованы такие как DWDM, WDM, MPLS, GigabitEthernet, SDH, ATM, FrameRelay, WiMax;

2) информационные центры или центры управления сервисами (data centers или services control point). Это собственные информационные ресурсы сети, на основе которых осуществляется обслуживание пользователей. В качестве информационных центров могут выступать сервера IP-TV, VoIP, Web, FTP, NAS, игровые сервера, сервера приложений, распределенных вычислений и т.д.;

3) сеть доступа (access network), которая предназначена для концентрации информационных потоков, поступающих по многочисленным каналам связи от оборудования пользователей в сторону узлов транспортной сети. Сеть доступа может быть построена с использованием таких технологий проводного доступа семейства технологий - xDSL, Ethernet, беспроводного доступа - WiFi, WiMax;

4) абоненты сети доступа, являющиеся потребителями информации и ее источниками. Абоненты создают нагрузку на сеть доступа, отсылая запросы на предоставления услуг, а так же являются активными участниками в качестве источника для пиринговых сетей (torrent, skype, direct connection и т.д.).

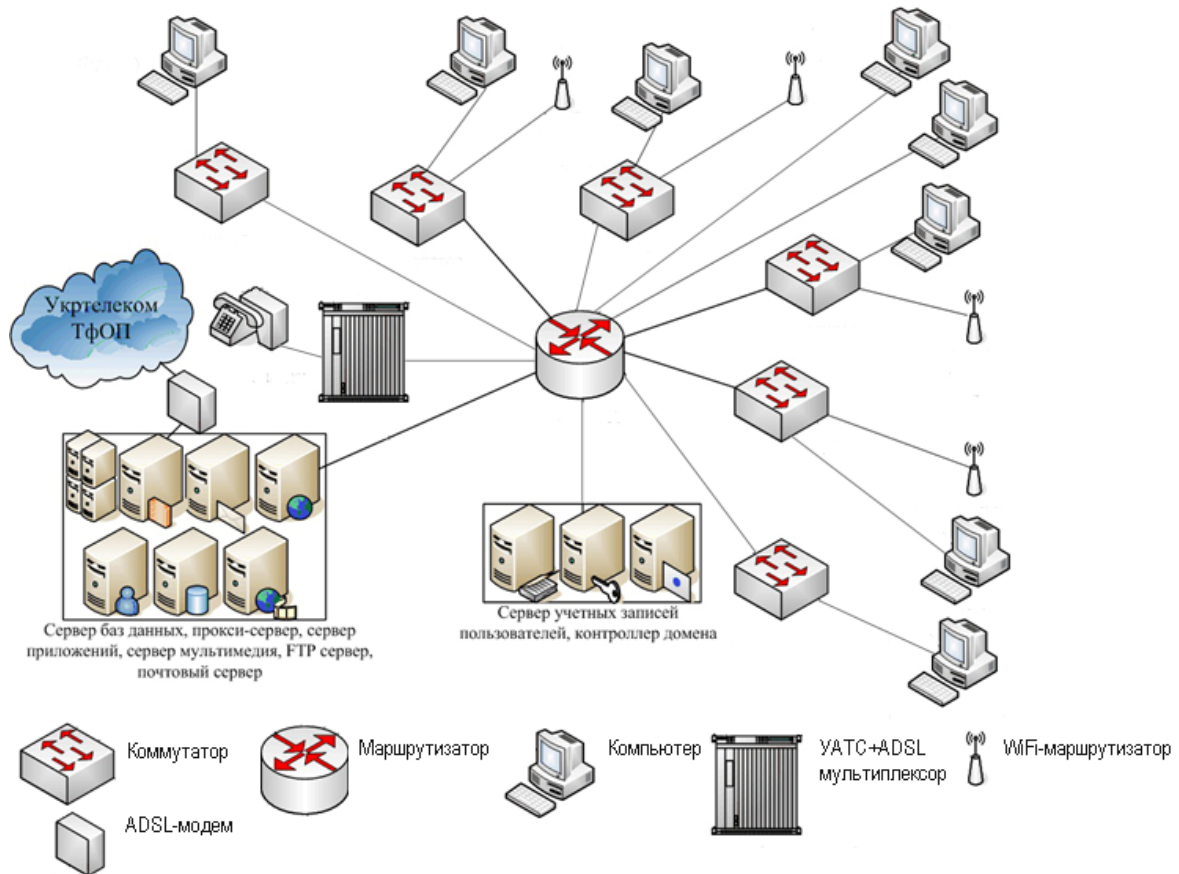


Рис. 1.1. Фрагмент телекоммуникационной сети для проведения эксперимента

Транспортная сеть объединяет отдельные сети доступа, выполняя функции транзита трафика между ними по высокоскоростным каналам. Коммутаторы транспортной сети могут оперировать не только информационными соединениями между отдельными пользователями, но и агрегированными информационными потоками, переносящими данные большого количества пользовательских соединений. В результате информация с помощью транспортной сети попадает в сеть доступа получателей, демультиплексируется там и коммутируется таким образом, что на входной порт оборудования пользователя поступает только та информация, которая ему адресована.

Информационные центры/центры управления сервисами - это собственные информационные ресурсы сети, на основе которых осуществляется обслуживание пользователей.

Сеть доступа представляет собой нижний уровень иерархии телекоммуникационной сети. К этой сети подключаются конечные (терминальные) узлы - оборудование, установленное у пользователей (абонентов, клиентов) сети. В случае компьютерной сети конечными узлами являются компьютеры, телефонной - телефонные аппараты, а телевизионной или радиосети - соответствующие теле- и радиоприемники. В рамках специфики требований по пропускной способности определяются необходимые характеристики и технологии абонентского доступа. В табл. 1.1 приведен сравнительный анализ технологий «последней мили», применяемых в настоящее время.

Таблица 1.1

## Сравнительный анализ технологий абонентского доступа

Характеристики для сравнения	Технологии «последней мили»			
	xDSL (ADSL2+)	Ethernet (FastEthernet)	WiFi (802.11n)	WiMax (802.16d)
Скорость передачи, Мбит/с	24 Мбит/с upstream 1,4 Мбит/с downstream	100 Мбит/с	150 Мбит/с	75 Мбит/с
Область использования	POTS/ISDN	LAN/WLAN	WLAN	WMAN
Радиус/дальность действия	900-2500 м	100-150 м	100-3500 м	6-13 км
Вид доступа	кабель	кабель	беспроводной	беспроводной

Проводные технологии более эффективны с позиции разделения ресурсов пропускной способности и получения гарантированной скорости передачи. В тоже время, как видно из табл. 1.1, для получения абонентами высоких скоростей в сети доступа с использованием проводных соединений расстояние до узла концентрации абонентской нагрузки не должно превышать 150 м. В то время как беспроводные технологии разделяют частотный ресурс между абонентами, уменьшая тем самым пропускную способность для конечного пользователя. При этом для беспроводных технологий чтобы обеспечить расстояния до 3,5 км, требуется применение направленных антенн. Так же



беспроводные технологии сильно подвержены влиянию помех, создаваемых со стороны аналогичных устройств и устройств, не обладающих электромагнитной совместимостью (ЭМС).

Развитие беспроводных систем связи и их характеристик относительно предоставления различных сервисов классифицируется в соответствии с поколениями. Выделяют следующие поколения [8; 23; 35; 54; 66].

*Первое* поколение 1G (First Generation) определяет характеристики связи и категории услуг для аналоговых и цифровых систем связи таких как AMPS, TACS, NMT, C-450, RTMS, Radiocom 2000, NTT. Категории обеспечения сервиса для систем аналоговой связи установлены аналогично как для аналоговых автоматических телефонных станций (АТС). Для цифровых систем приняты следующие характеристики обеспечения сервиса: скорость передачи речи – до 9,6 Кбит/с; скорость передачи данных – 1,9 Кбит/с. Такие скорости не приемлемы для предоставления интерактивных видеосервисов и видеосервисов реального времени.

*Второе* поколение (2G) определяет характеристики связи и категории сервисов для цифровых систем связи таких как D-AMPS или IS-54 (более новая версия - IS-136), GSM-900, JDC (в последующем переименован в PDC). В рамках расширения услуг, по сравнению с 1G сетями увеличена: емкость сетей; качество связи (за счет использования цифровых методов передачи); возможность отправки и приема коротких текстовых сообщений (SMS); скорость передачи данных до 14,4 Кбит/с; скорость канала речевого тракта (до 13 Кбит/с). Предоставление видеоинформационных услуг возможно лишь в рамках пропускной способности канала передачи данных.

*Поколение 2.5G* характеризуется появлением сервиса мобильной связи GPRS (General Packet Radio Service), который является надстройкой над технологией мобильной связи GSM, осуществляющей пакетную передачу данных. Технология GPRS позволяет пользователю сети сотовой связи производить обмен данными с другими устройствами в сети GSM и с внешними сетями, в том числе Интернет. Технология GPRS предполагает

тарификацию по объёму переданной/полученной информации, а не по времени. Так же GPRS предоставляет возможность использования сразу нескольких каналов и обеспечивает высокие скорости передачи данных - теоретический максимум до 100 Кбит/с. По принципу работы GPRS аналогичен работе стеку протоколов TCP/IP: данные разбиваются на пакеты и отправляются получателю (необязательно одним и тем же маршрутом), где происходит их сборка. Пакеты могут иметь формат IP или любой другой сетевого уровня. Появляется возможность использовать любые стандартные протоколы транспортного и прикладного уровней, применяемых в Интернете, а именно: TCP, UDP, HTTP, HTTPS, SSL, POP3, XMPP.

*Поколение 3G* поддерживает скорости передачи данных до 2 Мбит/с для стационарных и до 384 Кбит/с для мобильных терминалов. Обеспечение таких скоростей связано с переходом на новые стандарты связи, в том числе:

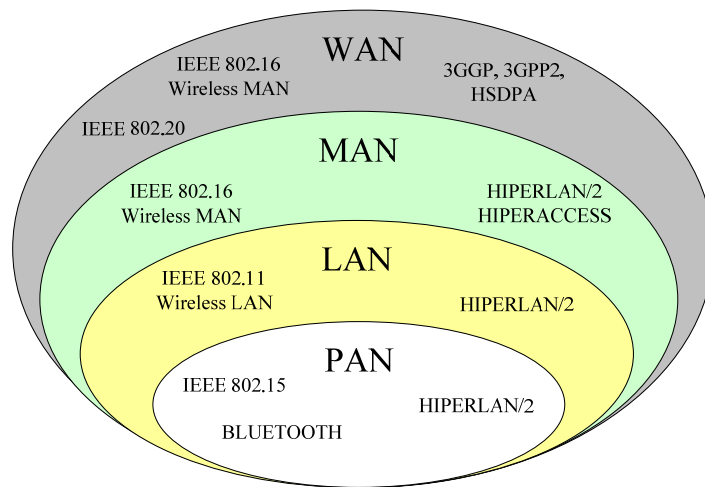
- стандарт EDGE (Enhanced Data-rates for GSM Evolution);
- стандарт CDMA2000 (Code Division Multiple Access 2000);
- стандарт UMTS (Universal Mobile Telecommunications System).

Стандарт EDGE представляет собой цифровую технологию беспроводной передачи данных для мобильной связи, которая функционирует как надстройка над 2G и 2.5G (GPRS) - сетями. Технология EDGE обеспечивает передачу данных со скоростью до 474 Кбит/с в режиме пакетной коммутации. Это соответствует требованиям ITU к сетям 3G.

Сейчас развиваются технологии связи *четвертого* поколения. Стандарты поколения 4G должны обеспечить скорости входящих данных в 1 Гбит/с для стационарных и 100 Мбит/с для мобильных терминалов. Технологии WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) и LTE (Long-Term Evolution) считаются технологиями четвертого поколения. Но это верно лишь отчасти. Они обе используют новые эффективные схемы мультиплексирования, а именно множественный доступ с ортогональным частотным разделением каналов (OFDMA - Orthogonal Frequency-Division Multiple Acces) и для них отсутствует канал для передачи голоса. Их пропускная способность

используется для различного набора услуг передачи данных, а в частности и видеоинформационных услуг.

Значит, можно утверждать, что повышенное значение приобретают беспроводные технологии. Роль технологий такого типа в системах различного масштаба показана на рис. 1.2. Понятно, что экономически выгодней использовать станции 4G, которые обеспечат передачу данных на расстоянии десятков километров [3; 8; 23; 54; 55].



PAN – сети персонального радиуса действия; LAN – сети локального радиуса действия;

MAN – сети городского радиуса действия; WAN – сети междугородного и международного радиуса действия

Рис. 1.2. Роль сетей беспроводного доступа в системах различного масштаба

Значимость беспроводных технологий в сфере предоставления услуг различного типа подтверждают ежегодные исследования компании Cisco. При этом важно отметить, что характерной чертой существующих сетей и сетей следующего поколения является рост их использования для доставки видеоинформационного трафика (рис. 1.3) [3; 5 - 8; 22 - 24; 29; 33; 35 - 38; 42; 46; 47; 55; 56; 76 - 83]. Доля видеоинформационного трафика в настоящий момент составляет более 80% по отношению к другим видам трафика.

Такая тенденция неизбежно приводит к росту интенсивности видеотрафика, и как следствие повышению нагрузки на инфокоммуникационную систему.

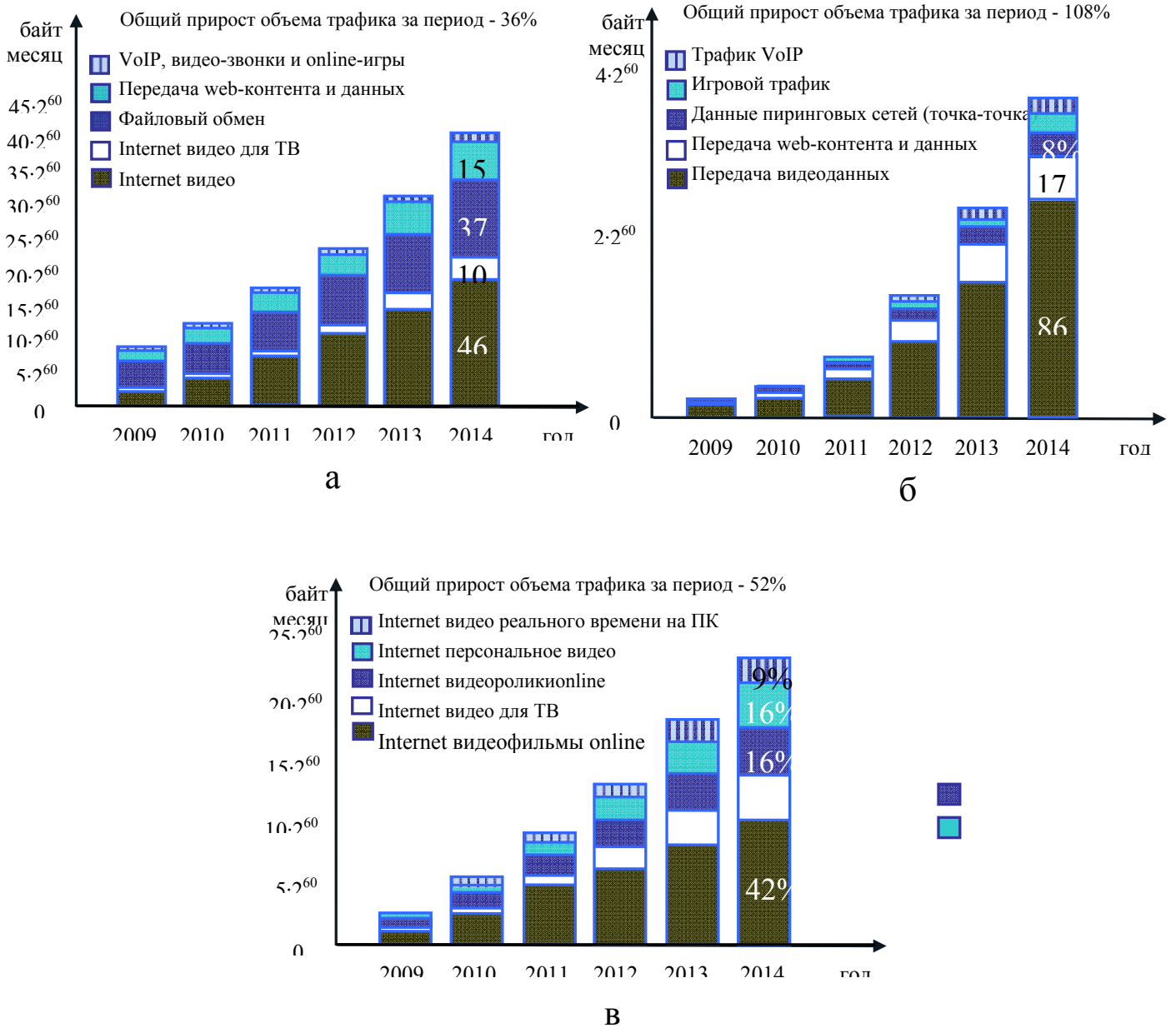


Рис. 1.3. Диаграммы по результатам ежегодного исследования VNI компанией Cisco: а) тенденции роста трафика в проводных сетях; б) тенденции роста трафика в мобильных сетях; в) тенденции роста трафика для всех категорий сетей

Интенсивность видеотрафика зависит от интенсивности потока видеок кадров. Соответствующая оценка интенсивности  $I(v_t)$  потока кадров в зависимости таких параметров видеопотока как частота  $v_t$  появления кадров за 1 с, размер изображения  $M \times N$  и глубина цвета  $b$ , осуществляется по формуле (рис. 1.4)

$$I(v_t) = v_t \times M \times N \times b \text{ (бит).}$$

Здесь  $I(v_t)$  - интенсивность видеопотока определяемая как объём видеопотока за 1 сек с частотой  $v_t$  кадров/с;  $M \times N$  - произведение количества строк  $M$  на количество столбцов  $N$ .

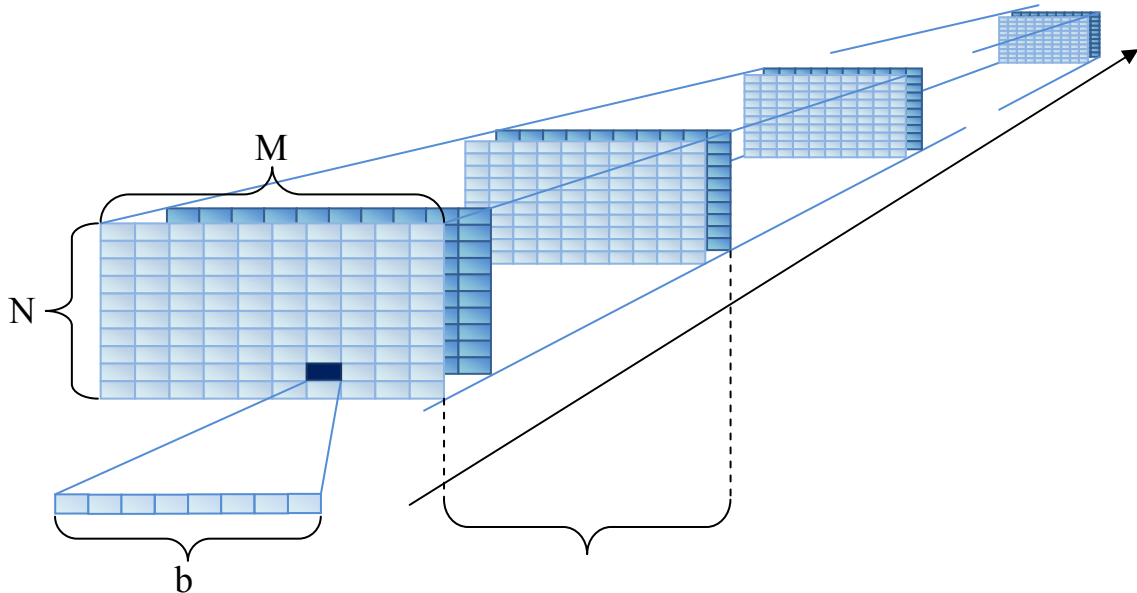


Рис. 1.4. Структура видеопотока с параметрами разрешения

Расчетные значения интенсивности видеотрафика представлены в табл.1.2 [8; 28; 36; 53 - 55].

Таблица 1.2.

Средняя интенсивность видеопотока в зависимости от размера за 1 с

Формат видеоданных размером изображения $M \times N$	Частота кадров/с $v_t$	Средняя интенсивность видеопотока $I(v_t)$ Мбит/с
CIF 352×288	24; 30	60
SD 720×576	30	250
ED 720×576	50	500
HD 1280×720	50	1105
Full HD 1920×1080	30; 50	2500

По данным табл.1.2 на рис.1.5 в виде диаграммы представлены интенсивности видеопоток в зависимости формата видеокадра.

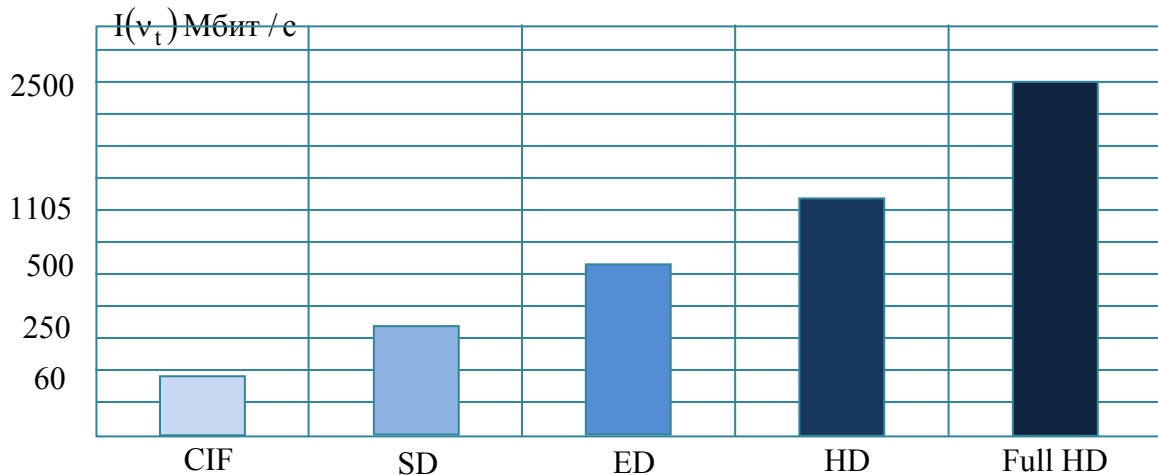


Рис. 1.5. Средняя интенсивность видеопотока за 1 с в зависимости от формата видеокadra

Анализ диаграмм на рис. 1.5 показывает, что интенсивность  $I(v_t)$  потока видеокadров за 1 с для кадров, соответствующих формату HD (1280×720) и Full HD (1920×1080), превышает 3 Гбит/с. При этом с ростом частоты кадров интенсивность видеопотока будет увеличиваться, и уже при частоте 60 кадров/с будет превышать 10 Гбит/с.

В связи с чем, предоставляет значительную актуальность оценка соответствия между интенсивностью видеопотоков и пропускных способностей существующих беспроводных технологий.

Для предоставления сервиса видеосвязи важным аспектом является показатель скорости передачи данных по каналам связи в обоих направлениях. В табл. 1.3 приведены характеристики зависимости минимальной и рекомендуемой скорости соединения в зависимости от типа видеосервиса для пиринговой сети голосовых и видео услуг Skype. В табл. 1.4 приведена краткая характеристика поколений беспроводной связи, а в табл. 1.5 – характеристики предоставления видеоинформационных сервисов сетями различных поколений [8; 28; 33; 36; 53 - 55; 76 - 79].

Очевидно, что тенденции роста пропускной способности каналов телекоммуникационных систем приводят к увеличению возможностей по предоставлению видеоинформационных сервисов.

Таблица 1.3.-

## Зависимости скорости соединения от типа видеосервиса

Тип видеосервиса	Минимальная скорость на прием / передачу	Рекомендуемая скорость на прием / передачу
Видеосвязь / Демонстрация экрана	128 Кбит/с / 128 Кбит/с	300 Кбит/с / 300 Кбит/с
Видеосвязь (высокое качество)	400 Кбит/с / 400 Кбит/с	500 Кбит/с / 500 Кбит/с
Видеосвязь (стандарт HD)	1,2 Мбит/с / 1,2 Мбит/с	1,5 Мбит/с / 1,5 Мбит/с
Групповая видеосвязь (3 участника)	512 Кбит/с / 128 Кбит/с	2 Мбит/с / 512 Кбит/с
Групповая видеосвязь (5 участников)	2 Мбит/с / 128 Кбит/с	4 Мбит/с / 512 Кбит/с
Групповая видеосвязь (более 7 участников)	4 Мбит/с / 128 Кбит/с	8 Мбит/с / 512 Кбит/с

Таблица 1.4.-

## Краткая характеристика поколений беспроводной связи

Поколение	1G	2G	2.5G	3G	3.5G	4G
Начало разработок	1970	1980	1985	1990	1998	2000
Реализация	1984	1991	1999	2002	2006-2007	2008-2010
Сервисы	аналоговый стандарт, речевые сообщения	цифровой стандарт, поддержка коротких сообщений (SMS), передача данных со скоростью до 9,6 кбит/с	большая ёмкость, пакетная передача данных	ещё большая ёмкость, скорости до 2 Мбит/с	увеличение скорости сетей третьего поколения	большая ёмкость, IP-ориентированная сеть, поддержка мультимедиа, скорости до сотен мегабит в секунду
Скорость передачи	1,9 Кбит/с	9,6-14,4 Кбит/с	115Кбит/с (1 фаза) 384 Кбит/с (2 фаза),	2 Мбит/с	3-14 Мбит/с	1 Гбит/с
Стандарты	AMPS, TACS, NMT	TDMA, CDMA, GSM, PDC	GPRS, EDGE (2.75G), 1xRTT	WCDMA, CDMA2000, UMTS	HSDPA	единый стандарт
Сеть	PSTN	PSTN	PSTN, сеть пакетной передачи данных	сеть пакетной передачи данных	сеть пакетной передачи данных	Интернет

При этом соответственно повышается и спрос на такие услуги. В настоящий момент, как видно на рис. 1.3, видеоинформационные сервисы являются самыми востребованными.

Исходя из многообразия технологий, как сетей доступа, так и транспортных сетей, актуальным является создание открытой, стандартной пакетной инфраструктуры, которая способна эффективно поддерживать всю гамму существующих приложений и сервисов, обеспечивать необходимую масштабируемость и гибкость, а так же позволять реагировать на новые требования по функциональности и пропускной способности. Такой инфраструктурой являются сети следующего поколения - NGN (Next Generation Network)

Таблица 1.5.-

Характеристики предоставления видеoinформационных сервисов сетями различных поколений

Набор предоставляемых видеосервисов	1G	2G	3G	4G
Служба мультимедийных сообщений - MMS (Multimedia Messaging Service)	-	+	+	+
Передача неподвижных изображений (низкого/высокого качества или разрешения)	+/-	+/+	+/+	+/+
Видеотелефонная связь (Videotelephony)	-	-	+	+
Видеоконференция (Videoconference)	-	-	+	+
Потоковое мультимедиа (Stream Media)	-	-	+	+
			(низкого качества)	(высокого качества)

Основное отличие сетей следующего поколения от традиционных сетей в том, что вся информация, циркулирующая в сети, разбита на две составляющие. Это сигнальная информация, обеспечивающая коммутацию абонентов и предоставление услуг, и непосредственно пользовательские данные, содержащие полезную нагрузку, предназначенную абоненту (голос, видео, данные).

Сети NGN базируются на интернет технологиях включающих в себя IP протокол и технологию многопротокольной коммутации по меткам - MPLS (Multiprotocol Label Switching). Основная концепция определяет переход от сетей с коммутацией каналов к сетям с коммутацией пакетов на базе программного коммутатора, а в дальнейшем к сети на базе архитектуры



спецификации передачи мультимедиа в электросвязи на основе протокола IP - IMS (IP Multimedia Subsystem).

Из проведенного анализа возможных средств доставки видеотрафика и требований, предъявляемых видеоинформационными сервисами можно заключить следующее:

- тенденция роста интенсивности мультимедийного трафика, как видно из анализа диаграмм на рис. 1.3, существенно опережает пропускные возможности сетей;

- объединение всего многообразия телекоммуникационных систем в единую концепцию NGN ускоряют рост спроса на предоставление видеоинформационных услуг;

- сети доступа являются самым узким звеном при обеспечении производительности телекоммуникационных систем. Это связано с тем, что они зачастую обладают малыми, по сравнению с транспортными сетями, пропускными способностями.

Решить вопрос с возникающим дисбалансом на основе только технологий маршрутизации является проблематичным. Особенно такая проблемность проявляется в условиях обработки потоков с высокой интенсивностью. Поэтому необходимо оценить влияние роста интенсивности на характеристики инфокоммуникационных систем.

## **1.2. Обоснование влияния интенсивности видеопотока на эффективность функционирования инфокоммуникационных систем**

Видеопоток, создаваемый абонентами сети, формируется на основе отдельных файлов изображений, видео по запросу или потокового видео различного качества. Предварительно видеопоток разбивается на пакеты. Формирователь пакетов (рис. 1.6) на стороне абонента отправляет пакеты на

кодер канала, а затем - в сеть доступа по мере накопления необходимого объема данных, либо же по тайм-ауту (это справедливо для потокового видео). После чего потоковая информация преобразуется в пакетную форму и передается на кодер канала с последующей ее транспортировкой по сети [54].

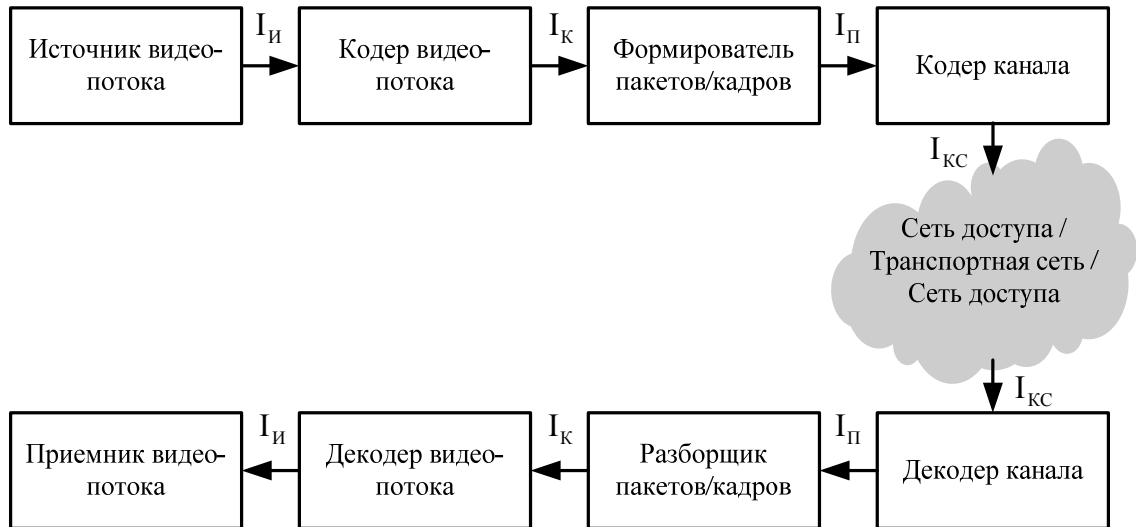


Рис. 1.6. Процесс преобразований информации от источника до приемника видео-потока:  $I_{и}$  - видеопоток на выходе видео-источника;  $I_{к}$  - сжаты видеопоток на выходе кодера;  $I_{п}$  - информационный поток на выходе формирователя пакетов/кадров;  $I_{кк}$  - информационный поток на выходе кодера канала

В этих условиях оценка влияния интенсивности видеотопока на эффективность функционирования инфокоммуникационной системы сводится к оценке влияния на ее основные характеристики. К основным характеристикам эффективности функционирования сети при обеспечении приемлемого качества предоставления сервисов, заданных QoS, относятся:

- задержка узла доступа, которая равна интервалу между моментом поступления пакета на вход какого-либо сетевого устройства и моментом его появления на выходе этого устройства;

- вероятность потерь пакетов на узле доступа из-за переполнения буферной памяти;

- загрузка узла доступа, показывающая задействованную вычислительную способность узла доступа при обработке принятых пакетов;
- пропускная способность, которая отражает объем данных, переданных сетью в единицу времени;
- задержка от источника до получателя, которое определяется как время между возникновением запроса к какому-либо сетевому сервису и получением ответа на него.

Наиболее важными из приведенных характеристик инфокоммуникационных систем (ИКС) в рамках предоставления видеoinформационных сервисов для пользователей являются:

- задержка узла доступа;
- задержка от источника до получателя;
- вероятность потерь пакетов на узле доступа;
- загрузка узла доступа.

Среди таких характеристик наиболее комплексной и ключевой характеристикой качества функционирования ИКС является задержка от источника до получателя. Задержка  $t_p$  от источника до получателя складывается из следующих составляющих (рис. 1.7) [8; 28; 36; 53 - 55]:

$$t_p = t_{\text{пакет}} + t_{\text{ад}} + t_{\text{транз}} + t_{\text{ад}} + t_{\text{буф}}, \quad (1.1)$$

где  $t_p$  – время передачи пакета от источника до получателя;

$t_{\text{пакет}}$  – время пакетизации (время формирования кадра, куда входят время накопления необходимого для передачи объема данных, выявление направления передачи, расчет контрольной суммы, добавление ключевых полей);

$t_{\text{ад}}$  – время задержки при транспортировке в сети доступа (задержка распространения по каналам связи и на узлах доступа);

$t_{\text{транз}}$  – время задержки при распространении в транзитной сети (время обработки на узлах коммутации транзитной сети);

$t_{буф}$  – время задержки в приёмном буфере получателя.



Рис. 1.7. Составляющие задержки от источника до получателя

Поведем оценку задержки  $t_p$  на передачу видеопотока, формируемому на основе несжатых кадров, в зависимости от интенсивности видеопотока при  $v_t = 1$  и скорости  $U_{п}$  передачи по каналу связи (рис. 1.8). Аналитически такая зависимость представляется в виде следующей формулы [12; 15; 28; 53 - 55]:

$$t_p \sim \frac{I(v_t)}{U_{п}}$$

Анализ диаграмм на рис. 1.8 показал, что задержка на передачу потока несжатых видеокадров в зависимости от его интенсивности достигает десятков минут [8; 12; 15; 28; 36; 53 - 55].

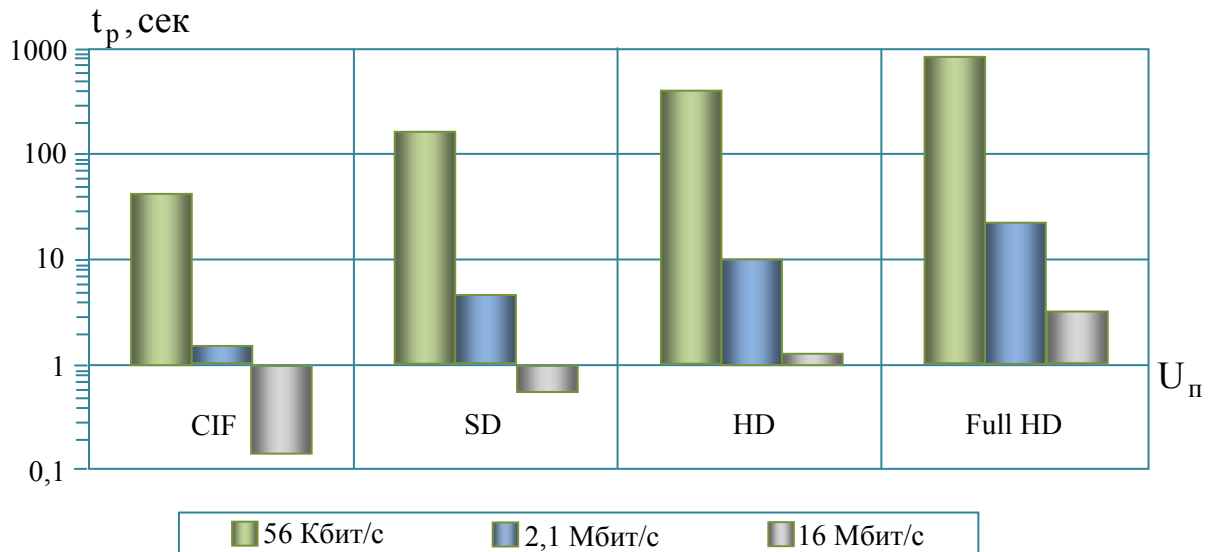


Рис. 1.8. Оценка величины  $t_p$  в зависимости от интенсивности потока несжатых видеокадров при  $v_t = 1$

Наиболее высокие задержки по доставки видеопотока соответствуют варианту выбора размера кадра видеопотока в соответствии с форматом Full HD.

Отсюда можно утверждать, что существует практический аспект противоречия, состоящий в том, что пропускные способности инфокоммуникационных систем не соответствуют требованиям относительно интенсивности потоков несжатых кадров.

Для преодоления сложившегося дисбаланса между реальной пропускной способностью сети и интенсивностью видеопотока, требуется обеспечить снижение последней. Этого можно достичь на основе технологий компрессии потока видеокадров.

### **1.3. Оценка характеристик технологий снижения интенсивности потока компрессированных видеокадров**

Наиболее распространенными, и принятыми международными союзами ITU-T, ISO/IEC в качестве стандартов видеопотоков являются следующие технологии: Motion JPEG; MPEG-2; H.261/H.263; MPEG-4 part 2 (visual); H.264/MPEG-4 part 10 [1; 2; 6; 25 – 28; 31 – 33; 47; 51; 53; 62; 74; 77 – 79; 88; 98 – 127].

Основными характеристиками технологий компрессии являются:

1. Степень  $k_c$  сжатия видеопотока, т.е. степень уменьшения исходной интенсивности  $I(v_t)$ . Такая зависимость выражается следующим соотношением:

$$I_k = I(v_t) / k_c. \quad (1.2)$$

Наибольшее снижение интенсивности видеопотока достигается в случае сокращения психовизуальной избыточности. Устранение психовизуальной избыточности сопровождается внесением искажений. Данные искажения проявляются на приемной стороне при реконструкции видеопотока. В связи с чем,

важной характеристикой видеопотока с позиции обеспечения заданного качества видеосервиса является качество его реконструкции.

2. Метрика визуального качества реконструкции видеопотока. Качество реконструируемого видеопотока определяется степенью соответствия получаемых видеоинформационных моделей реальным объектам. Данная категория оценивается на основе количественной метрики  $h$  - пикового отношения сигнал/шум (ПОСШ) [5; 28; 30; 38 – 40; 75; 87]

$$h = 20 \lg \left( 2^b \sqrt{M N v_t} / \sqrt{\sum_{\xi=1}^M \sum_{\gamma=1}^N (a_{\xi,\gamma} - a'_{\xi,\gamma})^2} \right) \text{ (дБ)}. \quad (1.3)$$

Здесь  $a_{\xi,\gamma}$ ,  $a'_{\xi,\gamma}$  - значения исходного и восстановленного на приемной стороне элементов, расположенных на позиции  $(\xi;\gamma)$ ;  $b$  - глубина оцифровки элемента изображения;  $M \cdot N$  - пространственное разрешение кадра (количество строк  $\times$  количество столбцов). Нижний порог такой метрики, для которого сохраняется приемлемое качество визуализации контролируемых объектов, находится на уровне 28 – 35 дБ.

Зависимость интенсивности  $I_k$  сжатого видеопотока от пикового отношения  $h$  сигнал/шум для различных типов кодеков представлены в табл. 1.6 и 1.7.

Таблица 1.6.

Значения  $I_k$  от  $h$  для разных типов кодеков, М бит/с

h дБ	28	30	32	34	36	38
Тип кодека						
H.264/AVC	0,5	0,6	0,87	1,2	2	2,5
MPEG-4	0,6	0,87	1,2	1,75	2,5	3,25
MPEG-2	1	1,25	1,75	2,5	3,5	5
H.263	0,6	0,87	1,25	2	3	3,5

Расчетные данные, представленные в табл. 1.6, проводились для формата 4CIF (720x576) и частоты кадров, равной 15 кадров/с. Данные в табл. 1.7 получены для формата HD (1280x720) и частоты кадров, равной 25-30 кадров/с

Таблица 1.7.

Значения  $I_k$  от  $h$  для разных типов кодеков, М бит/с

ПОСШ дБ Тип кодека	28	30	32	34	36	38
H.264/AVC	2	2,5	3,5	4,8	8	10
MPEG-4	2,5	3,5	4,8	7	10	13
MPEG-2	4	5	7	10	14	20
H.263	2,5	3,5	5	8	12	14

Анализ значений интенсивности потока сжатых кадров в табл. 1.6 показывает, что:

- для видеопотока формата 4CIF с частотой 15 кадров/с существующими кодеками обеспечивается передача в реальном времени без задержек в случае пропускной способности сети не ниже 2 М бит/с,  $U_{п} \geq 2$  М бит/с и уровня искажений, соответствующего ПОСШ 36 дБ;

- для качества видеопотока на уровне ПОСШ 38 дБ интенсивность будет превышать пропускную способность существующих беспроводных инфокоммуникационных технологий. В этом случае задержка будет составлять порядка 2 с.

Анализ интенсивностей сжатого потока в табл. 1.7 позволяет заключить, что требуемые значения достигаются только для ПОСШ не выше 28 дБ. В тоже время с практической позиции наиболее значимым является обеспечение ПОСШ на уровне не ниже 30 дБ. Особенно это условие важно для систем поддержки и принятия решений относительно состояния объектов контроля.

При этом наиболее перспективными являются форматы видеопотока соответствующего формату HD для ПОСШ не ниже 40 дБ. С другой стороны в настоящее время для передачи видеоконтента по беспроводным каналам связи

используются каналы передачи данных с более низкими скоростями передачи, чем  $U_{\text{п}} = 2 \text{ М бит/с}$ . Отсюда задержки передачи видеопотока будут значительными. Это приводит к повышению задержки доставки видеопотока при заданном уровне качества видеосервиса.

Значит, существует противоречие, вызванное:

1. С одной стороны ростом требований относительно качества видеoinформационных сервисов, а именно относительно:

- разрешающей способности и качества визуального восприятия потока видеокадров. Это подразумевает под собой: увеличение частоты и размеров кадров, увеличение глубины оцифровки пикселей; снижение временной задержки на доставку кадров, снижение джиттера, уменьшение средней задержки доставки пакетов, уменьшение вероятности потери пакетов;

- мобильности и подвижности предоставления видеoinформационных сервисов. Здесь подразумевается предоставление возможности получения видеoinформационной сервисов для мобильных пользователей на беспроводные терминалы (ноутбук, планшет, коммуникатор).

2. С другой стороны возникают сложности относительно предоставления видеoinформационных сервисов заданного качества с использованием беспроводных технологий. Это обусловлено следующими причинами:

1) отставанием темпов роста пропускной способности беспроводных ИКС относительно темпов роста интенсивности видеотрафика;

2) недостаточной вычислительной производительностью беспроводных ИКС по обработки данных;

3) недостаточными характеристиками технологий компрессии потоков видеокадров по таким показателям, как степень сжатия и количество операций на обработку в зависимости от качества визуального восприятия реконструируемых видеокадров. Так при необходимом качестве реконструкции кадров интенсивность сжатого потока обеспечивается существующими технологиями на 20 – 50 % выше, чем реальные пропускные способности каналов передачи данных;



4) относительно высокой вероятностью помех в битовом потоке, передаваемом по беспроводным каналам связи. Это приводит к увеличению вероятности битовых ошибок и потери пакетов в случае наличия ошибок в служебной части пакетов, что особенно усугубляется для режима передачи живого видео в реальном времени (используется протокол RTP).

На основе проведенных исследований можно заключить, что снижение интенсивности сжатого потока видеок кадров в инфокоммуникационных системах для повышения качества видеoinформационного сервиса является *актуальной научно-прикладной задачей*.

Следовательно, требуется достичь повышения степени сжатия, что задается формулой

$$k_c \rightarrow \max \quad (1.4)$$

при обеспечении условий баланса интенсивности  $I_k$  сжатого потока и скорости  $U_{\Pi}$  передачи по каналу связи, и заданному уровню  $h_{\text{тр}}$  качества реконструкции видеок кадров, что формализуется следующими соотношениями:

$$I_k = f(I(v_t); k_c; h) \leq U_{\Pi} \quad \& \quad h \geq h_{\text{тр}} \quad (1.5)$$

для повышения эффективности функционирования ИКС, т.е. обеспечения требуемой задержки  $t_{\text{тр}}$  по доставки потока видеок кадров

$$t_p \leq t_{\text{тр}}. \quad (1.6)$$

Здесь  $t_{\text{тр}}$  - требуемая задержка доставки видеопотока;  $h_{\text{тр}}$  - требуемое ПОСШ;  $U_{\Pi}$  - скорость передачи для инфокоммуникационных технологий.

#### 1.4. Обоснование необходимости совершенствования методов обработки базовых кадров в иерархии MPEG-потока

Стандартными для обработки видеопотоков являются MPEG-технологии, которые базируются на кадровой классификации с последующей их обработкой JPEG совместимыми платформами. Базовой структурой единицей MPEG-потока является групповой кадр (ГК, Group of Pictures – GOP). Групповой кадр состоит из нескольких кадров разного типа. Группа кадров включает в себя:

- *I* кадр (Intra);
- предсказываемые *P* кадры (Predicted);
- *B* кадры двунаправленного предсказания (Bidirectional).

Каждая GOP обязательно начинается с кадра *I*-типа и с определенной периодичностью содержит *P*-кадры (рис. 1.9). Принято обозначать структуру (номенклатуру) группы кадров при помощи двух параметров *M* и *N* [28; 36]. Параметр *N* обозначает общее число кадров в группе: от первого кадра (обычно - кадра типа *I*) до последнего кадра (типа *P* или *B*), предшествующего начальному кадру следующей группы. Параметр *M* обозначает максимальное количество кадров типа *B*, расположенных между предсказанными кадрами типа *P*.

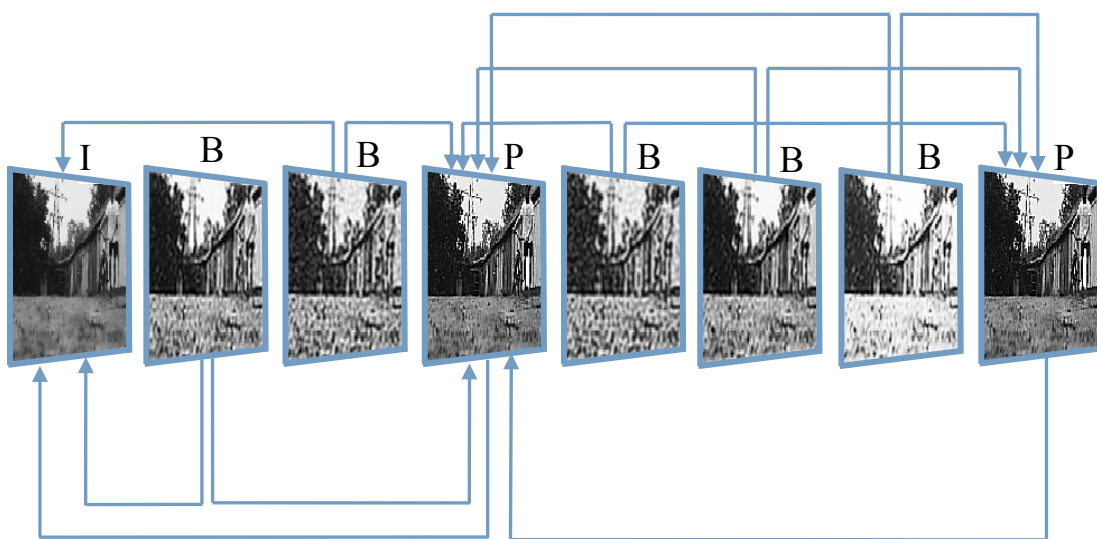


Рис. 1.9. Пример структуры группы кадров

В этом случае кадры В-типа определяются на приемной стороне в результате интерполяции по кадрам Р-типа или I-типа. При этом необходимо учитывать, что интерполяция даже в случае сравнительно низкой ошибки предсказания для кадров далеко отстоящих во времени не приведет к: необходимому снижению динамических диапазонов; выявлению динамических объектов. Поэтому разработчики систем стремятся ограничить максимальное расстояние временной интерполяции с тем, чтобы оно не превышало 3-4 кадровых интервалов. Это позволит сократить эффект размножения и усиления ошибок между кадрами. Обычно группа кадров состоит из 8 или 12 кадров разного типа.

В этом случае интенсивность  $I(\text{GOP})_k$  компрессированного видеопотока, приходящаяся на группу кадров, будет оцениваться по следующей формуле:

$$I(\text{GOP})_k = I_I + 2I_P + 5I_B, \quad (1.7)$$

где  $I_I, I_P, I_B$  - значения интенсивностей для компактно-представленных кадров соответственно I-типа, Р-типа и В типа.

В данной формуле принимается условие, что степень сжатия для кадров конкретного типа будет отличаться не менее, чем на 5%.

Также важно учитывать, что, если  $v_t$  кадров должны передаваться за 1 с, то группа из 8 кадров должна передаваться за время  $t_{\text{GOP}}$  равное

$$t_{\text{GOP}} = 8/v_t \text{ (сек).}$$

Отсюда получаем, что интенсивность компактно-представленной группы из 8 кадров определяется как объем  $I(\text{GOP})_k$  в битах, передаваемый за время  $t_{\text{GOP}}$ .

Каждый тип кадров обрабатывается с использованием методов на JPEG совместимой платформе. При этом учитывается иерархия относительно зависимости порядка реконструкции кадров в группе. В результате устанавливается

неравнозначное влияние кадров различных типов на качество реконструкции всех кадров в GOP. Для JPEG технологий такая неравнозначность учитывается путем выбора соответствующей стратегии квантизации. Здесь стратегия квантизации определяется шагом  $R$  квантизации. Под квантизацией понимается коррекция компонент трансформированного представления фрагментов изображений с учетом психовизуальных особенностей. Такой процесс заключается в скалярном квантовании компонент трансформант, что задается следующим соотношением:

$$y_{\xi,\chi} = [(y''_{\xi,\chi} + \frac{1}{2}) / \theta_{\xi,\chi}],$$

где  $y_{\xi,\chi}$  - квантованное значение  $(\xi;\chi)$ -й компоненты трансформанты  $y''_{\xi,\chi}$ , после округления в большую сторону;

$\theta_{\xi,\chi}$  - коэффициент коррекции матрицы квантизации.

Коэффициенты коррекции МК зависят от позиций в матрице и от заданного уровня допустимых искажений. Значение коэффициента МК определяется как

$$\theta_{\xi,\chi} = 1 + ((1 + (\xi - 1) + (\chi - 1)) \times R),$$

где  $R$  - шаг квантизации.

Для более значимых кадров шаг квантизации выбирается меньшим, чем для менее значимых. Это позволяет создать возможность для реконструкции кадров с лучшим качеством визуализации. И как следствие снизить эффект размножения и усиления ошибок при получении последующих кадров. Иерархия значимости типов кадров выглядит следующим образом:

$$I \rightarrow P \rightarrow B.$$

Поэтому для значений шагов квантизации типов кадров выполняется неравенство:

$$R_I < R_P < R_B.$$

Здесь  $R_I$ ,  $R_P$ ,  $R_B$  - шаги квантизации соответственно для кадров I, P и B типов.

Выбор шага квантизации регламентируется требуемым уровнем пикового отношения сигнал/шум, которое необходимо обеспечить для соответствующего типа кадров. Зависимость усредненных значений ПОСШ от типа кадров приведена в табл. 1.8.

Таблица. 1.8

Требования относительно визуального качества кадров по метрике ПОСШ

Тип кадра	I-кадр	P-кадр	B-кадр
Величина ПОСШ, дБ	35 – 45	25 – 30	18 – 20

Как видно из данной таблицы разница между требуемыми значениями ПОСШ для разных типов кадров находится в среднем на уровне 10 дБ. Такая разница приводит к тому, что в процессе обработки для кадров в зависимости от их типа будет достигаться различное значение степени сжатия. Зависимость степени сжатия для различных типов кадров от пикового отношения сигнал шум представлены в виде диаграмм на рис. 1.10. Из анализа диаграмм на рис. 1.10 вытекает, что степень сжатия кадров I-типа в среднем в 2,5 раза меньше по сравнению со степенью сжатия кадров P-типа и в 10 раз относительно степени сжатия кадров B-типа.

Соответствующая усредненная оценка интенсивностей для различных типов кадров в зависимости от ПОСШ показана в виде диаграмм на рис. 1.11. В качестве структуры кадра выбирался формат 4CIF (720x576). Диаграммы строились на основе экспериментальных данных приведенных в табл. 1.9.

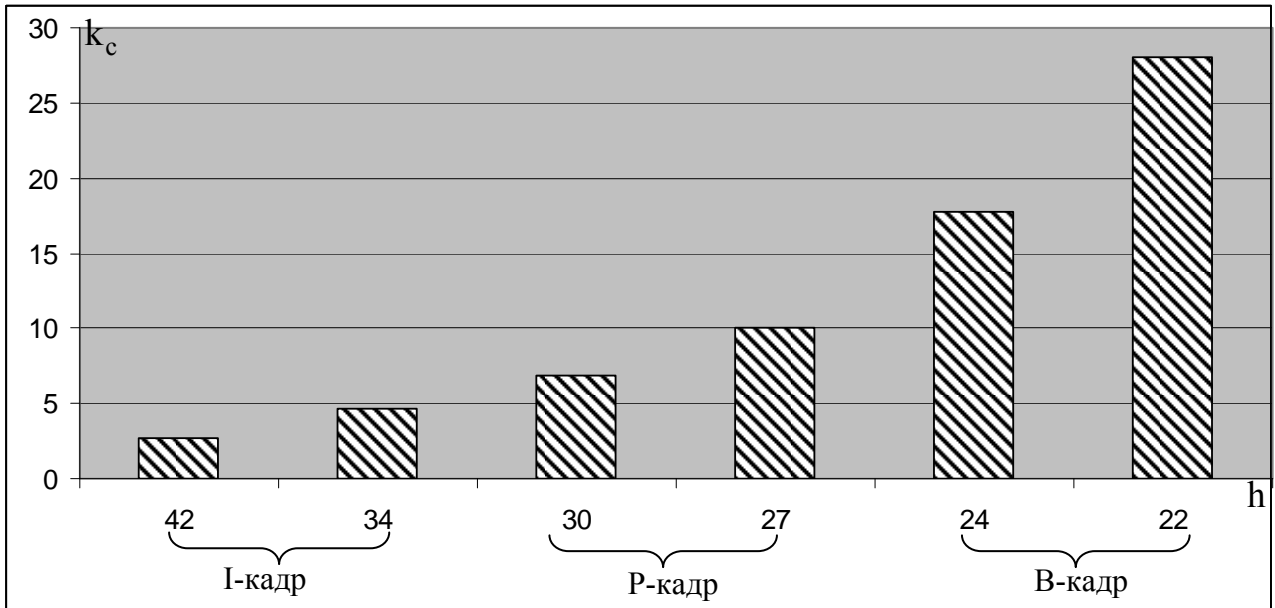


Рис. 1.10. Значения  $k_c$  для различных типов кадров со средней насыщенностью деталями в зависимости от  $h$  в случае обработки по JPEG-технологии

Таблица 1.9.

Значения  $I_k^{(1)}$  от  $h$  для разных типов кадров (в пересчете на один кадр), М бит

Типа кадра	B-кадр		P-кадр			I-кадр		
h дБ	22	24	28	30	32	38	40	42
$I_k$	0,056	0,09	0,16	0,2	0,28	0,8	1,4	1,8

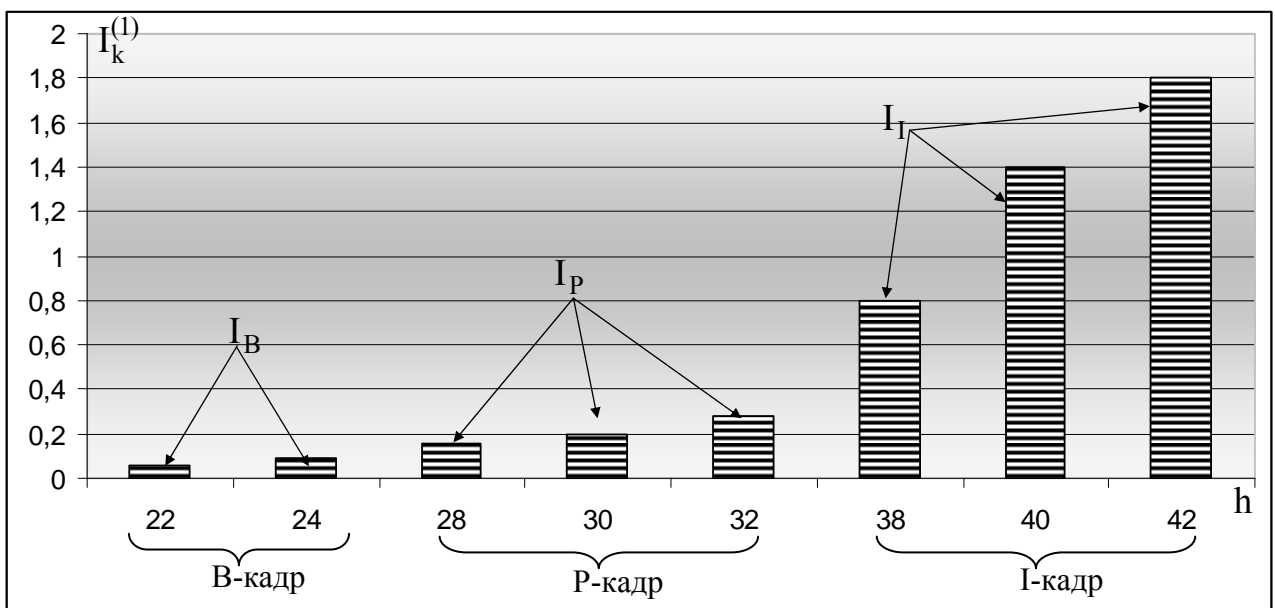


Рис. 1.11. Значения  $I_k^{(1)}$  для разных типов кадров в зависимости от  $h$

Анализ диаграмм на рис. 1.11 показывает, что:

- усредненная интенсивность для базового кадра превышает интенсивность битового представления Р-кадров в 11 раз, а интенсивность битового представления В-кадров в 30 раз;

- интенсивность кодового представления только одного базового кадра формата 4CIF (720x576) достигает 2 Мбит/с. Если использовать для базового кадра формат HD (1280x720), то интенсивность кодового представления возрастет дополнительно в несколько раз. Это повышает нагрузку на сети с пропускной способностью ниже 10 Мбит/с.

На основе данных в табл. 1.9 и диаграмм на рис. 1.11 проведем оценку значений интенсивности  $I(\text{GOP})_k$  и  $I_k^{(24)}$  видеопотока, приходящего соответственно на группу кадров и на поток из 24 кадров в секунду. Расчеты проводятся по формуле (1.7) и представлены в табл. 1.10. В последней строке табл. 1.10 приведены значения в процентах  $\Delta I_I$  удельного веса интенсивности  $I_I$  кодового представления базового кадра относительно суммарной интенсивности  $I(\text{GOP})_k$  группы кадров.

Таблица 1.10.

Зависимость интенсивностей  $I(\text{GOP})_k$  и  $I_k^{(24)}$  от ПОСШ, М бит/с

Тип кадра	h дБ					
	42	40	40	40	38	38
I-кадр	42	40	40	40	38	38
P-кадр	28	28	30	32	28	30
B-кадр	22	22	24	24	22	24
$I(\text{GOP})_k$	2,4	2	2,25	2,4	1,4	1,65
$I_k^{(24)}$	7,2	6	6,75	7,2	5,2	4,95
$\Delta I_I, \%$	75	70	62	58	57	48

Анализ данных в табл. 1.10 позволяет заключить следующее.

Во-первых, интенсивность  $I_k^{(24)}$  видеопотока, который требуется доставлять за одну секунду превышает реальную пропускную способность беспроводных технологий, для которых  $U_{\Pi} = 2 - 4$  Мбит/с. В случае использования кадра формата HD (1280x720) дисбаланс между интенсивностью  $I_k$  и скоростью передачи по сети  $U_{\Pi}$  будет расти. В итоге для передачи информации в реальном времени необходимо будет использовать канал связи с пропускной способностью не ниже, чем  $U_{\Pi} > 16$  Мбит/с.

Во-вторых, как показывает анализ данных в последней строке табл. 1.10 вклад интенсивности кодового представления базового кадра в суммарную интенсивность  $I_k$  видеопотока в зависимости от качества визуальной реконструкции кадров изменяется от 50 до 75 %. При этом вклад базового кадра в общую интенсивность компрессионного представления возрастает с увеличением качества реконструкции видеопотока. Это указывает на значимое влияние интенсивности базового кадра на суммарную интенсивность видеопотока.

Отсюда в качестве направления совершенствования технологий компрессии видеопотока для снижения его интенсивности *предлагается* модернизировать методы обработки базовых кадров.

В связи с чем, *цель исследований* состоит в разработке метода снижения интенсивности видеопотока в инфокоммуникационных системах для повышения качества видеосервиса на основе трансформирования и кодирования базовых кадров.

Математически постановка цели задается следующим образом.

Требуется создать метод снижения интенсивности  $I(v_t)$  видеопотока, описываемый функционалом  $I'_I = F_I\{h; q_I\}$ , так, чтобы обеспечивалось требование

$$I'_k = f(I(v_t); k_c; F_I\{h; q'_I\}) < I_k$$



при условии обеспечения требуемых значений уровня  $h_{\text{тр}}$  качества реконструкции видеокадров и задержки  $t_{\text{тр}}$  по доставки потока видеокадров, т.е.

$$h \geq h_{\text{тр}} \quad \& \quad t_p = \varphi(t_t; q'_I; q_P; q_B) \leq t_{\text{тр}}$$

Здесь  $I_k, I'_k$  - интенсивность компрессированного видеопотока соответственно до и после использования совершенствованного метода  $I'_I = F_I\{h; q'_I\}$  обработки базовых кадров;  $q_I, q'_I$  - количество операций, затрачиваемое соответственно для существующего и модернизированного методов обработки базовых кадров;  $I'_I$  - интенсивность кодового представления базового кадра для совершенствованной технологии их компрессии.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Обосновать направления совершенствования технологии обработки базовых кадров в составе платформы компрессии видеопотока.
2. Разработать информационную модель кодового представления базовых кадров относительно сокращения их избыточности.
3. Создать метод снижения интенсивности кодового представления базовых кадров в условиях сохранения заданного качества их визуального восприятия.
4. Построить верификацию метода обработки базовых кадров в технологию снижения интенсивности видеопотока для обеспечения требуемого качества видеосервиса с использованием инфокоммуникационных систем.
5. Разработать метод реконструкции базовых кадров в иерархии представления потока кадров.
6. Построить программную реализацию созданного метода обработки базовых кадров и провести сравнительную оценку эффективности их обработки с известными методами.

## Выводы

1. Инфокоммуникационные системы за последнее десятилетие претерпевают значительное развитие. При этом повышенное значение приобретают беспроводные технологии относительно их использования для доставки видеoinформационного трафика. Доля видеoinформационного трафика в настоящий момент составляет более 80% по отношению к другим видам трафика. Это неизбежно приводит к росту интенсивности видеотрафика, и как следствие повышению нагрузки на инфокоммуникационную систему.

2. Проведенный анализ возможных средств доставки видеотрафика и требований, предъявляемых видеoinформационными сервисами позволяет заключить о наличии дисбаланса между интенсивностью видеопотока и пропускной способностью сети. Это обусловлено следующими причинами:

- наличием тенденции опережения роста интенсивности видеотрафика относительно роста пропускных возможностей сетей;
- ростом спроса на предоставление видеoinформационных услуг;
- сети доступа являются самым узким звеном при обеспечении эффективности функционирования телекоммуникационных систем.

3. Увеличение интенсивности видеoinформационного трафика существенно снижает эффективность функционирования ИКС и качество предоставляемых сервисов по QoS. Показано, что задержка на передачу потока несжатых видеок кадров в зависимости от его интенсивности достигает десятков минут. Наиболее высокие задержки по доставке видеопотока соответствуют варианту выбора размера кадра видеопотока в соответствии с форматом Full HD. Отсюда можно утверждать, что существует практический аспект противоречия, состоящий в том, что пропускные способности инфокоммуникационных систем не соответствуют требованиям относительно интенсивности потоков несжатых кадров. Значит, интенсивность видеопотока значимым образом влияет на снижение эффективности функционирования инфокоммуникационной системы. Для преодоления сложившегося дисбаланса между реальной пропускной спо-

собностью сети и интенсивностью видеопотока, требуется обеспечить снижение последней на основе технологий компрессии потока видеокадров.

4. Анализ интенсивностей сжатого потока позволяет заключить, что требуемые значения достигаются только для ПОСШ не выше 28 дБ. В тоже время с практической позиции наиболее значимым является обеспечение ПОСШ на уровне не ниже 30 дБ. Значит, существует противоречие, вызванное: с одной стороны ростом требований относительно качества видеoinформационных сервисов, а с другой стороны возникают сложности относительно предоставления видеoinформационных сервисов заданного качества с использованием беспроводных технологий. Это обусловлено недостаточными характеристиками технологий компрессии потоков видеокадров по таким показателям, как степень сжатия и количество операций на обработку в зависимости от качества визуального восприятия реконструируемых видеокадров.

На основе проведенных исследований можно заключить, что снижение интенсивности сжатого потока видеокадров в инфокоммуникационных системах для повышения качества видеoinформационного сервиса является *актуальной научно-прикладной задачей*.

5. Анализ обработки видеопотоков на основе MPEG-технологии, базируемой на кадровой классификации с последующей их обработкой JPEG совместимыми платформами, показал следующее:

- степень сжатия кадров I-типа в среднем в 2,5 раза меньше по сравнению со степенью сжатия кадров P-типа и в 10 раз относительно степени сжатия кадров B-типа.

- усредненная интенсивность для базового кадра превышает интенсивность битового представления P-кадров в 11 раз, а интенсивность битового представления B-кадров в 30 раз;

- интенсивность кодового представления только одного базового кадра формата 4CIF (720x576) достигает 2 Мбит/с. Если использовать для базового кадра формат HD (1280x720), то интенсивность кодового представления воз-

растет дополнительно в несколько раз. Это повышает нагрузку на сети с пропускной способностью ниже 10 Мбит/с.

6. Проведенная оценка значений интенсивности видеопотока, приходящего соответственно на группу кадров и на поток из 24 кадров в секунду выявила следующее. Во-первых, интенсивность видеопотока, который требуется доставлять за одну секунду превышает реальную пропускную способность беспроводных технологий, для которых  $U_{\Pi} = 2 - 4$  Мбит/с. В случае использования кадра формата HD (1280x720) дисбаланс между интенсивностью  $I_k$  и скорость передачи по сети  $U_{\Pi}$  будет расти. В итоге для передачи информации в реальном времени необходимо будет использовать канал связи с пропускной способностью не ниже, чем  $U_{\Pi} > 16$  Мбит/с. Во-вторых, вклад интенсивности кодового представления базового кадра в суммарную интенсивность  $I_k$  видеопотока в зависимости от качества визуальной реконструкции кадров изменяется от 50 до 75 %. При этом вклад базового кадра в общую интенсивность компрессионного представления возрастает с увеличением качества реконструкции видеопотока. Это указывает на значимое влияние интенсивности базового кадра на суммарную интенсивность видеопотока.

Отсюда в качестве направления совершенствования технологий компрессии видеопотока для снижения его интенсивности *предлагается* модернизировать методы обработки базовых кадров.

Основные результаты исследований данного раздела опубликованы в таких научных трудах: [12; 15; 18; 69; 70; 97; 114].

## РАЗДЕЛ 2

### **ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ БАЗОВЫХ КАДРОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ КОДОВОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ**

Выявляются достоинства стандартизированной технологии кодирования базовых кадров в режиме внесения искажений.

Обосновываются уязвимости стандартизированной технологии обработки базовых кадров MPEG-технологии, а именно: относительно степени сжатия; интенсивность кодového представления сжатого видеопотока; существенное влияние потери пакетов на визуальное качество реконструируемых базового кадра и видеопотока

Проводится обоснование технологической концепции обработки базовых кадров для снижения интенсивности кодového представления на MPEG-платформе, которая базируется на совершенствовании механизмов, содержащих этапы, обеспечивающие непосредственное формирование кодовых конструкций сжатого представления с учетом выявленных закономерностей статистической и психовизуальной природы. Для формирования новых механизмов процесса обработки базовых кадров требуется учитывать их ключевое влияние на эффективность функционирования технологии компрессии всего потока видеокадров.

Излагается разработка методологических рекомендаций по совершенствованию технологии снижения интенсивности кодového представления базовых кадров.

## **2.1. Обоснование технологической концепции обработки базовых кадров для снижения интенсивности кодового представления**

Технологии снижения интенсивности видеопотока, базирующиеся на MPEG-платформе, поддерживают комплекс рекомендаций относительно использования методов компрессии базовых кадров. Стандартизированные методы обработки базовых кадров являются JPEG-совместимыми. Это обусловлено следующими причинами: поддержка таких технологий всеми интернет-браузерами, а также тем, что они используются для представления более 80% видеоданных в мультимедийных базах данных.

Данные технологии строятся на основе двух концептуальных механизмов, а именно [6; 8; 12 – 14; 17; 28; 31 – 33; 47; 51; 53; 62; 74; 77 – 79; 88; 98 -127]:

1) механизмов, содержащих этапы предварительной обработки, направленной на формирование такого промежуточного преобразования изображений, для которого существует возможность выявления психовизуальных закономерностей относительно восприятия изображений зрительной системой;

2) механизмов, содержащих этапы, обеспечивающие непосредственное формирование кодовых конструкций сжатого представления с учетом выявленных закономерностей статистической и психовизуальной природы.

Основные этапы процесса сжатия базовых кадров по стандартизированной технологии представлены в виде блок-схемы на рис. 2.1 [8; 14; 28; 55; 62].

Рассмотрим механизмы первой концептуальной составляющей.

Работа метода начинается с преобразования цветовой модели RGB, в цветовую модель YCbCr. Здесь Y – luminance, Cb – Chrominance-blue, Cr – Chrominance-red, что в переводе «Яркость – Цветность синего – Цветность красного». Такое преобразование обусловлено тем, что:

- для изображения в соответствии с моделью RGB присуща большая избыточность;

- каждая цветовая составляющая вносит равнозначный информационный вклад, и характеризуется яркостью (интенсивностью), которая может принимать 256 дискретных значений от 0 до 255.

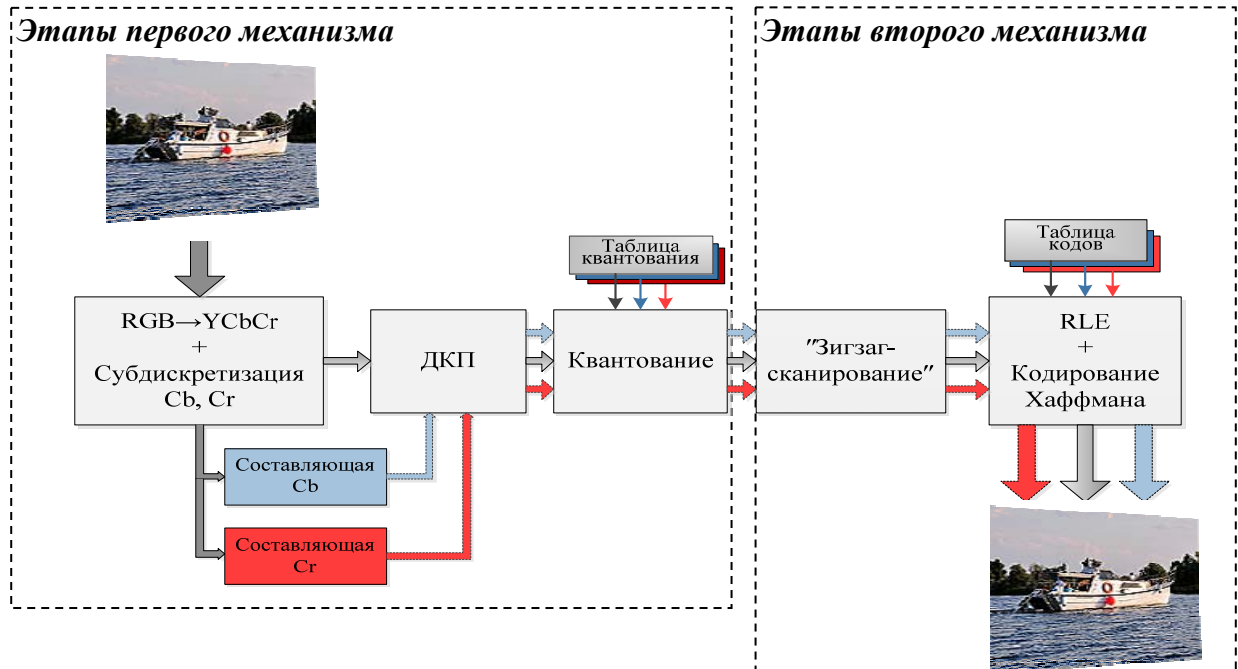


Рис. 2.1. Блок-схема стандартизированного процесса сжатия базовых кадров

В свою очередь переход к цветовой модели YCbCr позволяет выделить более важную информацию. Цветовое преобразование из RGB в YCbCr и обратно выполняется по следующим формулам:

1. Прямое преобразование из RGB в YCbCr:

$$\begin{aligned}
 Y &= (77/256)R + (150/256)G + (29/256)B, \\
 Cb &= -(44/256)R + (87/256)G + (131/256)B + 128, \\
 Cr &= (131/256)R - (110/256)G - (21/256)B + 128.
 \end{aligned}$$

2. Обратное преобразование из YCbCr в RGB:

$$\begin{aligned}
 R &= Y + 1,371(Cr - 128), \\
 G &= Y - 0,698(Cr - 128) - 0,336(Cb - 128), \\
 B &= Y + 1,732(Cb - 128).
 \end{aligned}$$

Схематично процессы прямого и обратного цветового преобразования показаны на рис. 2.2.

Для цветоразностной модели YCbCr учитывается тот факт, человеческий глаз наиболее чувствителен к изменению яркостной составляющей изображения, нежели к цветовым. Это позволяет для составляющих цветности выявить большее количество психовизуальной избыточности по сравнению с яркостной составляющей. видеокadres. Искажения цветовых составляющих будут менее заметны при визуализации изображения, чем искажения яркостной составляющей. В результате создается потенциал для повышения степени сжатия и уменьшения интенсивности потока.

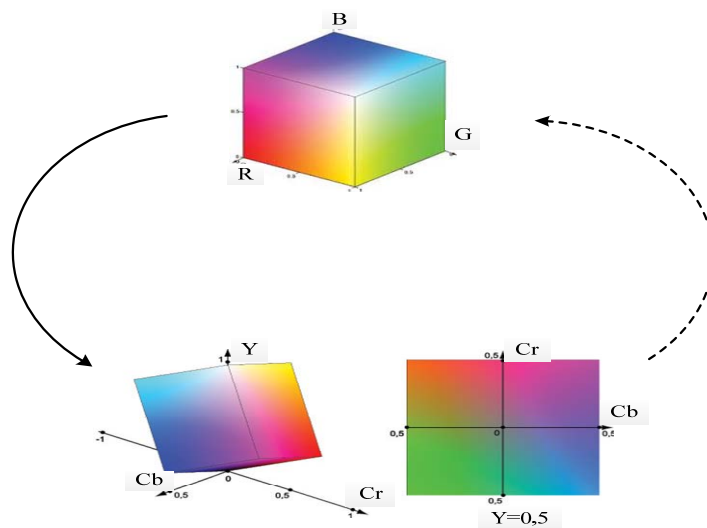


Рис. 2.2. Схема преобразования цветового пространства

Дифференцированная обработка составляющих модели YCbCr приводится на рис. 2.3. Здесь происходит формирование блоков размером  $8 \times 8$  пикселей для каждой цветной составляющей блока I-кадра.

После чего механизм дифференцированной обработки заключается в субдискретизации цветовых составляющих Cb и Cr. Субдискретизация состоит в прореживании путем исключения каждой второй строки и столбца блока цветовой составляющей [6, 28, 32, 36, 34, 41, 44, 51, 55]. Этот этап обработки для базового кадра маркируется в спецификациях как не обязательный. В тоже



время, наличие такого этапа обеспечивает существенное сокращение объема базового кадра.

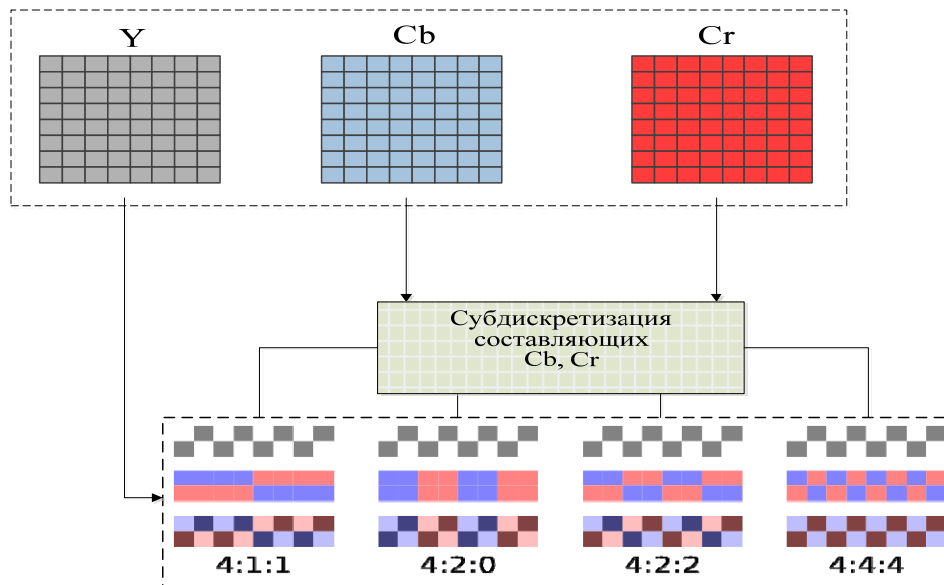


Рис. 2.3. Субдискретизация составляющих Cb, Cr

На очередном этапе процесса обработки базового кадра осуществляется процесс дискретного косинусного преобразования (ДКП). Данный этап осуществляется для каждого блока, размером  $8 \times 8$  пикселей. Прямое и обратное двумерное ДКП вычисляется по таким соотношениям [5, 8, 12; 28, 55, 74, 78, 82, 83; 84; 97; 117; 126]:

1) прямое ДКП:

$$Y_{i,j}'' = \frac{1}{\sqrt{2n}} c_i c_j \sum_{x=0}^{n-1} \sum_{y=0}^{n-1} A_{x,y} \cos\left(\frac{(2y+1)j\pi}{2n}\right) \cos\left(\frac{(2x+1)i\pi}{2n}\right),$$

при  $0 \leq i, j \leq n-1$ ,

где  $A_{x,y}$  – блок размером  $(8 \times 8)$  элементов изображения;

2) обратное ДКП:

$$A_{x,y} = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^7 \sum_{j=0}^7 c_i c_j Y_{i,j}''' \cos\left(\frac{(2y+1)j\pi}{16}\right) \cos\left(\frac{(2x+1)i\pi}{16}\right),$$

$$\text{где } c_f = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & f = 0; \\ 1, & f > 1. \end{cases}$$

В результате такой трансформации достигается переход от пространственного представления изображения к его спектральному представлению. Такое трансформирование позволяет перераспределить энергию исходного блока базового кадра. При этом формируется трансформанта, для которой основная информация об изображении концентрируется в левом верхнем углу. Здесь наиболее весомая компонента, соответствующая самой низкой частоте, маркируется по спецификациям как DC-компонента. Все остальные компоненты – это высокочастотные компоненты. Они маркируются как AC-компоненты. В них содержится незначительная информация об изображении. Таким образом, ДКП создает условия для выявления и устранения психовизуальной избыточности путем специальной обработки компонент трансформант.

Такая обработка организуется на следующем этапе компрессии базового кадра. Данный этап связан с квантизацией компонент трансформант. Согласно спецификаций технологий MPEG для каждой составляющей Y, Cb, Cr задается своя матрица квантизации. Квантизация заключается в поэлементном делении компонент трансформанты  $y_{i,j}''$  на соответствующие коэффициенты  $\theta_{i,j}$  матрицы квантизации. Квантизация определяется по формуле:

$$y_{i,j} = [(y_{i,j}'' + \frac{1}{2}) / \theta_{i,j}] \quad (2.1)$$

где  $y_{i,j}$  - квантованное значение (i; j)-й компоненты трансформанты  $y_{i,j}''$ , после округления в большую сторону.

Результат округляется в большую сторону, а именно до значения  $u_{i,j}$ . Здесь осуществляется исключение психовизуальной избыточности, и вносятся наибольшие искажения.

Для квантизации можно использовать два подхода. Первый подход тогда, когда используется таблица квантизации, принятая по умолчанию. Второй подход тогда, когда таблица коэффициентов квантования вычисляется по формуле  $\theta_{i,j} = 1 + ((1 + (i-1) + (j-1)) \times R)$ . Здесь  $R$  – шаг квантизации.

Рассмотрим второй блок этапов концептуальной составляющей процесса обработки базового кадра. Данные этапы образуют стратегию непосредственного кодирования квантизированной трансформанты базовых кадров.

Для снижения искажений в базовом кадре для формирования стратегий обработки используются методы без потерь информации. Это позволяет создать условия для полного или контролируемого сохранения качества базовых кадров после их реконструкции. Соответственно полное сохранение достоверности базовых кадров достигается для спецификации исключаяющей использование этапа квантизации. Классификация методов данного класса приводится на рис. 2.4.

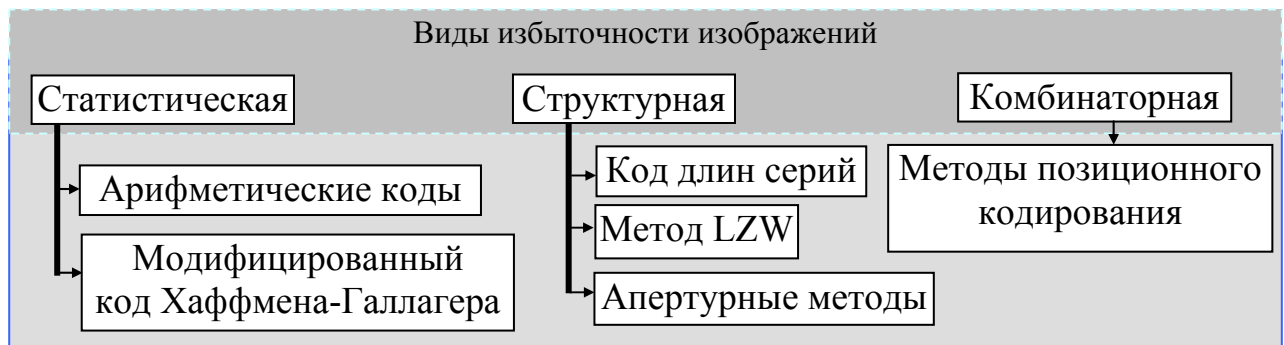


Рис. 2.4. Классификация базовых методов для технологий снижения интенсивности кодового представления базовых кадров без потерь информации

Методы без потери качества, выполняют обработку данных без учёта психовизуальной избыточности. К данным методам обработки видеоданных относятся: кодирование Хаффмана, арифметическое кодирование, кодирование длин серий RLE, метод словарного кодирования LZW. Степень сжатия, дости-

гаемая этими методами не более 1,5 – 2 раза. Данные методы лежат в основе таких форматов как: PNG, BMP, GIF, TIFF, JPEG-lossless [5 – 8; 14; 28; 47; 57 – 60; 77; 78].

Поэтому для дополнительного повышения степени сжатия и снижения интенсивности видеопотока стратегии и алгоритмы кодирования квантизированной трансформанты I-кадра строятся с учетом таких свойств как:

1) концентрация основной энергии исходного сигнала в ограниченном количестве низкочастотных компонент трансформанты;

2) выделение области высокочастотных компонент, несущих информацию о мелких деталях изображений, и потому оказывающих менее значимое влияние на визуальное восприятие изображений, чем низкочастотные компоненты;

3) появление компонент трансформанты с нулевыми значениями, особая концентрация которых велика для зигзагообразного обхода в диагональном направлении в области высокочастотных компонент.

Схема базового кодека базовых кадров технологии MPEG приведена на рис. 2.5.

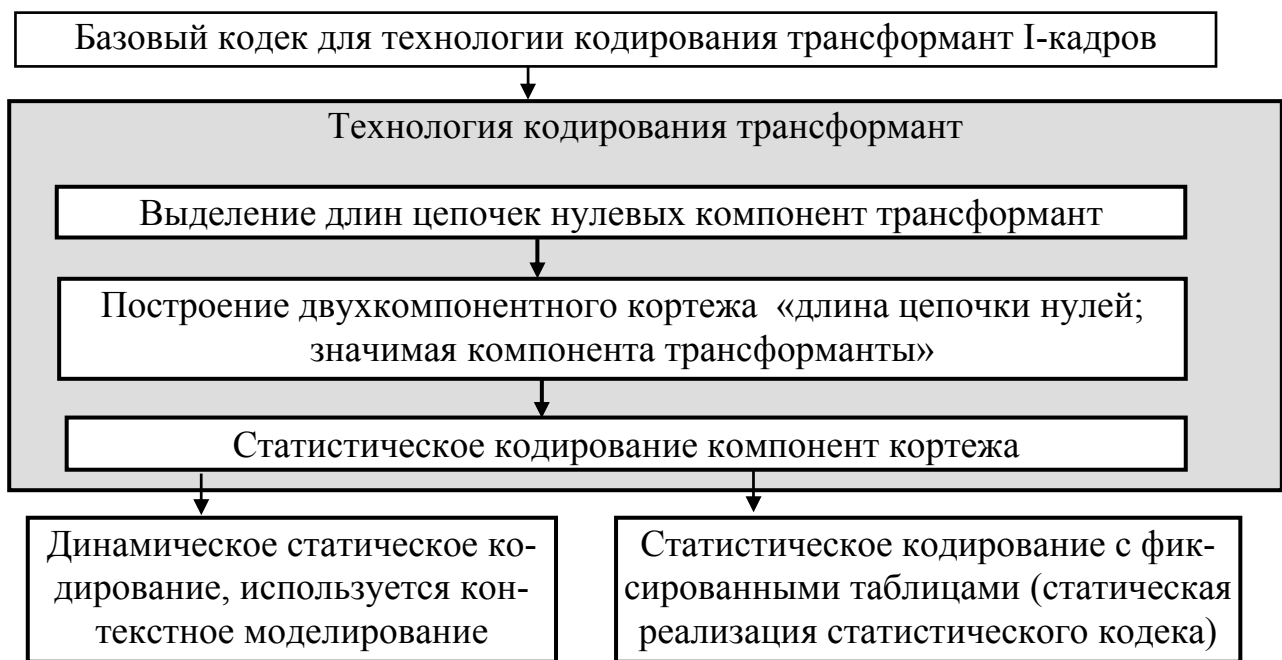


Рис. 2.5. Базовый кодек для кодирования трансформант I-кадров

Данный кодек содержит в себе следующие этапы.

Первый этап состоит в переформатировании квантизированной трансформанты в одномерный массив компонент, с помощью "зигзаг-сканирования" как показано на рис. 2.6.

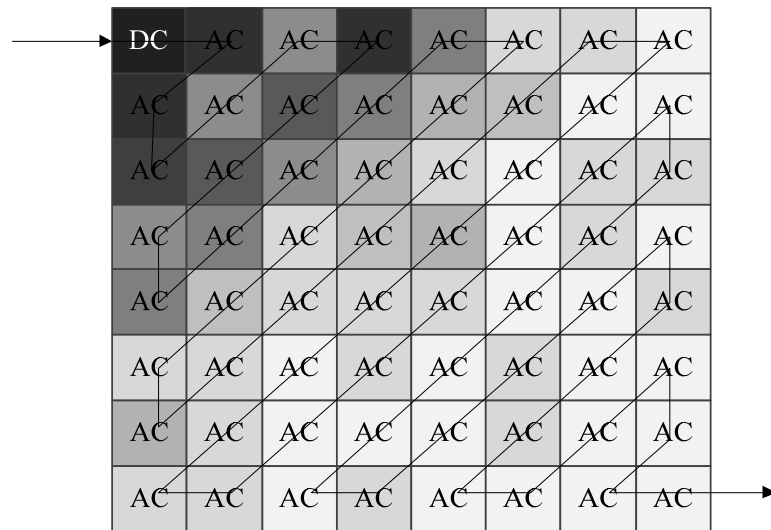


Рис. 2.6. Вариант обхода трансформанты по зигзагу

В результате такого перетрансформирования трансформанты образуется линейный вектор, характеризующийся тем, что:

- 1) вначале вектора находится низкочастотная компонента DC, все последующие высокочастотные компоненты AC;
- 2) выявляются наиболее длинные серии нулевых компонент AC;
- 3) создается возможность для замены последней нулевой серии компонент AC, специальным кодом, обозначающим конец блока (КБ).

Второй этап кодека связан с формированием двухкомпонентных кортежей. Здесь под двухкомпонентным кортежем понимается следующая комбинация «длина цепочки нулей; значимая компонента трансформанты». Для формирования таких комбинаций используется алгоритм выявления длин серий RLE.

На третьем осуществляется статистическое кодирование. Здесь используется технология кодов Хаффмана с динамическими или статическими моделями выявления статистических характеристик.

Основная идея технологии кодирования Хаффмана, заключается в кодировании отдельных символов битовыми строками различной длины, причем наиболее часто встречающиеся символы, кодируются строками наименьшей длины. Это значит, что элементу, который встречается чаще всего, присваивается наименьшая длина кода, а элементу с наименьшей частотой повторений присваивается более длинный код. Затем на основании статистических данных строится таблица кодов.

На практике используются разновидности реализации алгоритма Хаффмана. В одних случаях используются фиксированные кодовые таблицы, в других, кодовая таблица строится на основании статистического анализа имеющихся данных рис. 2.7 (а, б). Фиксированные кодовые таблицы позволяют сократить время обработки. Коды Хаффмана являются префиксными кодами, что позволяет из непрерывного потока бит однозначно их декодировать [28; 55].

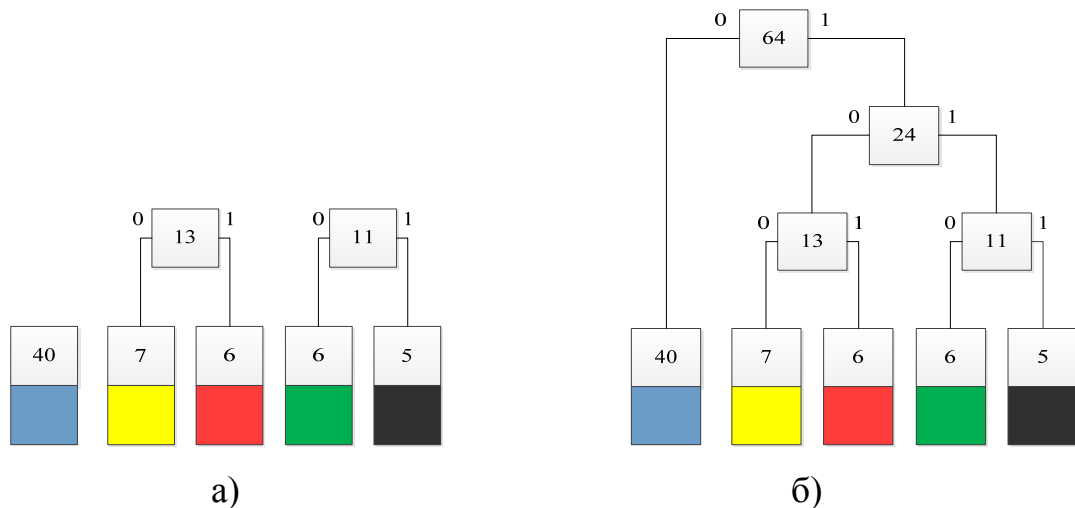


Рис. 2.7 Кодирование Хаффмана: а) начало кодирования; б) конец кодирования

Как вариант вместо кодирования Хаффмана может применяться арифметическое кодирование.

Стандартизированная технология кодирования базовых кадров имеет следующие достоинства:

1. Сокращается задержка на выявление закономерностей и кодирование данных.
2. Повышается степень интегрированности относительно битовой структуры, а следовательно, увеличивается количества потенциально устраняемой избыточности.
3. Существует возможность выбора соотношения между степенью сжатия и качеством изображения.
4. Достигается высокая степень сжатия для слабонасыщенных изображений в режиме внесения существенных искажений.
5. Обеспечивается простота и высокая скорость работы при кодировании данных в условиях высокого уровня квантизации.

В тоже время существующим технологиям обработки базовых кадров свойственны недостатки. Влияние таких недостатков на эффективность компрессии базовых кадров представляет отдельный интерес.

## **2.2. Оценка уязвимости стандартизированной технологии обработки базовых кадров MPEG-технологии**

Ключевая особенность стандартизированных технологий обработки базовых кадров состоит в том, что используются механизмы компрессии с внесением искажений. С одной стороны может быть достигнута высокая степень сжатия, а с другой стороны происходит необратимая потеря информации об изображении. При этом уровень потерь информации будет значительной степени ощутимей для сильнонасыщенных изображений. Степень насыщенности изображений оценивается на основе коэффициента взаимной корреляции  $r$ . В этом случае предлагается использовать следующую классификацию: для сильнона-

сыщенных изображений -  $0,4 \leq r \leq 0,7$ , для средненасыщенных -  $0,8 \leq r \leq 0,9$  и для слабонасыщенных -  $r \geq 0,95$ .

Экспериментальные оценки зависимости степени сжатия  $k_c$  от пикового отношения сигнал/шум (ПОСШ)  $h$  для стандартизированных методов обработки базовых кадров представлены на рис. 2.8.

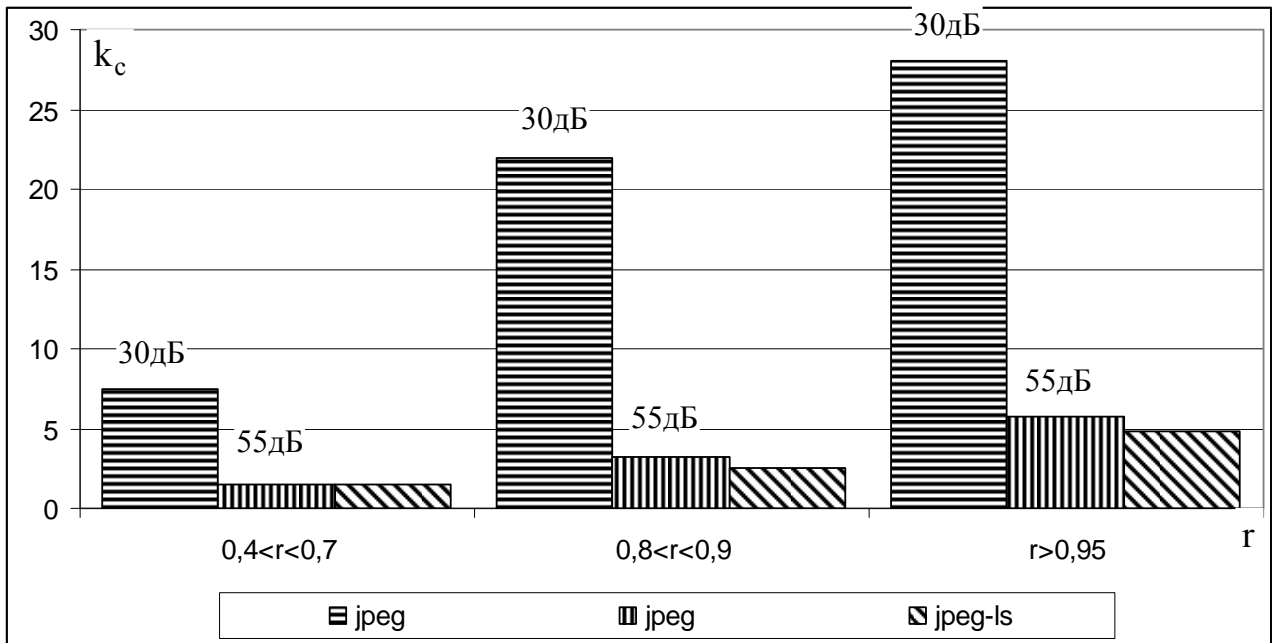


Рис. 2.8. Диаграммы зависимости  $k_c$  от степени насыщенности изображений для стандартизированных методов обработки I-кадров при  $h = 30$  дБ и  $h = 55$  дБ

Исследование диаграмм на рис. 2.8 позволяет заключить, что степень сжатия достигает своих наибольших значений для более низких значений ПОСШ. В тоже время, с позиции психофизиологических свойств зрительного аппарата не допускается наличие потерь качества изображений ниже уровня соответствующего ПОСШ равному 22 дБ. Визуальная оценка характерных искажений для реконструируемых изображений, полученных с использованием стандартизированных методов обработки базовых кадров, представлена на рис. 2.9 и 2.10. Визуальный анализ изображений на рис. 2.9, 2.10 приводит к таким выводам, как то, что [8; 12; 14; 55]:

1) для высоких степеней компрессии наблюдается распадение изображения на блоки размером  $8 \times 8$  пикселей. Это становится более заметным при визу-



альном просмотре с ростом степени насыщенности изображений (рис. 2.9 (а, б)).

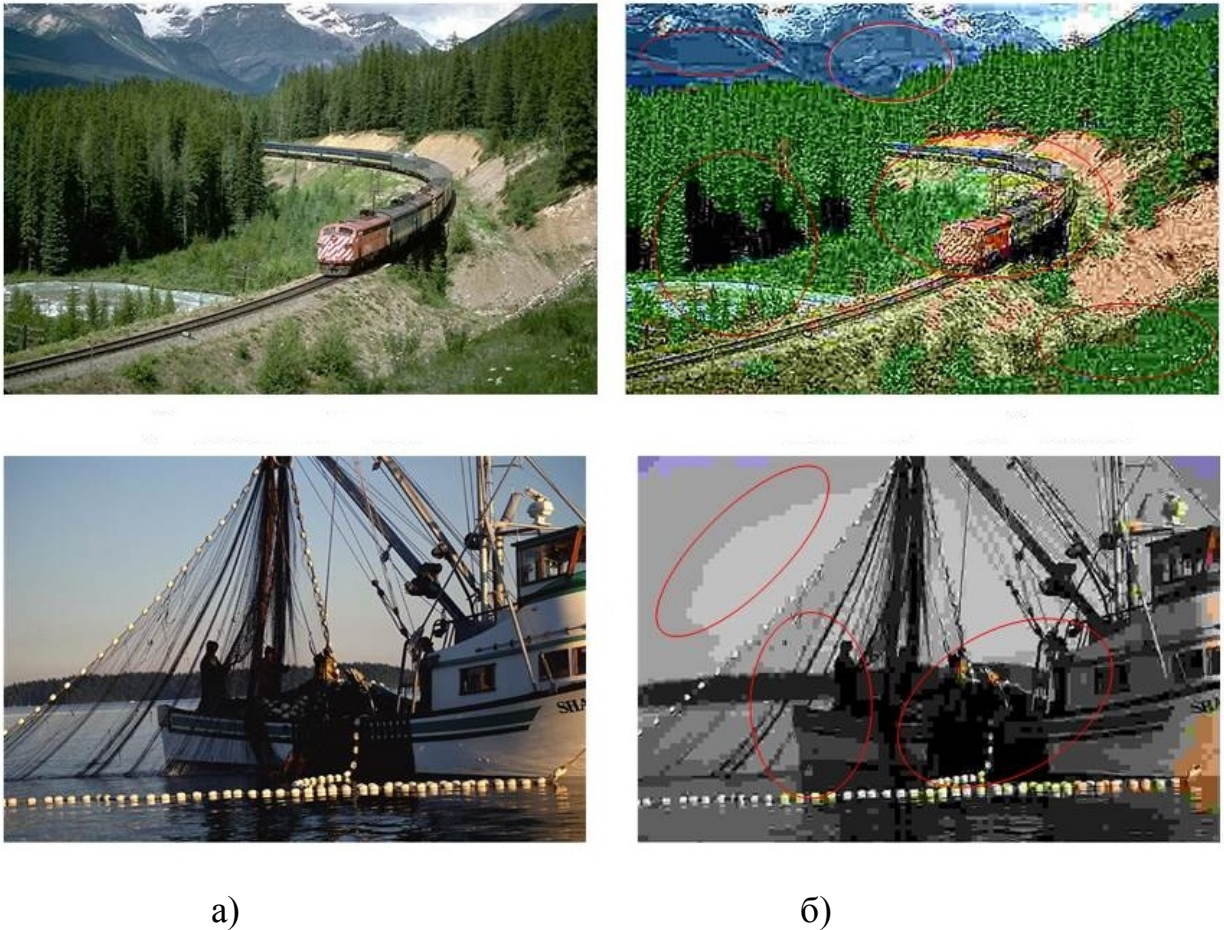


Рис. 2.9. Разрушение базового кадра в случае компрессии стандартными методами: а) исходный базовый кадр; б) реконструированный базовый кадр



Эффект Гиббса

Рис. 2.10. Иллюстрация проявления эффекта Гиббса

2) образуются ореолы по границам резких переходов цветов, так называемый эффект Гиббса (рис. 2.10).

Оценка влияния таких уязвимостей стандартизированных технологий обработки I-кадров на интенсивность  $I_I$  их кодового представления показана на рис. 2.11. Расчеты проводились для базовых кадров соответствующих форматам SD и HD качества [8; 12; 14; 55].

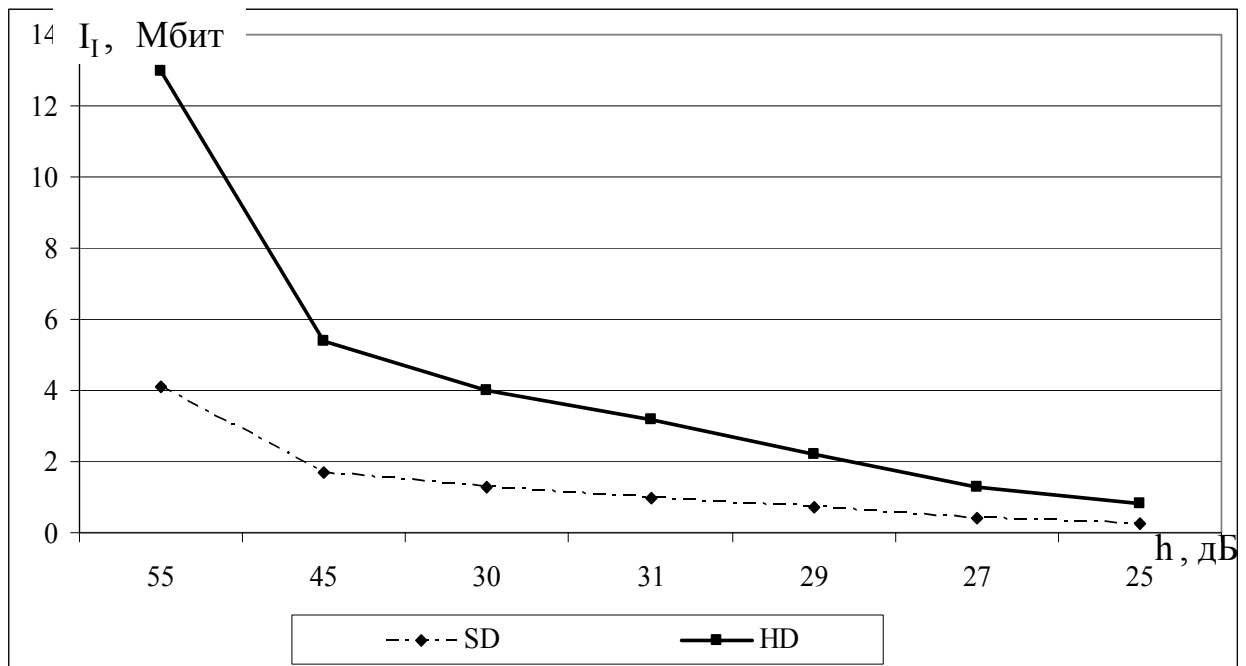


Рис. 2.11. Графики зависимости интенсивности кодового представления базового кадра от ПОСШ для разного пространственного разрешения

Соответствующая оценка, полученных и показанных на рис. 2.11 графиков приводит к следующим заключениям:

1. За счет использования систем сжатия видеоданных при наличии потерь качества реконструируемых изображений на уровне пикового отношения сигнал/шум равного 25 – 30дБ, обеспечивается передача изображений нормального SD качества и изображений формата CIF по высокоскоростным каналам связи ( $U_{\Pi} \geq 10$  Мбит/с) на небольшие расстояния. В случае необходимости обеспечить ПОСШ на уровне 45 дБ интенсивность кодового представления необходимо дополнительно снизить в 1,5 раза.

2. Для базовых кадров с высоким пространственным разрешением, чтобы обеспечить своевременную доставку с использованием ИКС с пропускной способностью  $U_{\Pi} \geq 100$  Мбит/с, при наличии искажений на уровне ПОСШ 25 – 30 дБ значение интенсивности сжатого видеопотока необходимо уменьшить как минимум в 1,3 раза.

Значит, повышение разрешения сжимаемого базового кадра приводит к появлению дисбаланса между его кодовой интенсивностью и пропускной способностью сети.

Рассмотрим особенности доставки базовых кадров с использованием различных протоколов транспортного уровня.

В мультисервисной сети основным сетевым протоколом обмена является протокол IP. На транспортном же уровне это протоколы UDP и TCP. Протоколы транспортного уровня отвечают за доставку сообщений между оборудованием конечных пользователей и обеспечивают своевременную (UDP) или достоверную (TCP) доставку.

Протокол TCP характеризуется наличием механизма подтверждения правильности принятия для каждого пакета. В случае, если принят пакет с ошибкой или пакет был потерян в ходе передачи, то приемная сторона, обнаружившая потерю или повреждение, инициирует повтор передачи для данного пакета. Это приводит к увеличению времени передачи. Такой способ передачи используется для служб и услуг, которые чувствительны к потерям данных, но не требовательны ко времени передачи. Зависимости времени доставки сообщений ( $t_{\text{дост.}}$ ) от числа потерь ( $P_{\text{потерь}}$ , %) в ходе передачи и числа промежуточных узлов ( $N_{\text{узлов}}$ ) приведено на рис. 2.12 [8; 12; 14; 54; 55].

Анализируя полученные данные, можно сказать, что время доставки сообщения существенно зависит от обоих параметров - как от числа узлов коммутации, находящихся на пути следования пакетов, так и от вероятности потерь пакетов. В случае потерь пакетов в ходе передачи происходит повторный запрос не принятых данных, что увеличивает суммарное время

доставки. Так же с увеличением числа транзитных узлов, если считать что все узлы равнозначны, время доставки сообщений так же увеличится.

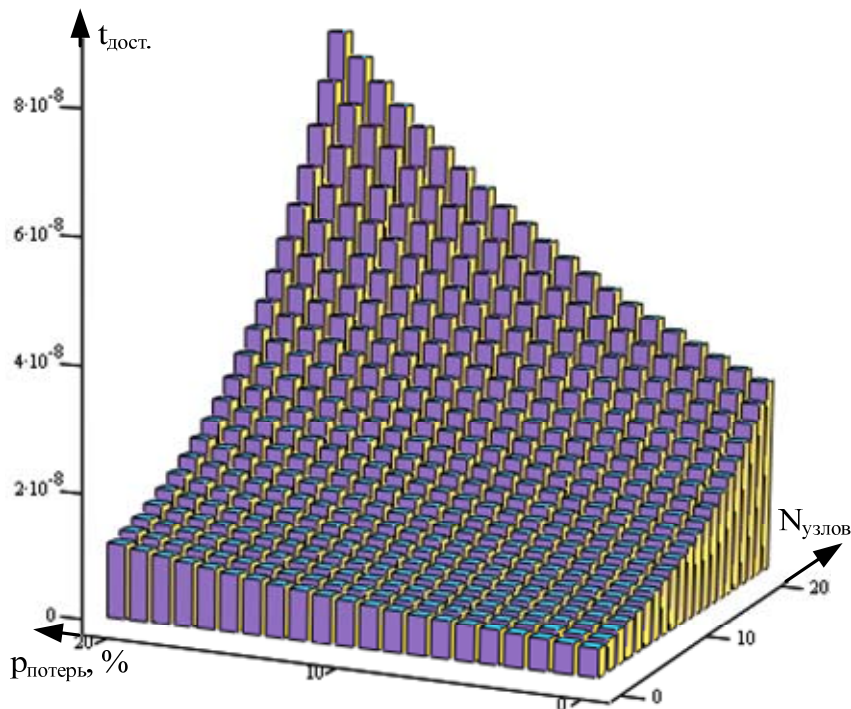







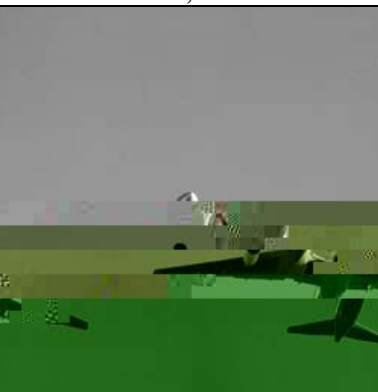


Рис. 2.12. Зависимость времени доставки сообщения от вероятности потерь и числа узлов телекоммуникационной сети

Например, при увеличении числа узлов от 1 до 20 задержка увеличится в 8 раз, а при появлении потерь пакетов до 20% от их общего числа - задержка увеличится в 18 раз.

В случае использования протокола UDP потерянные или поврежденные пакеты в ходе передачи не передаются вновь передающей стороной и при этом считается, что все сообщение является доставленным до конечного оборудования. Данный механизм используется службами и услугам, которые чувствительны ко времени передачи, такими как IP-телефония, видео в реальном масштабе времени и др. Однако в случае доставки базовых кадров с использованием стандартизированных технологий компрессии и протокола UDP, как показано в табл. 2.1, полученные изображения «распадаются» даже при малых потерях [54]. Такая уязвимость объясняется тем, что для реконструкции

Таблица 2.1

Зависимости ПОСШ при различных уровнях потерь пакетов при доставки базовых кадров разной степени насыщенности с использованием стандартных технологий компрессии и протокола UDP

%	П	Средне насыщенное изображение	Слабо насыщенное изображение
Исходное изображение			
0%		 MSE = 0.06, PSNR=60.356	 MSE = 0.08, PSNR= 59.2
1%		 MSE = 6411.53, PSNR= 10.06	 MSE = 1372.15, PSNR= 16.75
3%		 MSE = 21916.35, PSNR= 4.72	 MSE = 6351.65, PSNR= 10.10

базовых кадров стандартом предусмотрено использование методов префиксного декодирования длин цепочек нулевых компонент трансформанты.

В результате можно утверждать, что в следствии увеличения вероятности потерь данных и повышения задержек в процессе доставки потока кадров резко ухудшается качество видеосервиса.

Анализ результатов обработки базовых кадров в зависимости от количества потерянных пакетов позволяет заключить, что (табл. 2.1) для насыщенных базовых кадров значение ПОСШ снижается в среднем на 86% при 1% потерь пакетов и на 92% соответственно при 3% потерь пакетов. Для средненасыщенных кадров оценки будут такими: на 83% при 1% потерь и на 92% при 3% потерь. Соответственно для слабонасыщенных кадров получим: на 71% при 1% потерь и на 83% при 3% потерь пакетов.

При использовании механизмов стандартных технологий сжатия базовых кадров потери информации достигают значительного уровня и являются недопустимыми. Об этом указывают качественные (визуальные) и количественные (значение ПОСШ) реконструированных базовых кадров (табл. 2.1). Ситуация становится более проблематичной с учетом того, что базовый кадр является определяющим для реконструкции кадров Р-типа и В-типа.

Отсюда можно сделать следующее заключение. Существующие стандартизированные технологии обработки базовых кадров видеопотока обладают рядом существенных уязвимостей, проявляемых в случае повышения степени сжатия и наличии потерь пакетов в процессе их передачи в сети. Это ограничивает возможность относительно снижения интенсивности кодового представления базовых кадров видеопотока на основе использования существующих механизмов в соответствии со стандартизированными рекомендациями.

Для формирования новых механизмов процесса обработки базовых кадров требуется учитывать их ключевое влияние на эффективность функционирования технологии компрессии всего потока видеокадров, а именно то, что:

1) во-первых несут важную информацию о группе кадров. Достоверность реконструкции кадров Р-типа и В-типа зависит от достоверности семантического содержания базового кадра I-типа. В противном случае искажения будут размножаться на всю группу кадров;

2) во-вторых в режиме компрессии с высоким качеством сжатый объем базового кадра вносит наиболее существенный вклад в суммарную интенсивность всего потока видео-кадров.

В связи с чем, *предлагается* на базе стандартизированной технологии обработки базовых кадров с контролируемой потерей качества разработать подходы для снижения интенсивности их кодового представления при заданных требованиях относительно вычислительной сложности алгоритма и уровня визуального качества восприятия.

Здесь в качестве базовых технологий *предлагается* использовать трансформацию изображений на основе дискретного косинусного преобразования с последующей коррекцией значений компонент в соответствии с моделью визуального восприятия. Это позволит использовать механизмы для снижения интенсивности видеопотока и повышения качества восстанавливаемых кадров. Впоследствии это упростит интеграцию разрабатываемых подходов в существующие технологии компактного представления базовых кадров [8; 12; 14; 55].

Для реализации выдвинутых направлений возможны следующие варианты дополнительного снижения кодовой интенсивности, а именно:

1) в совершенствовании адаптивных вероятностно-статистических моделей трансформант для варианта динамического статистического кодирования. Но, это с одной стороны приводит к увеличению времени на обработку и к росту количества разрядов на представление служебной информации. С другой стороны эффективность статистических методов по степени сжатия практически достигла своего максимального уровня. Избыточность статистических кодов относительно энтропии Марковского источника не превышает в среднем 10 – 20 %.

2) дальнейшее развитие путей для дополнительного устранения психовизуальной избыточности при обработке трансформант ДКП. Например, увеличить количество отбрасываемых из дальнейшей обработки компонент трансформант. В то же время в условиях обработки базовых кадров это приведет к разрушению отдельных частей или сразу всех кадров в потоке, и к снижению величины ПОСШ ниже требуемого уровня, т.е.  $h < h_{тр}$ .

Поэтому, существует необходимость исследования возможности увеличения коэффициента сжатия для методов, использующих дискретное косинусное преобразование и квантизацию ее компонент, за счет выявления новых закономерностей и устранения избыточности не связанных с выявлением неравномерности распределения значений компонент и их влияния на качество визуального восприятия. Для этого *предлагается* осуществлять дополнительное выявление в трансформированных изображениях структурных закономерностей. Данный подход базируется на учете структурных преимуществ трансформированных изображений. В том числе, повышение концентрации энергии в ограниченном количестве компонент трансформанты ДКП, неравномерность распределения внутри трансформанты как компонент, имеющих нулевые значения, так и динамических диапазонов компонент.

Для обеспечения требований относительно количества операций на обработку и качества реконструкции по метрике ПОСШ необходимо [8; 12; 14; 55]:

- сократить количество операций умножения, приходящихся на одну обрабатываемую компоненту трансформанты, и устранить необходимость переходов к обработке отдельных битовых структур;

- обеспечить возможность для сохранения информации о большем количестве компонент трансформанты ДКП;

- исключить возможность внесения искажений в процессе устранения структурной избыточности.



### 2.3. Разработка методологических рекомендаций по совершенствованию технологии снижения интенсивности кодового представления базовых кадров

В результате выполнения дискретного косинусного преобразования формируется трансформанта, размером  $n \times n$  элементов, представляемая в виде двумерного массива

$$Y = \begin{pmatrix} Y_{1,1} & \dots & Y_{1,j} & \dots & Y_{1,n} \\ & & \dots & & \\ Y_{i,1} & \dots & Y_{i,j} & \dots & Y_{i,n} \\ & & \dots & & \\ Y_{n,1} & \dots & Y_{n,j} & \dots & Y_{n,n} \end{pmatrix}, \quad (2.4)$$

где  $Y_{i,j}$  -  $(i;j)$ -я компонента трансформанты.

В соответствии со свойствами базисных функций ДКП компоненты трансформант являются интегральными характеристиками структурного содержания фрагмента изображения. Причем интегральные свойства компонент зависят от их положения в трансформанте. Такая зависимость выглядит следующим образом [5 – 8; 12; 14; 17; 55; 70]:

1. Значение компоненты в верхнем левом углу трансформанты пропорциональны средней яркости изображения.

2. Компоненты левой верхней области трансформанты характеризуют степень насыщенности блока изображения низкочастотными перепадами. К низкочастотным перепадам относят ступенчатые изменения уровня яркости или координаты цвета.

3. Компоненты в средней части трансформанты определяют степень насыщенности блока изображения линейными, монотонными изменениями уровня яркости.

4. Значения компонент в нижней правой области трансформанты зависят от степени насыщенности блока изображения высокочастотными перепадами. К высокочастотным перепадам относят импульсные изменения значений элементов изображений.

Значение компонент изменяются по мере преобладания в изображении различных структурных особенностей. Широкий класс изображений содержит в основном линейные, монотонные и ступенчатые структурные изменения уровня яркости. Импульсные изменения занимают меньшую площадь изображения. Кроме того, они могут быть вызваны шумами дискретизации. Поэтому наибольшие значения имеют компоненты расположенные в верхней левой части трансформанты. Компоненты в нижней части трансформанты соответствуют высокочастотным изменениям. Поэтому они имеют меньшие значения.

Для трансформант ДКП базовых кадров сильнонасыщенных деталями (фото с КА, БПЛА, информация на картографическом фоне, лесной или горной местности) характерны следующие особенности:

- значения компонент ДКП уменьшается в направлении от левого верхнего угла к правому нижнему углу трансформанты;

- компоненты трансформанты с большими значениями сконцентрированы в относительно малой области трансформанты. Наоборот компоненты с наименьшими значениями занимают большую часть трансформанты. Причем, чем больше отношение площади, имеющей мало-изменяющуюся яркость к площади изображения передаваемого объекта, тем меньше размер области трансформанты с большими значениями компонент [5 – 8; 12; 14; 17; 55; 70].

Отсюда следует, что важными характеристиками трансформант ДКП являются [5 – 8; 12; 14; 17; 55; 70]:

- величины  $y_{k\ell}^{(\max)}$  динамических диапазонов их компонент  $y_{k\ell}$ :

$$y_{k\ell}^{(\max)} = y_{k\ell} + 1; \quad (2.5)$$

- динамический диапазон  $d_{\text{тр}}$  для всей трансформанты, равный

$$d_{\text{тр}} = |y_{\text{max}}| - |y_{\text{min}}| + 1; \quad (2.6)$$

$$y_{\text{max}} = \max_{\substack{0 \leq k \leq n-1; \\ 0 \leq \ell \leq n-1;}} \{y_{k;\ell}\}; \quad y_{\text{min}} = \min_{\substack{0 \leq k \leq n-1; \\ 0 \leq \ell \leq n-1;}} \{y_{k;\ell}\}, \quad (2.7)$$

где  $y_{\text{max}}$  и  $y_{\text{min}}$  - соответственно максимальное и минимальное значение компоненты в трансформанте;

- величина  $d_k$  динамического диапазона строки трансформанты равная разности между максимальным  $y_{k,\text{max}}$  и  $y_{k,\text{min}}$  минимальным значениями компонент в  $k$ -й строке, т.е.

$$(y_{k,\text{max}} - y_{k,\text{min}}) + 1 = d_k; \quad (2.8)$$

- величина  $d_\ell$  динамического диапазона  $\ell$ -го столбца трансформанты равная разности между максимальным  $y_{\ell,\text{max}}$  и  $y_{\ell,\text{min}}$  минимальным значениями компонент  $\ell$ -го столбца, а именно

$$(y_{\ell,\text{max}} - y_{\ell,\text{min}}) + 1 = d_\ell. \quad (2.9)$$

Поскольку неравномерность динамических диапазонов характерна как для строк, так и для столбцов трансформанты, то в общем случае выполняется неравенство [5 – 8; 12; 14; 17; 55; 70]:

$$d_k \neq d_\ell.$$

Поэтому для уменьшения динамического диапазона компоненты  $y_{k\ell}$  необходимо использовать величину  $d_{k\ell}$ , полученную на основе динамических диапазонов строк  $d_k$  и столбцов  $d_\ell$ , т.е. учитывается неравномерность диапа-

зонов по двум направлениям трансформанты. Значение величины  $d_{k\ell}$  в этом случае будет равно [5 – 8; 12; 14; 17; 55; 70]:

$$d_{k\ell} = \min(d_k; d_\ell). \quad (2.10)$$

Тогда с учетом соотношений (2.8) – (2.10) выполняются неравенства:

$$y_{k\ell} < d_{k\ell}; \quad d_{k\ell} < d_k; \quad d_{k\ell} < d_\ell. \quad (2.11)$$

Для динамических диапазонов компонент характерны неравномерность распределения и ограниченность значений в разных частях трансформант. В соответствии с чем, трансформанты ДКП имеет комбинаторную интерпретацию [5 – 8; 12; 14; 17; 55; 70].

Трансформанта ДКП представляет собой перестановку с повторениями на элементы  $y_{k\ell}$ , которой наложены ограничения на динамический диапазон.

Если рассматривать только абсолютные значения компонент трансформанты, т.е. знак не учитывается, то их значения будут находиться в следующем диапазоне:

$$y_{k\ell} = \overline{0, d_{k\ell} - 1}. \quad (2.12)$$

Тогда количество различных трансформант, составленных из  $(n \times n)$ -го количества компонент  $y_{k\ell}$ , удовлетворяющих соотношению (2.12), будет определяться по формуле [5 – 8; 12; 14; 17; 55; 70]:

$$V_{n \times m}^{(2)} = \prod_{k=1}^n \prod_{\ell=1}^n d_{k\ell}, \quad (2.13)$$

где  $V_{n \times n}^{(2)}$ , - количество трансформант, компоненты которых удовлетворяют ограничению (2.12).

Согласно комбинаторной интерпретации трансформанты и соотношению (2.13) количество информации, в среднем содержащееся в одном элементе  $y_{k\ell}$ , оценивается с помощью следующего выражения:

$$\bar{Q}_{n \times n}^{(2)} = (\log_2 V_{n \times n}^{(2)}) / n \cdot n = (\log_2 \prod_{k=1}^n \prod_{\ell=1}^n d_{k\ell}) / n \cdot n = (\sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^n \log_2 d_{k\ell}) / n \cdot n, \quad (2.14)$$

где  $\bar{Q}_{n \times n}^{(2)}$  - количество информации, приходящееся в среднем на одну компоненту трансформанты в случае его комбинаторной трактовки для ограничения (2.12).

Соответственно количество комбинаторной избыточности в трансформанте определяется разницей между количеством информации, приходящимся в среднем на одну компоненту, до и после учета ограничений на динамический диапазон.

Природа комбинаторной избыточности следует из того, что разница между количеством информации зависит от количества перестановок с повторениями, которое можно составить для различных ограничений на динамический диапазон. Количество информации будет уменьшаться при понижении значения динамического диапазона. Поэтому раздельное представление исходных компонент трансформанты в виде двух массивов, а именно: массива  $Y$  абсолютных целочисленных значений компонент трансформант

$$Y = \begin{vmatrix} Y_{1,1} & \dots & Y_{1,\ell} & \dots & Y_{1,n} \\ & & \dots & & \\ Y_{k,1} & \dots & Y_{k,\ell} & \dots & Y_{i,n} \\ & & \dots & & \\ Y_{n,1} & \dots & Y_{n,\ell} & \dots & Y_{n,n} \end{vmatrix}$$

и двоичного массива  $Z$  их знаков (где  $z_{k,\ell}$  ( $k; \ell$ )-й элемент массивы знаков)

$$Z = \begin{vmatrix} z_{1,1} & \dots & z_{1,\ell} & \dots & z_{1,n} \\ & & \dots & & \\ z_{k,1} & \dots & z_{k,\ell} & \dots & z_{i,n} \\ & & \dots & & \\ z_{n,1} & \dots & z_{n,\ell} & \dots & z_{n,n} \end{vmatrix}$$

является оправданным.

Различное количество перестановок, а значит и наличие комбинаторной избыточности в трансформантах объясняется [5 – 8; 12; 14; 17; 55; 70]:

- неравномерными значениями компонент в строках трансформанты;
- остаточной взаимной корреляцией между компонентами ДКП. Это обусловлено тем, что в отличие от преобразования Корунэна-Лоева преобразование ДКП не является оптимальным с позиций декорреляции исходных элементов изображений;

- взаимозависимостью компонент ДКП. Поскольку за счет преобразования ДКП достигается частичное разрушение только линейных зависимостей, а нелинейные зависимости не учитываются;

- неравномерностью распределения значений компонент трансформант.

Наличие комбинаторной избыточности в трансформантах двумерного косинусного преобразования имеет статистическую и психовизуальную обусловленность, а именно [5 – 8; 12; 14; 17; 55; 70]:

1. Психовизуальная избыточность, вызванная нечувствительностью зрения человека к некоторым аналоговым особенностям изображений. Следова-

тельно, найдутся такие различные перестановки элементов изображения, которые будут восприниматься визуально одинаково.

2. Вероятностно-статистическая избыточность, которая определяется различной вероятностью появления некоторых последовательностей элементов изображений. С точки зрения комбинаторики это можно трактовать как безвозвратную выборку из элементов с различными значениями спецификаций (число элементов одного вида). Классификатором вида является значение динамического диапазона. Значит, появление избыточных выборок имеет также статистическую интерпретацию.

Для сокращения избыточности необходимо провести распределение разрядов по кодовым конструкциям. В случае поэлементного распределения разрядов возникают сложности, обусловленные необходимостью либо использовать разделители для выравнивания кодовых слов либо передавать информацию о значениях динамического диапазона. Кроме того, формирование кодовых слов для отдельных элементов является менее эффективным относительно формирования кодов для последовательности элементов.

Отсюда *преимущественно* использовать подход относительно распределения разрядов, базирующийся на возможности описания последовательности компонент трансформанты в виде позиционного числа.

В данном случае позиционным числом является столбец  $Y^{(\ell)} = \{y_{1,\ell}, y_{2,\ell}, \dots, y_{k,\ell}, \dots, y_{n,\ell}\}$  трансформанты, компонентам которой соответствует основание равное величине  $d_{\text{тр}}$  - динамического диапазона трансформанты. Значение кода  $E_\ell$  для такого позиционного числа задается следующей формулой [5 – 8; 12; 14; 17; 55; 70]:

$$E_\ell = y_{1,\ell} d_{\text{тр}}^{n-1} + y_{2,\ell} d_{\text{тр}}^{n-2} + \dots + y_{k,\ell} d_{\text{тр}}^{n-k} + \dots + y_{n-1,\ell} d_{\text{тр}} + y_{n,\ell} ,$$

где  $y_{k,\ell}$  - компонента расположенная на  $k$ -й позиции в  $\ell$ -м столбце трансформанты;

$d_{\text{тр}}^{n-k}$  - весовой коэффициент компоненты  $Y_{k,\ell}$ ;

$n$  - количество компонент в столбце трансформанты.

Для такого варианта не учитываются ограничения на компоненты столбца  $Y^{(\ell)}$  трансформанты. Если рассматривать вариант, когда учитываются ограничения на динамический диапазон компонент, т.е.  $Y_{k,\ell} < d_{k,\ell}$ , то такое позиционное число будет называться неравновесным [5 – 8; 12; 14; 17; 55; 70].

*Неравновесным позиционным числом* (НПЧ) называется последовательность элементов  $\{Y_{1,\ell}, \dots, Y_{k,\ell}, \dots, Y_{n,\ell}\}$ , на значения которых наложены ограничения на динамический диапазон в соответствии с выражениями (2.8) - (2.10), а значения их весовых коэффициентов зависят от позиции компонент в столбце и имеют неравновесный прирост.

Такое название обусловлено тем, что прирост в значении весового коэффициента для двух соседних элементов НПЧ будет неравномерным, а именно:

$$\prod_{k=1}^{n-\xi} d_{k,\ell} / \prod_{k=1}^{n-\xi-1} d_{k,\ell} = d_{n-\xi,\ell} \neq \prod_{k=1}^{n-\gamma} d_{k,\ell} / \prod_{k=1}^{n-\gamma-1} d_{k,\ell} = d_{n-\gamma,\ell},$$

где  $\prod_{k=1}^{n-\xi} d_{k,\ell}$ ,  $\prod_{k=1}^{n-\xi-1} d_{k,\ell}$  - весовые коэффициенты соответственно для  $(n - \xi + 1)$ -й

и  $(n - \xi)$ -й компоненты трансформанты;

$\prod_{k=1}^{n-\gamma} d_{k,\ell}$ ,  $\prod_{k=1}^{n-\gamma-1} d_{k,\ell}$  - весовые коэффициенты соответственно для  $(n - \gamma + 1)$ -

й и  $(n - \gamma)$ -й компоненты трансформанты;

$d_{n-\xi,\ell}$ ,  $d_{n-\gamma,\ell}$  - основания соответственно  $(n - \xi)$ -й и  $(n - \gamma)$ -й компоненты трансформанты.

Соответственно значение кода  $E'_{\ell,n}$  для неравновесного позиционного числа будет определяться по следующему соотношению [5 – 8; 12; 14; 17; 55; 70]:



$$E'_{\ell,n} = y_{n,\ell} \prod_{k=1}^{n-1} d_{k,\ell} + y_{n-1,\ell} \prod_{k=1}^{n-2} d_{k,\ell} + \dots + y_{2,\ell} d_{1,\ell} + y_{1,\ell}. \quad (2.15)$$

Значит, для формирования кодового представления сразу всей последовательности  $Y^{(\ell)}$  компонент трансформанты ДКП с учетом ограничений на динамический диапазон необходимо рассматривать ее как неравновесное позиционное число.

Количество  $Q_{\ell,n}$  разрядов на представление кодового значения  $E'_{\ell,n}$  для НПЧ в режиме локально-неравномерного распределения разрядов определяется на основе такого выражения:

$$Q_{\ell,n} = [\ell \log_2(\prod_{k=1}^n d_{k,\ell}) - 1] + 1 \text{ (бит)}. \quad (2.16)$$

Здесь используется свойство неравновесных позиционных чисел, состоящее в том, что значение  $E'_{\ell,n}$  их кода ограничено сверху величиной  $\prod_{k=1}^n d_{k,\ell}$  накопленного произведения оснований, т.е. [5 – 8; 12; 14; 17; 55; 70]:

$$E'_{\ell,n} \leq \prod_{k=1}^n d_{k,\ell} - 1.$$

Тогда с учетом выражения (2.16) суммарное количество  $Q_{n \times n}$  разрядов на представление всей трансформанты находится как сумма количества  $Q_{\ell,n}$  разрядов на кодовое представление ее столбцов, рассматриваемых как неравновесные позиционные числа, т.е.

$$Q_{n \times n} = \sum_{\ell=1}^n Q_{\ell, n} = \sum_{\ell=1}^n ([\log_2(\prod_{k=1}^n d_{k, \ell}) - 1] + 1) \text{ (бит)}. \quad (2.17)$$

Экспериментальная оценка количества  $Q_{n \times n}$  разрядов на представление трансформанты, столбцы которой представляются кодами НПЧ, показана в виде диаграмм на рис. 2.13. Оценка величины  $Q_{n \times n}$  проводится в зависимости от степени насыщенности базовых кадров и значения пикового отношения сигнал/шум (ПОСШ).

Анализ результатов исследований, приведенных в виде диаграмм на рис. 2.13, позволяет заключить, что использование неравновесного позиционного кодирования для сокращения комбинаторной избыточности в столбцах трансформант обеспечивает снижение кодовой интенсивности базовых кадров в пересчете на один блок от 1,7 раз до 7 раз для ПОСШ на уровне 45 дБ, и от 10 до 26 раз для ПОСШ на уровне 30 дБ в зависимости от степени насыщенности фрагментов базового кадра.

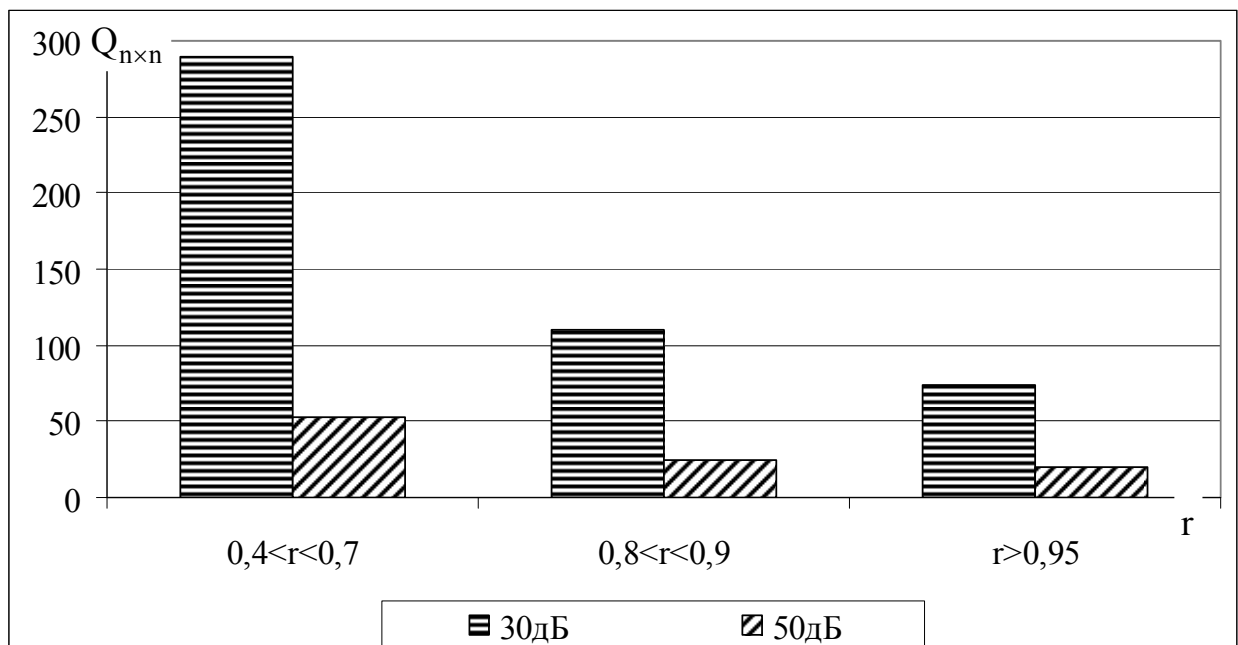


Рис. 2.13. Зависимость величины  $Q_{n \times n}$  от степени насыщенности базовых кадров и ПОСШ

Значит, формирование кода для столбца трансформанты, рассматриваемой как НПЧ имеет потенциал для дополнительного снижения интенсивности кодового представления базового кадра.

В тоже время такой уровень интенсивности базовых кадров является недостаточным для доставки видеопотока в условиях обеспечения заданного качества визуального восприятия.

Таким образом, можно сделать следующие заключения:

1) на основе особенностей формирования трансформант для различных базовых кадров с различной степенью насыщенности деталями обоснована потенциальная возможность относительно дополнительного снижения их интенсивности за счет представления столбцов трансформанты неравновесными позиционными числами;

2) показано, что в результате неравновесного позиционного кодирования сокращается комбинаторная избыточность, обусловленная с одной стороны коррелированностью областей базовых кадров, а с другой стороны - наличием ограниченного количества мелких объектов.

## **Выводы**

1. Выявлены достоинства стандартизированной технологии кодирования базовых кадров, а именно то, что: сокращается задержка на выявление закономерностей и кодирование данных; повышается степень интегрированности относительно битовой структуры, а следовательно, уменьшается количества потенциально устраняемой избыточности; существует возможность выбора соотношения между степенью сжатия и качеством изображения; достигается высокая степень сжатия для слабонасыщенных изображений в режиме внесения существенных искажений; обеспечивается простота и высокая скорость работы при кодировании данных в условиях высокого уровня квантизации.

2. Показана необходимость построения стратегии и алгоритма кодирования квантизированной трансформанты I-кадра для дополнительного снижения интенсивности видеопотока с учетом использования таких свойств как: концентрация основной энергии исходного сигнала в ограниченном количестве низкочастотных компонент трансформанты; выделение области высокочастотных компонент, несущих информацию о мелких деталях изображений, и потому оказывающих менее значимое влияние на визуальное восприятие изображений, чем низкочастотные компоненты; появление компонент трансформанты с нулевыми значениями, особая концентрация которых велика для зигзагообразного обхода в диагональном направлении в области высокочастотных компонент.

3. Обоснованы уязвимости стандартизированной технологии обработки базовых кадров MPEG-технологии, а именно:

1) степень сжатия достигает своих наибольших значений для низких значений ПОСШ;

2) в случае необходимости обеспечить ПОСШ на уровне 45 дБ интенсивность кодового представления необходимо дополнительно снизить в 1,5 раза.

3) для базовых кадров с высоким пространственным разрешением, чтобы обеспечить своевременную доставку с использованием ИКС с пропускной способностью  $U_{\text{п}} \geq 100$  Мбит/с, при наличии искажений на уровне ПОСШ 25 – 30 дБ значение интенсивности сжатого видеопотока необходимо уменьшить как минимум в 1,3 раза;

4) для протокола TCP при увеличении числа узлов от 1 до 20 задержка увеличится в 8 раз, а при появлении потерь пакетов до 20% от их общего числа - задержка увеличится в 18 раз;

5) в случае использования протокола UDP потерянные или поврежденные пакеты в ходе передачи не передаются вновь передающей стороной и при этом считается, что все сообщение является доставленным до конечного оборудования. Анализ результатов обработки базовых кадров в зависимости от количества потерянных пакетов позволяет заключить, что для насыщенных базовых кадров значение ПОСШ снижается в среднем на 86% при 1% потерь пакетов и

на 92% соответственно при 3% потерь пакетов. Для средненасыщенных кадров оценки будут такими: на 83% при 1% потерь и на 92% при 3% потерь. Соответственно для слабонасыщенных кадров получим: на 71% при 1% потерь и на 83% при 3% потерь пакетов.

4. Обоснована технологическая концепция обработки базовых кадров для снижения интенсивности кодового представления на MPEG-платформе, которая базируется на совершенствовании механизмов, содержащих этапы, обеспечивающие непосредственное формирование кодовых конструкций сжатого представления с учетом выявленных закономерностей статистической и психо-визуальной природы

Для формирования новых механизмов процесса обработки базовых кадров требуется учитывать их ключевое влияние на эффективность функционирования технологии компрессии всего потока видеокадров, а именно то, что:

1) во-первых несут важную информацию о группе кадров. Достоверность реконструкции кадров Р-типа и В-типа зависит от достоверности семантического содержания базового кадра I-типа. В противном случае искажения будут размножаться на всю группу кадров;

2) во-вторых в режиме компрессии с высоким качеством сжатый объем базового кадра вносит наиболее существенный вклад в суммарную интенсивность всего потока видео-кадров.

5. Разработаны методологические рекомендации по совершенствованию технологии снижения интенсивности кодового представления базовых кадров. Здесь основными составляющими являются:

1) использовать в качестве базовой стандартизованную технологию обработки базовых кадров с контролируемой потерей качества;

2) осуществить дополнительное выявление в трансформированных изображениях структурных закономерностей. Данный подход базируется на учете структурных преимуществ трансформированных изображений. В том числе, повышение концентрации энергии в ограниченном количестве компонент трансформанты ДКП, неравномерность распределения внутри

трансформанты как компонент, имеющих нулевые значения, так и динамических диапазонов компонент.

3) представлять столбцы трансформанты неравновесными позиционными числами;

4) использовать подход относительно распределения разрядов, базирующийся на возможности описания последовательности компонент трансформанты в виде неравновесного позиционного числа.

Показано, что в результате неравновесного позиционного кодирования сокращается комбинаторная избыточность, обусловленная с одной стороны коррелированностью областей базовых кадров, а с другой стороны - наличием ограниченного количества мелких объектов.

Использование неравновесного позиционного кодирования для сокращения комбинаторной избыточности в столбцах трансформант обеспечивает снижение кодовой интенсивности базовых кадров в пересчете на один блок от 1,7 раз до 7 раз для ПОСШ на уровне 45 дБ, и от 10 до 26 раз для ПОСШ на уровне 30 дБ в зависимости от степени насыщенности фрагментов базового кадра.

Значит, формирование кода для столбца трансформанты, рассматриваемой как НПЧ имеет потенциал для дополнительного снижения интенсивности кодового представления базового кадра.

Основные результаты исследований, представленные во втором разделе, опубликованы в следующих научных трудах [12; 14; 17; 70].

### РАЗДЕЛ 3

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОБРАБОТКИ БАЗОВЫХ КАДРОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ КОДОВОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Излагается разработка метода формирования неравновесного позиционного неравномерно-диагонального базиса оснований на основе выявления динамических диапазонов для отдельных неравномерных диагоналей в зависимости от их порядкового номера и направления зигзаг-обхода.

Создается модель оценки информативности трансформанты с учетом того, что трансформанта ДКП, рассматривается по неравномерной диагональной структуре, и представляет собой комбинаторный объект, а именно перестановку с повторениями, на динамические диапазоны элементов которых наложены ограничения.

Проводится разработка метода сжатия трансформант на основе диагонально-неравномерного позиционного кодирования. Построена обобщенная технология кодирования диагоналей без учета априорной информации о ее длине и порядковом номере в трансформанте.

Осуществляется построение технологии кодообразования кодограммам на основе диагонально-неравномерного принципа выделения количества разрядов на основе информации о длине ДНП числа и его основании.

Организуется создание метода реконструкции базовых кадров на основе диагонально-неравномерного позиционного декодирования трансформант дискретного косинусного преобразования.

Создается технология реконструкции кодограмм, содержащих кодовые значения ДНП чисел.

### 3.1. Построение методологической базы для представления трансформанты в неравновесном позиционном неравномерно-диагональном пространстве

Для снижения интенсивности кодового представления базового кадра необходимо обеспечить потенциал для дополнительного исключения структурной избыточности без внесения добавочных искажений.

Рассмотрим направление для дополнительного устранения структурной избыточности в условиях представления столбца трансформанты кодовым значением неравновесного позиционного числа [5 – 7; 11 – 13; 14; 17; 55; 70; 96].

Согласно выражению (2.16) уменьшение количества  $Q_{\ell,n}$  разрядов на представление кода  $E'_{\ell,n}$  возможно за счет снижения значений оснований  $d_{k,\ell}$ . Величины  $d_{k,\ell}$  формируются как значения динамического диапазона на пересечении  $k$ -й строки и  $\ell$ -го столбца (2.10). Поэтому сокращение динамического диапазона можно достичь следующим образом:

1) проведением дополнительной квантизации путем увеличения значений элементов  $\theta_{i,j}$  матрицы квантизации, т.е.

$$\theta'_{i,j} > \theta_{i,j}.$$

2) за счет уменьшения динамических диапазонов путем дополнительного учета характерных структурных особенностей (закономерностей) трансформанты дискретного косинусного преобразования.

Первое направление с одной стороны не требует дополнительной служебной информации и не связано с дополнительной затратой количества операций. Однако, с другой стороны, такое направление сопровождается с дополнительным внесением искажений. Причем после определенного порога искажений (выбора шага квантизации  $R' > R$ ) начинают происходить критические безвозвратные потери информации. Понятно, что данный вариант не будет удовлетворять



требованию касательно обеспечения заданного уровня визуального качества восприятия реконструированного видеопотока. Особенно это будет характерно для насыщенных деталями базовых кадров.

Второе направление не связано с внесением неучтенных искажений. Для организации данного подхода *предлагается* дополнительно учитывать следующие особенности трансформант.

Во-первых, это то, что для трансформант ДКП существует тенденция изменения структурных характеристик в *диагональном* направлении (рис. 3.1). Для рассмотрения данной структурной закономерности введем такие обозначения (рис. 3.1) [11 – 13; 14; 17; 70; 96]:

1. Обозначим диагональ трансформанты с порядковым номером  $\xi$  как  $\overline{Y}^{(\xi)}$ . При этом количество  $v_d$  диагоналей зависит от размеров  $(n \times n)$  трансформанты и определяется по формуле

$$v_d = n + (n-1) = 2n-1.$$

Соответственно значение порядкового номера диагонали будет изменяться в пределах  $\xi = \overline{1, v_d}$ .

2. Введем понятие начального элемента диагонали, под которым будем понимать элемент:

-  $y_{1,\ell}$  с координатами  $(1; \ell)$  если верны условия:

$$k = 1 \quad \& \quad \ell \leq n;$$

-  $y_{k,n}$  с координатами  $(k; n)$  в случае, когда выполняются соотношения:

$$k \geq 2 \quad \& \quad \ell = n.$$

Тогда порядковый номер  $\xi$  диагонали  $\bar{Y}^{(\xi)}$  будет зависеть от координат начального диагонального элемента следующим образом:

$$\xi = \ell, \quad \text{если } k = 1 \ \& \ \ell \leq n;$$

$$\xi = n + k - 1, \quad \text{если } k \geq 2 \ \& \ \ell = n.$$

Здесь  $k$  - координата компонент по строкам;  $\ell$  - координата компонент по столбцам трансформанты.

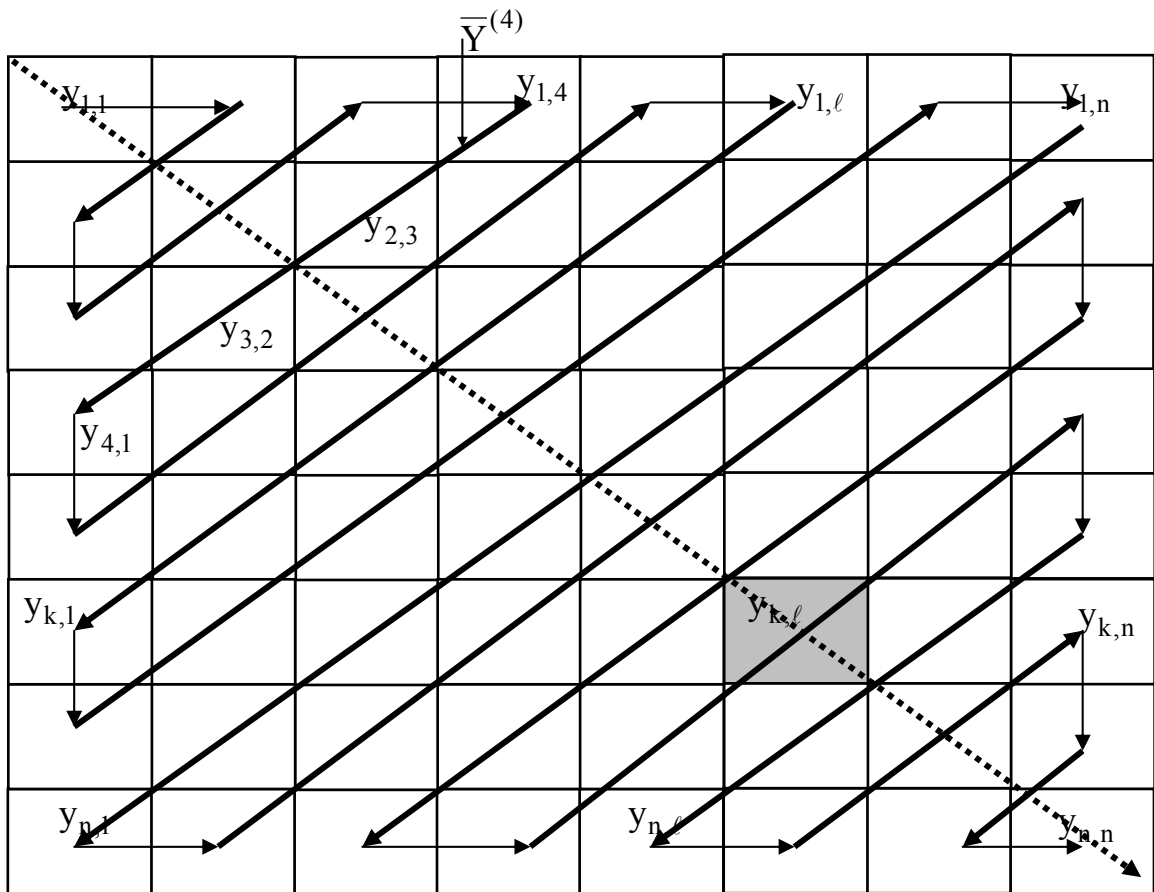


Рис. 3.1. Схема диагональности структурных характеристик трансформанты

4. Под диагональю  $\bar{Y}^{(\xi)}$  трансформанты с порядковым номером  $\xi$  будем понимать последовательности компонент, формируемые в соответствии со следующими выражениями:

$$\overline{Y}^{(\xi)} = \{y_{1,\xi}; \dots y_{1+\tau,\xi-\tau}; \dots y_{\xi,1}\}, \text{ где } \tau = \overline{0, \xi-1}, \text{ для } \xi \leq n;$$

$$\overline{Y}^{(\xi)} = \overline{Y}^{(n+k-1)} = \{y_{k,n}; \dots y_{k+\tau,n-\tau}; \dots y_{n,k}\}, \text{ где } \tau = \overline{0, 2n-\xi-1} \text{ или } \tau = \overline{1, n-k},$$

для  $\xi \geq n+1$ .

Здесь  $\tau$  - вспомогательная переменная, используемая для перечисления элементов, принадлежащих диагонали.

Например, как показано на рис. 3.1, диагональ  $\overline{Y}^{(4)}$  с порядковым номером  $\xi = 4$  будет содержать следующие элементы:

$$\overline{Y}^{(4)} = \{y_{1,4}; y_{2,3}; y_{3,2}; y_{4,1}\}, \quad \tau = \overline{0, 3}.$$

5. В соответствии с принципом формирования диагонали  $\overline{Y}^{(\xi)}$  имеют неравномерные длины  $n_\xi$ , равные

$$n_\xi = \xi, \quad \text{если } \xi \leq n; \quad (3.1)$$

$$n_\xi = 2n - \xi = n - k \quad \text{если } \xi \geq n+1. \quad (3.2)$$

Здесь  $k$  - координата компонент по строкам,  $\ell$  - координата компонент по столбцам трансформанты.

6. Конечным элементом диагонали будет элемент с координатами:

$$y_{1+\tau,\xi-\tau} \quad \text{для } \tau = n_\xi - 1, \quad \text{если } \xi \leq n;$$

$$y_{k+\tau,n-\tau} \quad \text{для } \tau = n_\xi - 1, \quad \text{если } \xi \geq n+1.$$

В тоже время с учетом выражений (3.1) и (3.2) для длины  $n_\xi$  диагонали получим, что конечный элемент будет иметь следующие координаты:

$$1 + \tau = 1 + n_{\xi} = \xi; \quad \xi - \tau = \xi - n_{\xi} = 1, \quad \text{если } \xi \leq n;$$

$$k + \tau = k + n_{\xi} = n; \quad n - \tau = n - n_{\xi} = k, \quad \text{если } \xi \geq n + 1.$$

Значит, для  $\xi$ -й диагонали ее начальный и конечный элементы будут иметь симметричные координаты, т.е.  $y_{1,\xi}$  и  $y_{\xi,1}$  либо  $y_{k,n}$  и  $y_{n,k}$ .

7. Для формализации позиционирования и степени близости диагоналей к верхнему левому углу трансформанты установим соответствующий принцип их нумерации. В этом случае предлагается нумеровать диагонали начиная с диагонали, расположенной в верхнем левом углу, и заканчивая диагональю в нижнем правом углу трансформанты. Здесь порядковые номера диагоналей будут увеличиваться по мере приближения позиции диагонали к нижнему правому углу трансформанты.

В соответствии с данным принципом нумерации определим порядок старшинства диагоналей по следующему правилу. Из двух диагоналей  $\bar{Y}^{(\xi)}$  и  $\bar{Y}^{(\chi)}$ , меньший порядковый номер будет соответствовать той диагонали, у которой определяющая позиция начального элемента будет меньшей, т.е.

$$\xi < \chi$$

если их начальными элементами являются компоненты трансформанты:

1)  $y_{1,\xi}$  и  $y_{1,\chi}$  с координатами  $(1; \xi)$ ,  $(1; \chi)$ , и выполняются условия:

$$\xi < \chi \quad \text{для } \xi \leq n \quad \& \quad \chi \leq n;$$

2)  $y_{\xi,n}$  и  $y_{\chi,n}$  с координатами  $(\xi; n)$ ,  $(\chi; n)$ , и выполняются условия:

$$\xi < \chi \quad \text{для } \xi \geq 2 \quad \& \quad \chi \geq 2.$$

Тогда, если диагональ имеет меньший порядковый номер, то она ближе расположена к верхнему левому углу трансформанты.

Теперь рассмотрим свойства диагоналей трансформант дискретного косинусного преобразования, а именно [11 – 13; 14; 17; 70; 96]:

1) первое свойство. Значения компонент уменьшаются при обходе диагонального зигзага в направлении слева – направо. В этом случае компонента  $Y_{\alpha,\beta}$  принадлежащая диагонали  $\bar{Y}^{(\omega)}$ , расположенной ближе к левому верхнему углу трансформанты (т.е. имеющей меньший порядковый номер), будет иметь потенциально меньшее значение, чем элемент  $Y_{\gamma,\phi}$ , принадлежащий диагонали  $\bar{Y}^{(\eta)}$ , позиционируемой на более удаленном расстоянии от верхнего левого угла трансформанты. Такую тенденцию можно описать следующим образом:

$$Y_{\alpha,\beta} < Y_{\gamma,\phi}, \quad \text{если } Y_{\alpha,\beta} \in \bar{Y}^{(\omega)} \text{ и } Y_{\gamma,\phi} \in \bar{Y}^{(\eta)}, \text{ а } \omega < \eta; \quad (3.3)$$

2) второе свойство задает тенденцию между значениями компонент одной диагонали. Для двух элементов  $Y_{\alpha,\beta}$  и  $Y_{\gamma,\phi}$ , принадлежащих одной диагонали, т.е.  $Y_{\alpha,\beta} \in \bar{Y}^{(\omega)}$  и  $Y_{\gamma,\phi} \in \bar{Y}^{(\omega)}$ , выполняется неравенство

$$Y_{\alpha,\beta} < Y_{\gamma,\phi}, \quad (3.4)$$

если выполняются условия между координатами элементов  $Y_{\alpha,\beta}$  и  $Y_{\gamma,\phi}$ :

- $u < v$ , где  $\alpha = 1 + u$ ,  $\beta = \xi - u$ , а  $\gamma = 1 + v$ ,  $\phi = \xi - v$  и  $k = 1$  &  $\xi \leq n$ ;
- $u < v$ , где  $\alpha = \xi + u$ ,  $\beta = n - u$ , а  $\gamma = \xi + v$ ,  $\phi = n - v$  и  $\xi \geq 2$  &  $l = n$ .

2) третье свойство. Для зигзагообразного обхода в диагональном направлении в области высокочастотных компонент наблюдается появление наиболее длинных цепочек компонент с нулевыми значениями.

Обозначим цепочку элементов  $\xi$ -й диагонали, имеющих нулевые значения как  $\bar{Y}(0)^{(\xi)}$ , а ее длину соответственно -  $n_0^{(\xi)}$ . Тогда третье свойство можно представить так. Возможность наблюдать наличие диагоналей, полностью состоящих из элементов с нулевыми значениями, растет в случае увеличения ее порядкового номера, т.е. в случае позиционирования диагонали ближе к нижнему правому углу трансформанты. Это задается следующим соотношением:

$$n_0^{(\xi)} \rightarrow n_\xi \text{ когда } \xi \rightarrow v_d \text{ для } \xi \geq n+1, \quad (3.5)$$

где  $n_\xi$  - длина  $\xi$ -й диагонали трансформанты;

$v_d$  - максимальное значение диагонали трансформанты;

$n$  - линейные размер трансформанты.

Выявленные структурные свойства диагоналей трансформанты ДКП позволяют утверждать о наличии тенденций относительно изменения значений динамических диапазонов их элементов. Для выявления таких особенностей *предлагается* определить динамические диапазоны  $d'_\xi$  диагоналей трансформанты как диапазон значений ее элементов. Это задается следующим образом:

$$d'_\xi = \max \{y_{1,\xi}; \dots y_{1+\tau,\xi-\tau}; \dots y_{\xi,1}\} + 1 = \max_{0 \leq \tau \leq \xi-1} \{y_{1+\tau,\xi-\tau}\}, \text{ для } \xi \leq n;$$

$$d'_\xi = \max \{y_{k,n}; \dots y_{k+\tau,n-\tau}; \dots y_{n,k}\} + 1 = \max_{0 \leq \tau \leq 2n-\xi-1} \{y_{k+\tau,n-\tau}\}, \text{ для } k \geq 2 \text{ и}$$

$$\xi \geq n+1.$$

Обобщим данные соотношения в одну систему с учетом выражения для длины  $n_\xi$  диагонали трансформанты. В результате получим

$$d'_\xi = \begin{cases} \max_{0 \leq \tau \leq n_\xi-1} \{y_{1+\tau,\xi-\tau}\} + 1, & \rightarrow \xi \leq n; \\ \max_{0 \leq \tau \leq n_\xi-1} \{y_{\xi-n+1+\tau,n-\tau}\} + 1, & \rightarrow \xi \geq n+1. \end{cases} \quad (3.6)$$

Поскольку для трансформанты характерно свойство (3.4) относительно наличия тенденции между элементами внутри одной диагонали, то в зависимости от направления зигзаг-обхода трансформанты возможны следующие варианты определения динамических диапазонов диагоналей, а именно [11 – 13; 14; 96]:

1) если направление обхода  $\xi$ -й диагонали (рис. 3.1) начинается с ее начального элемента, то значение  $d'_\xi$  динамического диапазона будет определяться по системе формул:

$$d'_\xi = \begin{cases} \max_{0 \leq \tau \leq n_\xi - 1} \{y_{1+\tau, \xi-\tau}\} + 1 = y_{1, \xi} + 1, & \rightarrow \xi \leq n; \\ \max_{0 \leq \tau \leq n_\xi - 1} \{y_{\xi-n+1+\tau, n-\tau}\} + 1 = y_{\xi-n+1, n} + 1, & \rightarrow \xi \geq n+1. \end{cases}$$

Здесь  $y_{1, \xi}$ ,  $y_{\xi-n+1, n}$  - начальные элементы для  $\xi$ -й диагонали соответственно для случаев, когда  $k = 1$  &  $\xi \leq n$  и  $\xi \geq 2$  &  $\ell = n$ ;

2) если направление обхода  $\xi$ -й диагонали (рис. 3.1) заканчивается в ее начальном элементе, то значение  $d'_\xi$  динамического диапазона находится с помощью следующей системы выражений:

$$d'_\xi = \begin{cases} \max_{0 \leq \tau \leq n_\xi - 1} \{y_{1+\tau, \xi-\tau}\} + 1 = y_{\xi, 1} + 1, & \rightarrow \xi \leq n; \\ \max_{0 \leq \tau \leq n_\xi - 1} \{y_{\xi-n+1+\tau, n-\tau}\} + 1 = y_{n, \xi-n+1} + 1, & \rightarrow \xi \geq n+1. \end{cases}$$

Здесь  $y_{\xi, 1}$ ,  $y_{n, \xi-n+1}$  - элементы, с которых начинается направление обхода  $\xi$ -й диагонали соответственно для случаев  $k = 1$  &  $\xi \leq n$  и  $\xi \geq 2$  &  $\ell = n$ .

Из анализа рис. 3.1 не сложно заметить, что вариант совпадения начального элемента  $\xi$ -й диагонали с началом ее обхода имеет место тогда, когда  $\xi$ -четное. Наоборот, когда порядковый номер  $\xi$  диагонали нечетный, то обход диагонали заканчивается в ее начальном элементе. В соответствии с чем, введем

признаки четности и четности порядковых номеров диагоналей, используя следующие условия:

- $\xi$  - четное, если  $\xi \bmod(2)=0$ ;
- $\xi$  - нечетное, если  $\xi \bmod(2)=1$ .

С учетом чего система соотношений (3.6) примет следующий вид:

$$d'_\xi = \begin{cases} \max_{0 \leq \tau \leq n\xi-1} \{y_{1+\tau, \xi-\tau}\} + 1 = y_{\xi,1} + 1, & \rightarrow \xi \bmod(2)=1 \ \& \ \xi \leq n; \\ \max_{0 \leq \tau \leq n\xi-1} \{y_{1+\tau, \xi-\tau}\} + 1 = y_{1,\xi} + 1, & \rightarrow \xi \bmod(2)=0 \ \& \ \xi \leq n; \\ \max_{0 \leq \tau \leq n\xi-1} \{y_{\xi-n+1+\tau, n-\tau}\} + 1 = y_{n, \xi-n+1} + 1, & \rightarrow \xi \bmod(2)=1 \ \& \ \xi \geq n+1; \\ \max_{0 \leq \tau \leq n\xi-1} \{y_{\xi-n+1+\tau, n-\tau}\} + 1 = y_{\xi-n+1, n} + 1, & \rightarrow \xi \bmod(2)=0 \ \& \ \xi \geq n+1. \end{cases} \quad (3.7)$$

Тогда для динамических диапазонов диагоналей трансформанты будут характерны следующие тенденции, а именно:

1) динамический диапазон  $d'_\omega$ , соответствующий диагонали  $\bar{Y}^{(\omega)}$ , имеющей меньший порядковый номер, будет иметь потенциально большее значение, чем динамический диапазон  $d'_\eta$  диагонали  $\bar{Y}^{(\eta)}$ , позиционируемой на более удаленном расстоянии от верхнего левого угла трансформанты, т.е.

$$d'_\omega > d'_\eta, \quad \text{если } \omega < \eta; \quad (3.8)$$

2) динамический диапазон  $d'_\xi$  потенциально будет в большей мере определяться значениями элементов  $y_{\alpha,\beta}$  диагонали, координаты  $(\alpha; \beta)$  которых удовлетворяют условиям:

$$\alpha \rightarrow \xi, \ \beta \rightarrow 1, \quad \text{для } k = 1 \ \& \ \xi \leq n; \quad (3.9)$$

$$\alpha \rightarrow n, \ \beta \rightarrow \xi, \quad \text{для } \xi \geq 2 \ \& \ \ell = n; \quad (3.10)$$



3) значение динамического диапазона  $d'_\xi$  соответствующих диагоналям, в области высокочастотных компонент трансформанты потенциально будет стремиться к 1, т.е.

$$d'_\xi \rightarrow 1, \quad \text{когда } \xi \rightarrow v_d \text{ и } \xi \geq 2 \ \& \ \ell = n, \quad (3.11)$$

**Определение.** Подход относительно выявления динамических диапазонов трансформанты в направлении диагоналей будем называть *методом неравномерно-диагонального* формирования динамическим диапазонов трансформант.

Если трансформанту ДКП рассматривать как перестановку с повторениями со спецификациями, заданными в виде ограничений (3.8) – (3.11) на динамический диапазон, то ее допустимо рассматривать как комбинаторный объект.

**Определение.** Трансформанта ДКП, рассматриваемая по неравномерной диагональной структуре, представляет собой комбинаторный объект, а именно перестановку с повторениями, на динамические диапазоны элементов которых наложены ограничения в соответствии с формулами (3.8) – (3.11) [11 – 13; 96].

Количество  $\bar{V}_{n \times n}^{(2)}$  таких трансформант определяется по формуле

$$\bar{V}_{n \times n}^{(2)} = \prod_{\xi=1}^{v_d} d'^{n\xi}. \quad (3.12)$$

или

$$\bar{V}_{n \times n}^{(2)} = \begin{cases} \prod_{\xi=1}^{v_d} \left( \max_{0 \leq \tau \leq n\xi-1} \{y_{1+\tau, \xi-\tau}\} + 1 \right)^{n\xi}, & \rightarrow \xi \leq n; \\ \prod_{\xi=1}^{v_d} \left( \max_{0 \leq \tau \leq n\xi-1} \{y_{\xi-n+1+\tau, n-\tau}\} + 1 \right)^{n\xi}, & \rightarrow \xi \geq n+1. \end{cases}$$

Соответственно количество  $\bar{Q}_{n \times n}^{(2)}$  информации, в среднем содержащееся в одном элементе  $y_{k, \ell}$ , оценивается по формуле

$$\bar{Q}'^{(2)}_{n \times n} = (\log_2 \bar{V}_{n \times n}^{(2)}) / n \cdot n = (\log_2 \prod_{\xi=1}^{v_D} d'_{\xi}{}^{n_{\xi}}) / n \cdot n = (\sum_{\xi=1}^{v_D} n_{\xi} \log_2 d'_{\xi}) / n \cdot n, \quad (3.12)$$

Для сравнения потенциально сокращаемой структурной избыточности на основе двух подходов, а именно строчно-столбцового метода выявления динамических диапазонов трансформант и неравномерно-диагонального сформулируем и докажем следующее утверждение.

**Утверждение** (о сравнении динамических диапазонов строчно-столбцового и неравномерно-диагонального методов). Для условия (3.4), задающего тенденцию изменения динамических диапазонов  $d'_{k,\ell}$  диагоналей, выполняется следующее неравенство [11 – 13; 14; 17; 70; 96]:

$$d'_{k,\ell} < d_{k,\ell}, \quad (3.13)$$

где  $d'_{k,\ell}$ ,  $d_{k,\ell}$  - значения динамических диапазонов компоненты  $u_{k,\ell}$ , вычисляемые соответственно для строчно-столбцового и неравномерно-диагонального методов.

*Доказательство.* В соответствии с тем, что структурные свойства трансформанты имеют тенденцию изменяться в направлении диагонального зигзага, и учитывая свойство (3.4), получаем, что динамические диапазоны диагоналей будут соответствовать значениям компонент, расположенных либо в начале диагонали, либо в ее конце. Данная особенность задается системой (3.7).

В таких условиях динамические диапазоны  $d_{k,\ell}$  для строчно-столбцовой схемы их выявления будут соответствовать значениям компонент трансформант, расположенным либо в ее первой строке  $Y^{(1)} = \{y_{1,1}, \dots, y_{1,\ell}, \dots, y_{1,n}\}$  либо в ее первом столбце  $Y^{(1)} = \{y_{1,1}, \dots, y_{k,1}, \dots, y_{n,1}\}$ .

Действительно, по определению значение величины  $d_{k,\ell}$  строчно-столбцового метода находится как минимальное значение из двух максимумов в  $k$ -й строке  $d_k$  и в  $\ell$ -м столбце  $d_\ell$ . В тоже время и среди компонент  $k$ -й строки и среди компонент  $\ell$ -го столбца элементами, принадлежащими диагонали с меньшим порядковым номером, будут соответственно элементы  $y_{k,1} \in \bar{Y}^{(k)}$  и  $y_{1,\ell} \in \bar{Y}^{(\ell)}$ . Другими словами наименьший порядковый номер диагонали содержащих компоненты  $k$ -й строки равен  $\xi = k$ . Соответственно наименьший порядковый номер диагоналей включающих компоненты  $\ell$ -го столбца будет равен  $\xi = \ell$ . Но тогда, согласно свойствам динамических диапазонов диагоналей значения элементов  $y_{k,1}$  и  $y_{1,\ell}$  будут максимальными среди элементов соответственно в  $k$ -й строке и в  $\ell$ -м столбце, т.е.

$$\max \{y_{k,1}, \dots, y_{k,\ell}, \dots, y_{k,n}\} + 1 = d'_k = y_{k,1} + 1; \quad (3.14)$$

$$\max \{y_{1,\ell}, \dots, y_{k,\ell}, \dots, y_{n,\ell}\} + 1 = d'_\ell = y_{1,\ell} + 1. \quad (3.15)$$

При этом замечаем, что данные элементы принадлежат соответственно первой строке и первому столбцу трансформанты.

Теперь определим динамический диапазон  $d_{k,\ell}$  как минимальное из двух максимумов  $d_k$  и  $d_\ell$ . Здесь требуется найти случаи когда  $d_k > d_\ell$  и  $d_k < d_\ell$ . Для этого необходимо определить порядковый номер и направление соответствующих диагоналей, т.е. диагоналей содержащих элемент  $y_{k,1}$  и  $y_{1,\ell}$ . Здесь требуется анализировать значения координаты по  $k$ -й строке и по  $\ell$ -му столбцу. Тогда, если выполняется неравенство

$$k \neq \ell,$$

то возможны такие случаи:

а) когда  $k > \ell$ . Для такого варианта диагональ  $\bar{Y}^{(k)}$ , содержащая элемент  $y_{k,1}$  будет иметь больший порядковый номер, чем диагональ  $\bar{Y}^{(\ell)}$ , содержащая элемент  $y_{1,\ell}$ . Отсюда по свойству динамических диапазонов диагоналей, получим, что

$$y_{k,1} < y_{1,\ell},$$

а следовательно, динамический диапазон  $d_{k,\ell}$  элемента  $y_{k,\ell}$  по строчно-столбцовому методу будет равен

$$d_{k,\ell} = y_{k,1} + 1;$$

б) наоборот когда  $k < \ell$ , то диагональ  $\bar{Y}^{(k)}$ , содержащая элемент  $y_{k,1}$  будет иметь меньший порядковый номер, чем диагональ  $\bar{Y}^{(\ell)}$ , содержащая элемент  $y_{1,\ell}$ . Поэтому будет выполняться неравенство

$$y_{k,1} > y_{1,\ell},$$

а динамический диапазон  $d_{k,\ell}$  элемента  $y_{k,\ell}$  по строчно-столбцовому методу будет соответственно равен

$$d_{k,\ell} = y_{1,\ell} + 1.$$

В том случае, когда выполняется условие

$$k = \ell,$$

то компоненты  $y_{k,\ell}$  являются центральными компонентами трансформанты. Тогда компоненты  $y_{k,1}$  и  $y_{1,\ell}$  соответствующие первому столбцу и первой строке трансформанты будут иметь симметричные координаты. Следовательно, по

свойствам диагоналей компоненты  $y_{k,1}$  и  $y_{1,\ell}$  являются соответственно начальным и конечным элементами одной диагонали.

Для такого варианта определение динамического диапазона компоненты  $y_{k,\ell}$  определяется с учетом направления обхода соответствующей диагонали. Если значение координаты  $\ell$  является четным, то диагональ с порядковым номером равным  $\ell$  и начальным элементом  $y_{1,\ell}$  будет иметь четный номер. Ее начало обхода будет совпадать с начальным элементом с координатами  $y_{1,\ell}$ . Тогда согласно свойствам динамических диапазонов диагоналей выполняется условие

$$y_{1,\ell} > y_{k,1} \text{ и } d_{k,\ell} = y_{k,1} + 1.$$

Наоборот, если значение координаты  $\ell$  является нечетными, то  $\ell$ -я диагональ будет иметь нечетный номер. Тогда на элементе  $y_{1,\ell}$  будет завершаться ее обход. Тогда будет выполняться условие

$$y_{1,\ell} < y_{k,1} \text{ и } d_{k,\ell} = y_{1,\ell} + 1.$$

Обобщив все условия, получим следующую систему:

$$d_{k,\ell} = \begin{cases} y_{k,1} + 1, \rightarrow (k \neq \ell; k > \ell) \ \& \ (k = \ell; \ell \bmod(2)=0); \\ y_{1,\ell} + 1, \rightarrow (k \neq \ell; k < \ell) \ \& \ (k = \ell; \ell \bmod(2)=1). \end{cases} \quad (3.16)$$

Докажем теперь вторую часть утверждения относительно сравнения с динамическими диапазонами разных методов формирования.

Для этого необходимо сравнить динамические диапазоны  $d'_{k,\ell}$  и  $d_{k,\ell}$ .

Динамический диапазон  $d'_{k,\ell}$  компоненты  $y_{k,\ell}$ , рассматриваемой как элемент диагонали, будет определяться в зависимости от порядкового номера диагонали и направления ее обхода. Для этого определим порядковый номер  $\xi$  для

диагонали, которая содержит элемент  $y_{k,\ell}$  с координатами  $(k;\ell)$ . Согласно свойств координат элементов, принадлежащих  $\xi$ -й диагонали получим  $1+\tau=k$  и  $\xi-\tau=\ell$ . Откуда после преобразования получим такие соотношения:

$$\tau=k-1; \quad \xi=\ell+\tau.$$

Расписав величину  $\xi$  относительно  $\tau$ , получим

$$\xi=\ell+\tau=\ell+k-1$$

Значит, компонента  $y_{k,\ell}$  будет принадлежать диагонали с порядковым номером  $(\ell+k-1)$ , т.е.  $y_{k,\ell} \in \bar{Y}^{(\xi)} = \bar{Y}^{(\ell+k-1)}$ . В этом случае динамический диапазон  $d'_{k,\ell}$ , формируемому по неравномерному диагональному принципу будет определяться с помощью следующей системы выражений:

$$d'_{k,\ell} = d'_{\xi} = d'_{k+\ell-1} = \begin{cases} y_{k+\ell-1,1}, \rightarrow (k+\ell-1) \bmod(2)=1 \ \& \ \xi \leq n; \\ y_{1,k+\ell-1}, \rightarrow (k+\ell-1) \bmod(2)=0 \ \& \ \xi \leq n; \\ y_{k+\ell-n,n}, \rightarrow (k+\ell-1) \bmod(2)=0 \ \& \ \xi > n; \\ y_{n,k+\ell-n}, \rightarrow (k+\ell-1) \bmod(2)=1 \ \& \ \xi > n. \end{cases} \quad (3.17)$$

Откуда из сравнения систем соотношений (3.16) и (3.17) вытекает, что

$$y_{k,1} + 1 > y_{k+\ell-1,1}; \quad y_{k,1} + 1 > y_{1,k+\ell-1}; \quad y_{k,1} + 1 > y_{k+\ell-n,n}; \quad y_{k,1} + 1 > y_{n,k+\ell-n}; \quad (3.18)$$

$$y_{1,\ell} + 1 > y_{k+\ell-1,1}; \quad y_{1,\ell} + 1 > y_{1,k+\ell-1}; \quad y_{1,\ell} + 1 > y_{k+\ell-n,n}; \quad y_{1,\ell} + 1 > y_{n,k+\ell-n}; \quad (3.19)$$

Это обусловлено тем, что диагонали с номерами  $k$  и  $\ell$  будут иметь больший динамический диапазон, чем диагонали с большим номером  $(k+\ell-1)$ .

*Утверждение доказано.*

### 3.2. Разработка модели и метода кодирования диагональных неравномерных позиционных чисел

С учетом доказанного неравенства (3.13) количество  $\overline{Q}_{n \times n}^{\prime(2)}$  информации в трансформанте для неравномерно-диагонального метода выявления динамических диапазонов будет меньшим, чем  $\overline{Q}_{n \times n}^{(2)}$  - для строчно-столбцового метода, т.е. [11 – 13; 14; 17; 70; 96]:

$$\overline{Q}_{n \times n}^{\prime(2)} = \left( \sum_{\xi=1}^{v_d} n_{\xi} \log_2 d'_{\xi} \right) / n \cdot n < \overline{Q}_{n \times n}^{(2)} = \left( \sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^n \log_2 d'_{k,\ell} \right) / n \cdot n \quad (3.20)$$

где  $\overline{Q}_{n \times n}^{(2)}$  - количество информации, приходящееся в среднем на одну компоненту трансформанты в случае его комбинаторной трактовки для ограничения (2.12).

Выполнение неравенства (3.20) обусловлено двумя причинами. Первая причина состоит в том, что выявление динамических диапазонов по диагональному методу позволяет сократить их значения относительно строчно-столбцового метода (выражения (3.18) и (3.19)). Вторая причина заключается в уменьшении количества оснований на одну величину, т.е.  $v_d = 2n - 1$ .

Соответственно количество  $H'$  потенциально сокращаемой избыточности для неравномерно-диагонального метода выявления динамических диапазонов относительно строчно-столбцового метода будет отличным от нулевого значения. Это записывается следующим соотношением:

$$H' = \overline{Q}_{n \times n}^{(2)} - \overline{Q}_{n \times n}^{\prime(2)} > 0. \quad (3.21)$$

Поэтому в условиях наличия тенденции относительно монотонности динамических диапазонов диагоналей трансформанты можно заключить, что не-

равномерно-диагональный метод выявления динамических диапазонов создает потенциал относительно дополнительного устранения структурной избыточности в изображениях.

Сформулируем понятие неравновесного позиционного неравномерно-диагонального базисного пространства.

**Определение.** Неравновесное позиционное пространство (базис) оснований формируемое на основе неравномерно-диагонального метода выявления динамических диапазонов, что отражается системой соотношений (3.7), т.е. определение оснований осуществляется для отдельных неравномерных диагоналей в зависимости от их порядкового номера и направления зигзаг-обхода, называется **неравновесным позиционным неравномерно-диагональным базисом оснований**, т.е.  $D' = \{d'_1, \dots, d'_\xi, \dots, d'_{v_d}\}$  [11 – 13; 14; 17; 70; 96].

Свойство неравновесности выполняется, поскольку динамические диапазоны диагоналей будут иметь неравномерные значения.

Наличие дополнительного количества потенциально сокращаемой избыточности для неравновесного позиционного неравномерно-диагонального базиса оснований создает условия для организации неравновесного позиционного кодирования. Учитывая наличие тенденции относительно зигзаго-образного уменьшения значений компонент трансформант **предлагается** формировать позиционные числа на базе элементов диагонали трансформанты ДКП. В соответствии с чем сформулируем следующее определение [11 – 13; 14; 17; 70; 96].

**Определение.** **Диагональным неравномерным позиционным числом**, т.е. позиционным числом  $\bar{Y}^{(\xi)}$  в неравномерно-диагональном базисе оснований (ДНПЧ) называется такое позиционное число, для которого в зависимости от порядкового номера диагонали в трансформанте выполняются следующие условия:

1) элементы  $u_{k,\ell}$  позиционируются на диагоналях трансформанты, т.е.

$$\bar{Y}^{(\xi)} = \begin{cases} \{y_{1+\tau, \xi-\tau}\}_{\tau=0, \xi-1}, & \rightarrow \xi \leq n; \\ \{y_{\xi-n+1+\tau, n-\tau}\}_{\tau=0, \xi-1}, & \rightarrow \xi \geq n+1. \end{cases} \quad (3.22)$$



2) основания  $d_\xi$  элементов диагоналей определяются как значения динамических диапазонов на основе неравномерно-диагонального метода выявления с использованием следующих выражений:

$$d'_\xi = \begin{cases} \max_{0 \leq \tau \leq n_\xi - 1} \{y_{1+\tau, \xi-\tau}\} + 1, & \rightarrow \xi \leq n; \\ \max_{0 \leq \tau \leq n_\xi - 1} \{y_{\xi-n+1+\tau, n-\tau}\} + 1, & \rightarrow \xi \geq n+1. \end{cases} \quad (3.23)$$

3) длина  $n_\xi$  для ДНП числа является неравномерной и определяется из условия

$$n_\xi = \begin{cases} \xi, & \rightarrow \xi \leq n; \\ 2n - \xi = n - k, & \rightarrow \xi \geq n+1. \end{cases} \quad (3.24)$$

Для предложенного варианта представления допустимо сформулировать интерпретацию трансформанты как последовательность неравномерно-диагональных позиционных чисел, что записывается как

$$Y \rightarrow \{\bar{Y}^{(1)}, \dots, \bar{Y}^{(\xi)}, \dots, \bar{Y}^{(v_d)}\}.$$

Значение кода  $\bar{E}'_{\xi, n_\xi}$  для неравномерного позиционного числа в неравномерном неравномерно-диагональном позиционном пространстве будет определяться по следующему соотношению:

1) для случая, когда для номера диагонали выполняется условие  $\xi \leq n$ , то  $n_\xi = \xi$ , и:

$$\bar{E}'_{\xi, \xi} = \sum_{\tau=0}^{\xi-1} y_{1+\tau, \xi-\tau} d'^{\xi-\tau-1}_\xi, \quad (3.25)$$

2) для случая, когда для номера диагонали выполняется неравенство  $\xi \geq n + 1$ , то  $n_\xi = 2n - \xi$ . Тогда значение кода  $\bar{E}'_{\xi, 2n - \xi}$  для  $\xi$ -й диагонали определяется как:

$$\bar{E}'_{\xi, 2n - \xi} = \sum_{\tau=0}^{2n - \xi} y_{\xi - n + 1 + \tau, n - \tau} d'_{\xi}{}^{2n - \xi - \tau}. \quad (3.26)$$

В случае обобщения данных соотношений получим следующую систему выражений для вычисления кодового значения  $\bar{E}'_{\xi, n_\xi}$  для  $\xi$ -го диагонального неравномерного позиционного числа:

$$\bar{E}'_{\xi, n_\xi} = \begin{cases} \sum_{\tau=0}^{n_\xi - 1} y_{1 + \tau, \xi - \tau} d'_{\xi}{}^{n_\xi - \tau - 1}, & \rightarrow \xi \leq n; \\ \sum_{\tau=0}^{n_\xi - 1} y_{\xi - n + 1 + \tau, n - \tau} d'_{\xi}{}^{n_\xi - \tau - 1}, & \rightarrow \xi \geq n + 1, \end{cases} \quad (3.27)$$

где  $n$  - линейный размер трансформанты;

$n_\xi$  - длина для  $\xi$ -й диагонали трансформанты;

$d'_{\xi}{}^{n_\xi - \tau - 1}$  - весовой коэффициент для  $\tau$ -го элемента  $\xi$ -й диагонали трансформанты.

Для упрощения алгоритмического представления процесса формирования кодового значения  $\bar{E}'_{\xi, n_\xi}$  необходимо записать систему выражений (3.27) в виде одного соотношения. Для этого требуется выразить координаты элементов диагонали для случая  $\xi \geq n + 1$  через значения координат элементов диагонали при  $\xi \leq n$ . В связи с чем, *предлагается* ввести вспомогательную функцию  $\text{sign}(\xi - n - 1)$ , которая задается следующим образом:

$$\text{sign}(\xi - n - 1) = \begin{cases} 1, & \rightarrow \xi > n + 1; \\ 0, & \rightarrow \xi = n + 1; \\ -1, & \rightarrow \xi \leq n; \end{cases}$$

Тогда система (3.27) преобразуется в такое соотношение:

$$\bar{E}'_{\xi, n\xi} = \sum_{\tau=0}^{n\xi-1} Y_{1+\tau+(\xi-n)\text{sign}(1+\text{sign}(\xi-n-1)), \xi-\tau-(\xi-n)\text{sign}(1+\text{sign}(\xi-n-1))} d'_{\xi}{}^{n\xi-\tau-1}$$

Введем для упрощения записи параметр  $\alpha = \xi - n$ , и получим

$$\bar{E}'_{\xi, n\xi} = \sum_{\tau=0}^{n\xi-1} Y_{1+\tau+\alpha\text{sign}(1+\text{sign}(\alpha-1)), \xi-\tau-\alpha\text{sign}(1+\text{sign}(\alpha-1))} d'_{\xi}{}^{n\xi-\tau-1} \quad (3.28)$$

$$\text{sign}(\alpha - 1) = \begin{cases} 1, & \rightarrow \alpha > 1; \\ 0, & \rightarrow \alpha = 1; \\ -1, & \rightarrow \alpha \leq 0, \end{cases}$$

где  $Y_{1+\tau+\alpha\text{sign}(1+\text{sign}(\alpha-1)), \xi-\tau-\alpha\text{sign}(1+\text{sign}(\alpha-1))}$  - обобщенная запись  $\tau$ -го элемента  $\xi$ -й диагонали трансформанты, а именно:

$$Y_{1+\tau+\alpha\text{sign}(1+\text{sign}(\alpha-1)), \xi-\tau-\alpha\text{sign}(1+\text{sign}(\alpha-1))} = \begin{cases} Y_{\xi-n+1+\tau, n-\tau}, & \rightarrow \xi > n + 1; \\ Y_{\xi-n+1+\tau, n-\tau}, & \rightarrow \xi = n + 1; \\ Y_{1+\tau, \xi-\tau}, & \rightarrow \xi \leq n. \end{cases}$$

Система (3.27) и соотношение (3.28) учитывают: особенности обхода элементов диагонали для верхней и нижней зон трансформанты; фиксированность основания для текущей диагонали. Структурная блок-схема диагонально-неравномерного позиционного кодирования трансформант представлена на рис. 3.2.

Для формирования кодовой конструкции  $V_\xi$ , содержащей кодовое значение  $\bar{E}'_{\xi, n_\xi}$  необходимо учитывать, что кодирование осуществляется для отдельных диагоналей, а количество элементов в ней является переменным.

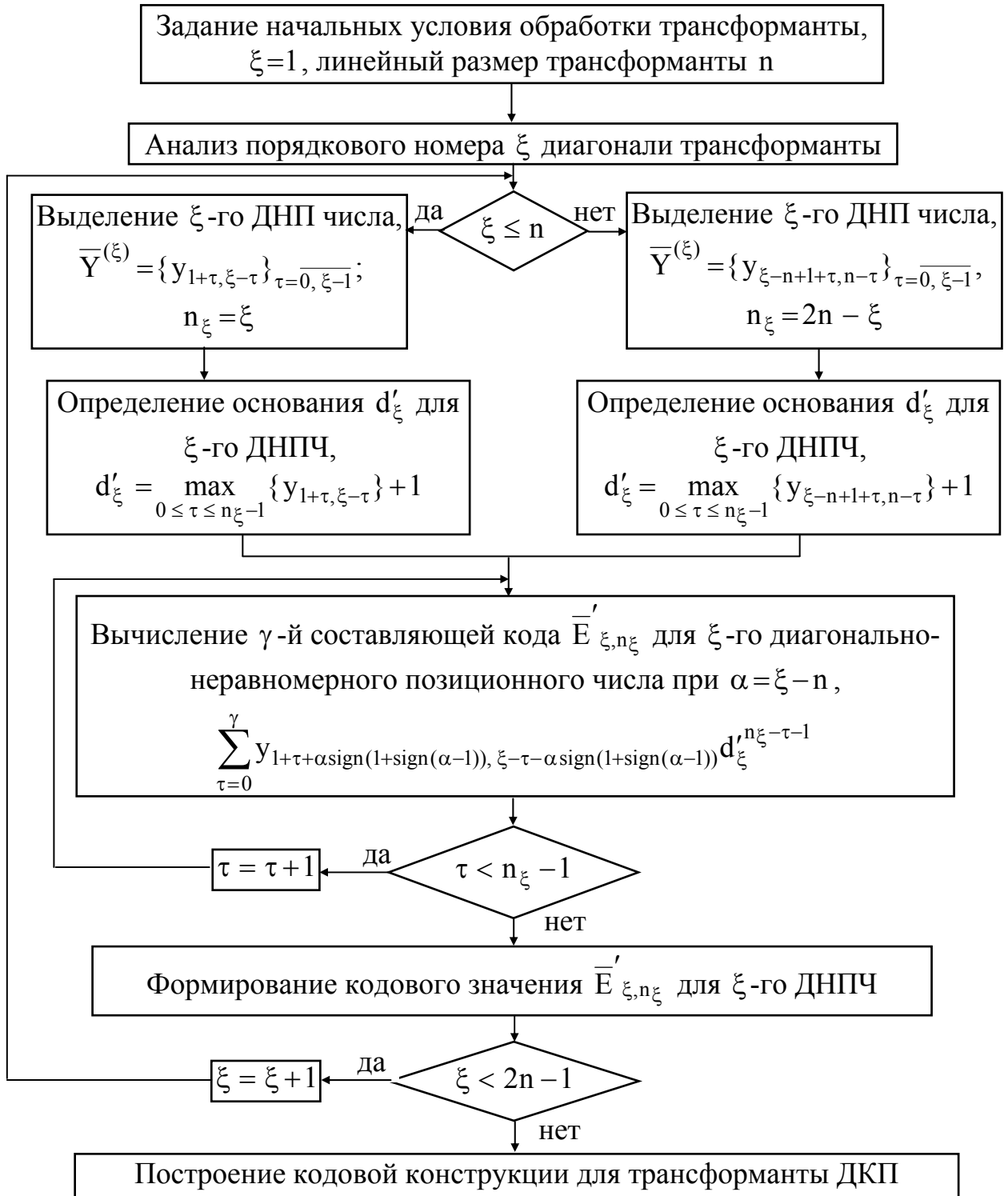


Рис. 3.2. Структурная схема кодирования диагонально-неравномерных позиционных чисел

В связи с чем, для кодообразования *предлагается* использовать диагонально-неравномерный принцип выделения количества разрядов для кодограммы. Для чего требуется определить верхний предел значений кода  $\bar{E}'_{\xi, n_\xi}$  с учетом длины ДНП числа и значения основания  $d'_\xi$ .

С учетом того, что для диагонального позиционного числа основание является локально постоянным, а длина неравномерной, то выражение для верхней границы кода  $\bar{E}'_{\xi, n_\xi}$  примет следующий вид:

$$\bar{E}'_{\xi, n_\xi} \leq d'^{n_\xi}_\xi.$$

Здесь  $d'^{n_\xi}_\xi$  - накопленное произведение оснований для диагонального неравномерного позиционного числа длиной  $n_\xi$  элементов.

С учетом чего, количество  $\bar{Q}'_{\xi, n_\xi}$  разрядов на представление кодового значения  $\bar{E}'_{\xi, n_\xi}$  для ДНП числа в режиме неравномерного распределения разрядов находится с помощью такого соотношения [11 – 13; 14; 17; 70; 96]:

$$\bar{Q}'_{\xi, n_\xi} = [\log_2(d'^{n_\xi}_\xi - 1)] + 1 \approx [n_\xi \log_2 d'_\xi] + 1 \text{ (бит)}. \quad (3.29)$$

Структурная схема процесса кодирования ДНП чисел и построения кодограммы приводится на рис. 3.3.

Распределение количества разрядов по кодограммам, содержащим кодовое значение диагоналей трансформанты, рассматриваемых как ДНП числа показано на рис. 3.4.



Эта схема показывает, что наименьшее количество разрядов соответствует первой кодограмме и кодограммам соответствующих диагоналям с наибольшими порядковыми номерами.

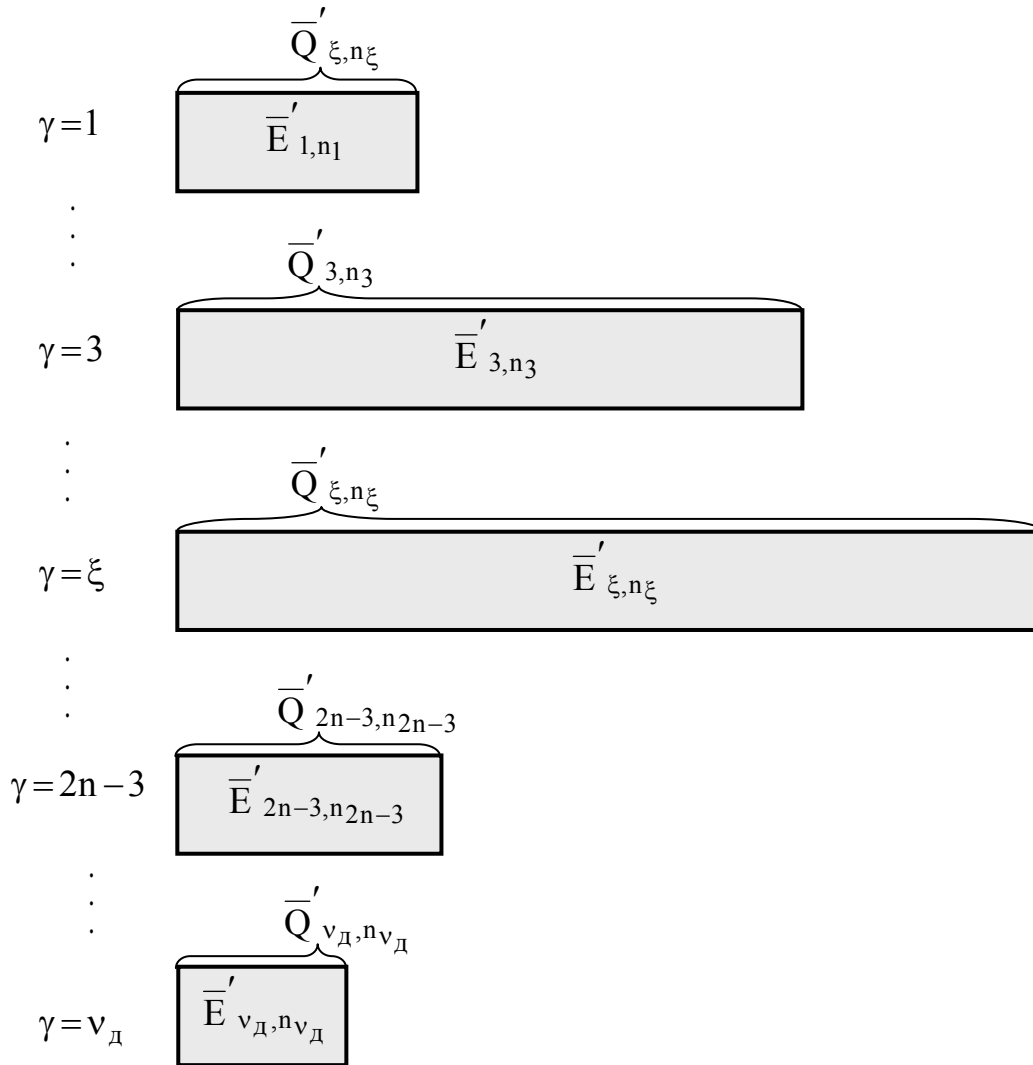


Рис. 3.4. Распределение количества разрядов по кодограммам диагоналей трансформанты

Отсюда суммарное количество  $\bar{Q}'_{n \times n}$  разрядов на представление всей трансформанты оценивается путем суммирования количества  $\bar{Q}'_{\xi, n_\xi}$  разрядов на кодовое представление ее диагоналей, рассматриваемых как диагональные неравномерные позиционные числа, т.е.

$$\bar{Q}'_{n \times n} = \sum_{\xi=1}^{2n-1} \bar{Q}'_{\xi, n\xi} = \sum_{\xi=1}^{2n-1} ([n_{\xi} \log_2 d'_{\xi}] + 1) \text{ (бит)}. \quad (3.30)$$

Экспериментальная оценка количества  $\bar{Q}'_{n \times n}$  разрядов на представление трансформанты в случае ее по-диагонального кодирования в неравновесном позиционном диагонально-неравномерном базисе оснований в зависимости от степени насыщенности соответствующих фрагментов базовых кадров и значения ПОСШ, представлена в виде диаграмм на рис. 3.5.

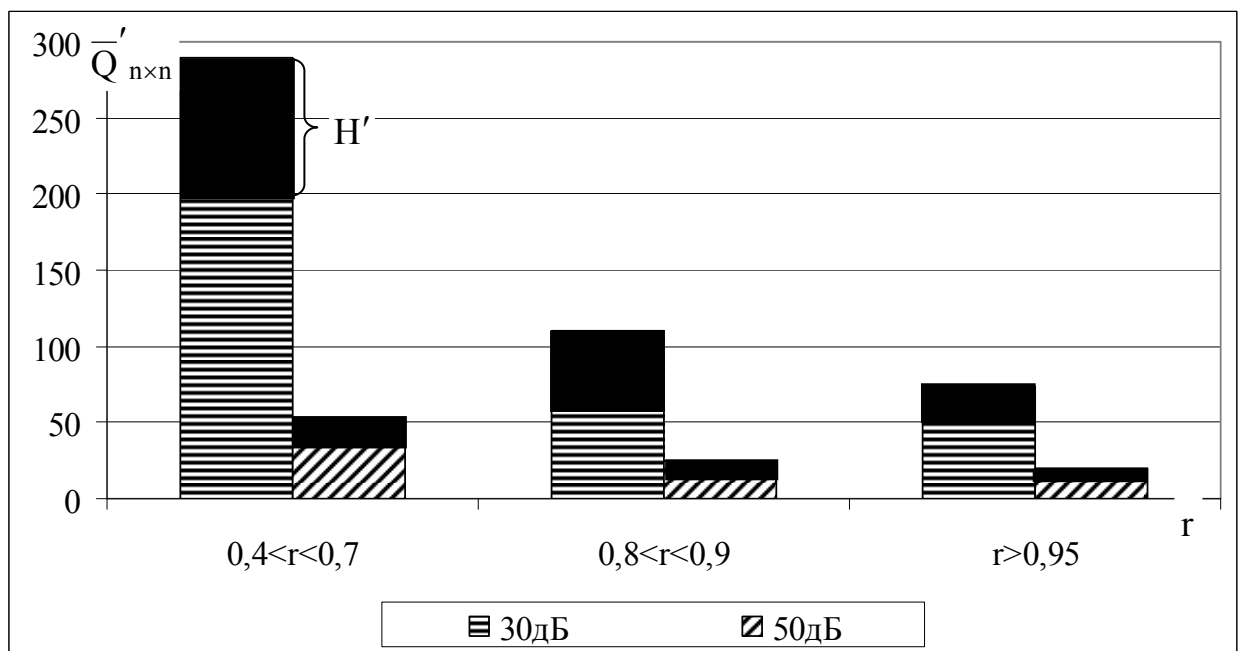


Рис. 3.5. Зависимость величины  $Q_{n \times n}$  от степени насыщенности базовых кадров и ПОСШ

По результату исследования диаграмм на рис. 3.5 вытекают следующие заключения:

- в зависимости от степени насыщенности фрагментов базовых кадров количество бит на представление трансформант снижается до уровня 50 – 190 бит/трансформанта для ПОСШ не ниже 45 дБ, и до уровня 17 – 35 бит/трансформанта при ПОСШ не выше 30 дБ;



- дополнительное сокращение количества разрядов на представление трансформанты за счет использования неравномерного кодообразования для кода ДНП числа относительно неравновесного позиционного кодирования в строчно-столбцовом базисе оснований составляет от 15 до 30 % в зависимости от степени насыщенности и значения ПОСШ.

Такой выигрыш обусловлен следующими причинами:

1) существует тенденция уменьшения значений компонент от диагонали к диагонали;

2) по диагоналям будет больше возможности наблюдать нулевые цепочки, вплоть до длины равной длине самой диагонали, т.е. будем получать нулевую диагональ с динамическим диапазоном равным 1. Причем вероятность появления таких диагоналей увеличивается в нижней половине трансформанты;

3) внутри диагонали будет наблюдаться тенденция монотонности снижения значений компонент по зигзагу;

4) для предложенного подхода требуется на одно основание меньше, чем для строчно-столбцового метода формирования базиса оснований.

Следовательно, направление, основанное на неравномерном диагональном позиционном кодировании трансформант с диагонально-неравномерным принципом кодообразования кодовых конструкций обеспечивает дополнительное снижение интенсивности базовых кадров.

Для дальнейшего снижения количества разрядов предлагается учитывать структурную специфику диагонального формата трансформанты, а именно наличие одноэлементных диагоналей. Для трансформант ДКП такая специфика учитывается следующим образом:

1. Диагональ  $\bar{Y}^{(1)} = \{y_{1,1}\}$ , состоящая из одного элемента несет информацию о низкочастотной компоненте трансформанты. Данный элемент имеет резко отличные характеристики относительно других компонент трансформант. В существующих рекомендациях согласно стандарта обработки видеопотока низкочастотные DC-компоненты обрабатываются отдельно. Для такой обработки учитывается незначительное отличие значений DC-компонент для соседних

трансформант. В связи с чем, первую диагональ предлагается исключить из базиса оснований НДП чисел.

2. Диагональ  $\bar{Y}^{(2n-1)} = \{y_{n,2n-1}\}$  содержит в себе высокочастотную компоненту  $y_{n,n}$ . Данная компонента соответствует базису ДКП с наибольшим количеством гармоник. Поэтому для достаточно широкого класса изображений значение компоненты  $y_{n,n}$  будет равно нулевому значению, т.е.  $y_{n,n} = 0$ . Поэтому предлагается данную диагональ исключить из процесса обработки.

В результате количество  $v_d$  диагоналей, участвующих в формировании диагональных неравномерных позиционных чисел будет равно  $v_d = 2n - 3$ .

Например, для  $n=8$  количество оснований будет сокращено, и вместо 15 оснований будет 13 оснований.

Тогда суммарное количество  $\bar{Q}'_{(n \times n)-2}$  разрядов на представление всех кодовых значений диагональных неравномерных позиционных чисел будет определяться на основе соотношения

$$\bar{Q}_{(n \times n)-2} = \sum_{\xi=2}^{2n-2} \bar{Q}_{\xi, n\xi} = \sum_{\xi=2}^{2n-2} ([n_{\xi} \log_2 d'_{\xi}] + 1) \text{ (бит)}. \quad (3.31)$$

Таким образом, можно сделать следующие заключения.

1) разработан метод формирования базиса оснований для трансформанты ДКП по неравномерно-диагональному принципу. В этом случае трансформанта рассматривается как комбинаторный объект в неравновесном позиционном неравномерно-диагональном пространстве;

2) созданы модель и метод представления трансформанты на основе неравномерно-диагонального позиционного кодирования с неравномерным кодированием кодограмм. В результате чего обоснован потенциал для дополнительного снижения интенсивности базовых кадров относительно позиционного

кодирования в базисе оснований, сформированном по столбово-строчной схеме.

### **3.3. Построение метода реконструкции трансформант в диагонально-неравномерном базисе оснований на основе декодирования неравномерных кодограмм**

В процессе рассжатия базовых кадров необходимо учитывать требования относительно их формирования с заданным уровнем коррекционных преобразований. Это обеспечивает контролируемость искажений при реконструкции кадров Р-типа и В-типа. Для этого метод восстановления базовых кадров должен обладать следующими возможностями учитывать технологические особенности процесса снижения интенсивности битового потока по базовому кадру, а именно [10; 11; 13; 14; 68; 70; 96]:

1) трансформирование фрагментов изображений на основе двумерного дискретного косинусного преобразования. Здесь необходимо учесть, что:

- базовый кадр представляется в виде блочной структуры. Формирование частотных составляющих организуется для фрагментов видеоданных, размером  $n \times n$ ;

- осуществляется коррекционная квантизация компонент ДКП;

- формируются два массива: целочисленный массив  $Y$  абсолютных значений компонент ДКП и двоичный массив  $Z$  знаков компонент ДКП;

- исключается этап выделения цепочек нулевых элементов и формирования двухкомпонентных кортежей.

2) определение кодовых значений для диагоналей трансформант в неравномерном неравновесном позиционном базисе;

3) построение кодограмм неравномерной длины, содержащих значение кода диагонально-неравномерных позиционных чисел.

В связи с этим предлагается организовывать процесс восстановления базовых кадров на основе [10; 11; 13; 14; 68; 70; 96]:

1) безпогрешностного восстановления массивов служебных данных: базиса  $D'$  оснований ДНП чисел и матриц  $Z$  знаков;

2) декомпозиции неравномерных кодовых конструкций компрессионного представления диагоналей трансформанты;

3) выполнения взаимобратных преобразований на основе известной служебной информации, включающих в себя:

- статистическое декодирование низкочастотной ДС-компоненты;
- диагонально-неравномерное позиционное декодирование для переменного количества элементов диагоналей трансформанты;
- обратное двумерное дискретное косинусное преобразование с коррекцией компонент трансформант размерностью  $n \times n$ .

Рассмотрим особенности каждого этапа.

Восстановление служебных данных. В соответствии с особенностями процесса обработки базовых кадров служебными данными являются:

1) базис  $D'$  оснований, который задает неравновесное диагонально-неравномерное позиционное пространство трансформанты. Информация о значениях оснований  $d'_\xi$  диагоналей трансформант используются на таких этапах процесса восстановления как:

- разметка кодового потока базового кадра на кодовые конструкции трансформант с последующей их разметкой на кодовые конструкции отдельных диагоналей (рис. 3.6);

- формирование неравномерных диагоналей трансформант на основе диагонально-неравномерного позиционного декодирования;

2) матрицы  $Z$  знаков компонент трансформанты ДКП. Данная информация необходима для определения знака компоненты трансформанты, т.е. получения такого представления трансформант  $Y'$ , для которого выполняется обратное ДКП. Матрицы знаков входят в состав компактного представления в виде кодограмм, сформированных для одномерных

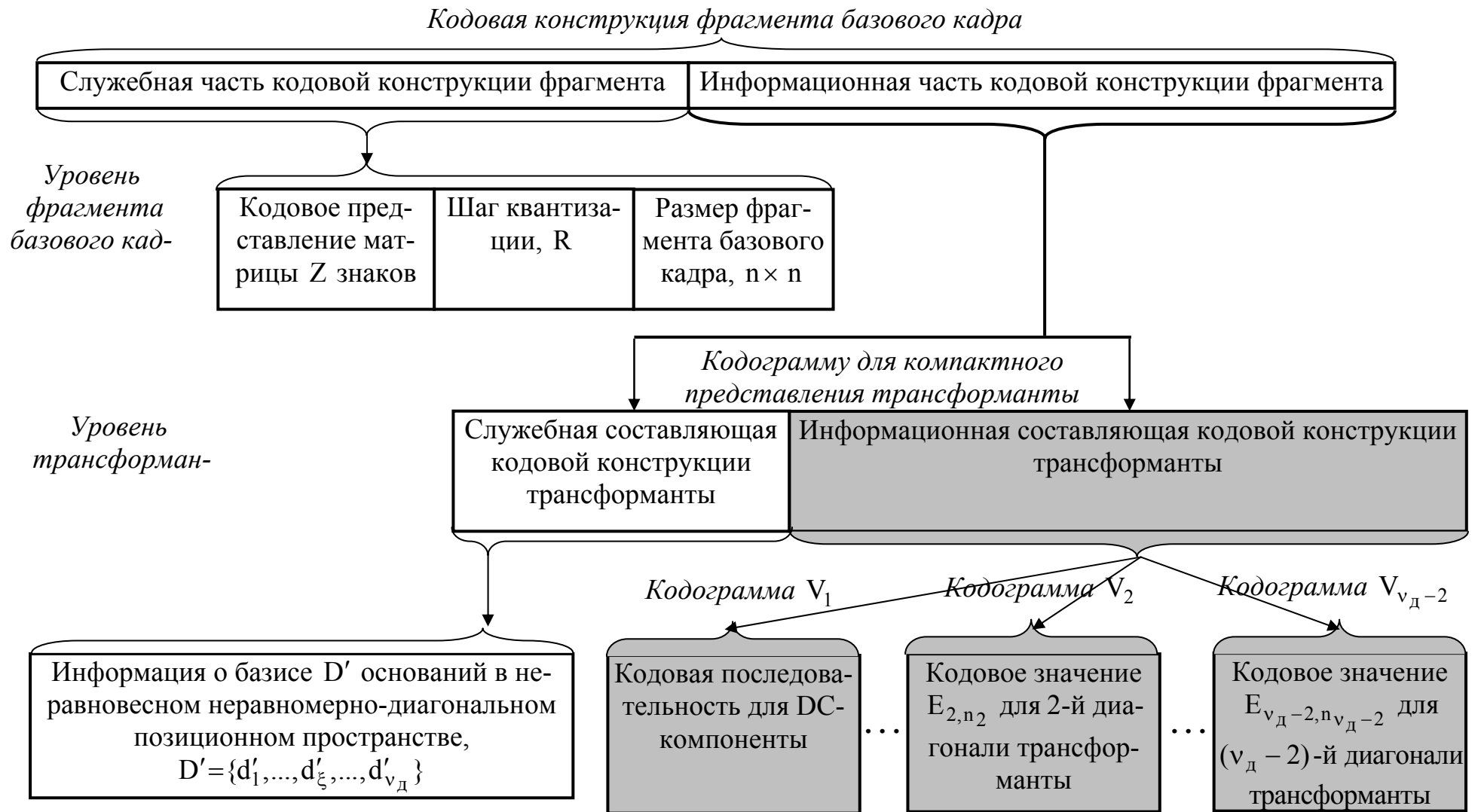


Рис. 3.6. Структурно-функциональная схема процесса восстановления фрагмента базового кадра

структурных чисел.

Реконструкция кодограмм, содержащих кодовые значения ДНП чисел (рис. 3.6). Для этого требуется выполнить такие этапы:

1) вначале провести декомпозицию служебной и информационной частей кодовой конструкции сжатого представления текущего фрагмента базового кадра;

2) после чего провести декомпозицию информационной части кодовой конструкции путем разметки фиксированного числа кодограмм компактного представления диагоналей трансформанты.

Реализация первого этапа заключается в определении длины служебной части кодовой конструкции фрагмента базового кадра. Здесь учитываются такие особенности построения кодовых слов служебной части (рис. 3.6):

- количество разрядов на представление информации о линейном размере  $n$  фрагмента базового кадра;

- кодовое представление для матрицы знаков, формируется как для двоичной последовательности фиксированной длины. Это позволяет установить длину кодового слова матрицы знаков;

- количество разрядов на представление значения шага квантизации  $R$  является постоянной величиной.

Выделение количества разрядов на представление служебной части позволяет установить начальную позицию информационной части кодовой конструкции фрагмента базового кадра.

Информационная часть кодовой конструкции фрагмента базового кадра представляет собой кодограмму для компактного представления трансформанты. Такая кодограмма содержит служебную и информационную части. Поэтому процесс декомпозиции информационной части подразумевает разметку соответствующей части кодовой конструкции на служебную и информационные составляющие (рис. 3.6).

Служебная часть кодограммы формируется на базе кодовых полей, содержащих информацию о базисе  $D'$  оснований в неравновесном неравномерно-

диагональном позиционном пространстве (рис. 3.6) [77; 94]. Количество оснований постоянно и зависит от размера трансформанты следующим образом:  $v_d - 2 = 2n - 3$ . Это позволяет формировать на их представление кодовые слова равномерной длины.

Информационная часть кодовой конструкции трансформанты включает в себя следующие составляющие:

1) кодовое слово  $V_1$  на сжатое представление DC-компоненты. Его длина определяется на базе использования статических таблиц, которые известны как на передающей, так и на приемной сторонах;

2) неравномерные по длине кодограммы  $V_\xi$ , несущие информацию о кодовых значениях  $\bar{E}'_{\xi, n_\xi}$  диагонально-неравномерных позиционных чисел. Количество  $v_k$  таких кодограмм фиксировано и определяется как  $v_k = v_d - 2 = 2n - 3$ .

Рассмотрим процесс выделения кодограмм ДНП чисел. Данный процесс реализуется на основе информации о базисе оснований с использованием следующих этапов [10; 11; 13; 14; 68; 70; 96]:

а) вычисление накопленного произведения  $d_\xi^{n_\xi}$  оснований для текущей  $\xi$ -й диагонали трансформанты. Количество  $n_\xi$  элементов в диагонали определяется на основе соотношений (3.1) и (3.2), т.е.

$$n_\xi = \begin{cases} \xi, & \rightarrow \xi \leq n; \\ n_\xi = 2n - \xi, & \rightarrow \xi \geq n + 1; \end{cases} \quad (3.32)$$

б) нахождение количества  $\bar{Q}'_{\xi, n_\xi}$  разрядов на представление кодового значения  $\bar{E}'_{\xi, n_\xi}$  для  $\xi$ -го ДНП числа, т.е. для  $\xi$ -й диагонали трансформанты. Для чего используется соотношение:

$$\overline{Q'}_{\xi, n\xi} = [\log_2(d'_\xi{}^{n\xi} - 1)] + 1 \text{ (бит)}.$$

Данное выражение позволяет определить количество  $\overline{Q'}_{\xi, n\xi}$  разрядов на представление кодограмм для всех диагоналей трансформанты, где  $\xi = \overline{1, v_d - 2} = \overline{1, 2n - 3}$ .

После чего организуется переход на третий этап процесса реконструкции базового кадра, связанного с декодированием кодовых значений  $\overline{E'}_{\xi, n\xi}$  (рис. 3.7). Для этого вначале по известному порядковому номеру  $\xi$  диагонали трансформанты осуществляется определение количества  $n_\xi$ , содержащихся в ней элементов. Здесь используется соотношение (3.32). Далее на втором этапе организуется восстановление значений элементов диагоналей, начиная с ее начальных элементов. Данный этап организуется с использованием выделенного в кодограмме  $V_\xi$  кодового значения  $\overline{E'}_{\xi, n\xi}$  на основе соотношения для получения элементов диагонально-неравномерных позиционных чисел, а именно:

1) для случая, когда для номера диагонали выполняется условие  $\xi \leq n$ , то  $n_\xi = \xi$ , и:

$$y_{1+\tau, \xi-\tau} = \left[ \frac{\overline{E'}_{\xi, \xi}}{d'_\xi{}^{\xi-\tau-1}} \right] - \left[ \frac{\overline{E'}_{\xi, \xi}}{d'_\xi \cdot d'_\xi{}^{\xi-\tau-1}} \right] d'_\xi, \quad \tau = \overline{0, \xi-1}, \quad \xi \leq n, \quad (3.33)$$

2) для случая, когда для номера диагонали выполняется неравенство  $\xi \geq n+1$ , то  $n_\xi = 2n - \xi$ . Тогда значение кода  $\overline{E'}_{\xi, 2n-\xi}$  определяется как:

$$y_{\xi-n+1+\tau, n-\tau} = \left[ \frac{\overline{E'}_{\xi, 2n-\xi}}{d'_\xi{}^{2n-\xi-\tau}} \right] - \left[ \frac{\overline{E'}_{\xi, 2n-\xi}}{d'_\xi \cdot d'_\xi{}^{2n-\xi-\tau}} \right] d'_\xi, \quad \tau = \overline{0, 2n-\xi}, \quad \xi \geq n+1. \quad (3.34)$$

В обобщенной записи данные соотношения будут иметь следующий вид:



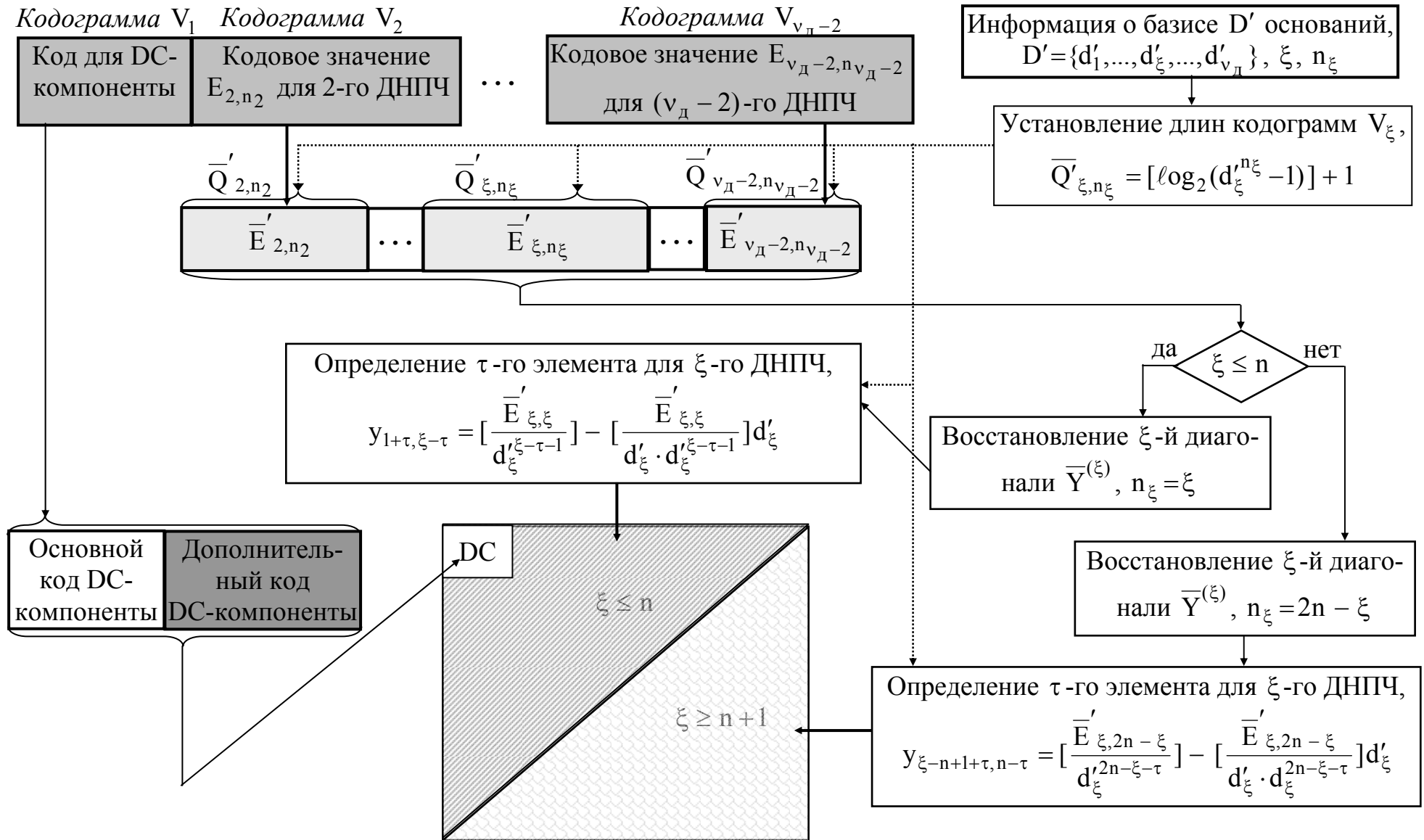


Рис. 3.7. Структурно-функциональная схема процессе реконструкции трансформанты на основе диагонально-неравномерного позиционного декодирования

$$Y_{1+\tau+\eta(\xi-n), \xi-\tau-\eta(\xi-n)} = \begin{cases} \left[ \frac{\bar{E}'_{\xi, \xi}}{d'_{\xi}{}^{\xi-\tau-1}} \right] - \left[ \frac{\bar{E}'_{\xi, \xi}}{d'_{\xi} \cdot d'_{\xi}{}^{\xi-\tau-1}} \right] d'_{\xi}, & \rightarrow \eta=0 \text{ \& } \xi \leq n; \\ \left[ \frac{\bar{E}'_{\xi, 2n-\xi}}{d'_{\xi}{}^{2n-\xi-\tau}} \right] - \left[ \frac{\bar{E}'_{\xi, 2n-\xi}}{d'_{\xi} \cdot d'_{\xi}{}^{2n-\xi-\tau}} \right] d'_{\xi}, & \rightarrow \eta=1 \text{ \& } \xi \geq n+1, \end{cases} \quad (3.35)$$

Если требуется использовать упрощенную схему алгоритмического процесса декодирования кодов ДНП чисел, то используется следующая формула:

$$Y_{1+\tau+(\xi-n)\text{sign}(1+\text{sign}(\xi-n-1)), \xi-\tau-(\xi-n)\text{sign}(1+\text{sign}(\xi-n-1))} = \left[ \frac{\bar{E}'_{\xi, n\xi}}{d'_{\xi}{}^{2n-\xi-\tau}} \right] - \left[ \frac{\bar{E}'_{\xi, n\xi}}{d'_{\xi} \cdot d'_{\xi}{}^{2n-\xi-\tau}} \right] d'_{\xi};$$

$$\text{sign}(\xi - n - 1) = \begin{cases} 1, & \rightarrow \xi > n + 1; \\ 0, & \rightarrow \xi = n + 1; \\ -1, & \rightarrow \xi \leq n, \end{cases}$$

или для  $\xi - n = \alpha$

$$Y_{1+\tau+\alpha\text{sign}(1+\text{sign}(\alpha-1)), \xi-\tau-\alpha\text{sign}(1+\text{sign}(\alpha-1))} = \left[ \frac{\bar{E}'_{\xi, n\xi}}{d'_{\xi}{}^{2n-\xi-\tau}} \right] - \left[ \frac{\bar{E}'_{\xi, n\xi}}{d'_{\xi} \cdot d'_{\xi}{}^{2n-\xi-\tau}} \right] d'_{\xi}; \quad (3.36)$$

$$\text{sign}(\alpha - 1) = \begin{cases} 1, & \rightarrow \alpha > 1; \\ 0, & \rightarrow \alpha = 1; \\ -1, & \rightarrow \alpha \leq 0, \end{cases}$$

где  $n$  - линейный размер трансформанты;

$n_{\xi}$  - длина для  $\xi$ -й диагонали трансформанты;

$d'_{\xi}{}^{n_{\xi}-\tau-1}$  - весовой коэффициент для  $\tau$ -го элемента  $\xi$ -го ДНП числа.

Данный этап заканчивается после декодирования кодового значения

$$\bar{E}'_{v_d-2, n_{v_d}-2}.$$

Последующие этапы процесса восстановления фрагмента базового кадра состоят в обратном трансформировании и воспроизведения фрагментов для исходной цветовой модели представления [10; 11; 13; 14; 68; 70; 96].

По изложенному материалу можно заключить следующее:

- создан метод. реконструкции базовых кадров на основе диагонально-неравномерного позиционного декодирования трансформант дискретного косинусного преобразования;

- разработана технология реконструкции кодограмм, содержащих кодовые значения ДНП чисел.

## Выводы

1. Разработан метод формирования *неравновесного позиционного неравномерно-диагонального базиса оснований* на основе выявления динамических диапазонов для отдельных неравномерных диагоналей в зависимости от их порядкового номера и направления зигзаг-обхода. Это позволяет учесть наличие тенденций относительно структурных характеристик трансформанты ДКП в *диагональном* направлении, а именно то, что: значения компонент уменьшаются при обходе диагонального зигзага в направлении слева – направо; для зигзагообразного обхода в диагональном направлении в области высокочастотных компонент наблюдается появление наиболее длинных цепочек компонент с нулевыми значениями.

2. Создана модель оценки информативности трансформанты с учетом того, что трансформанта ДКП, рассматривается по неравномерной диагональной структуре, и представляет собой комбинаторный объект, а именно перестановку с повторениями, на динамические диапазоны элементов которых наложены ограничения. Обосновано, что в условиях наличия тенденции в изменении свойств трансформанты в диагональном направлении для неравномерно-диагонального метода выявления динамических диапазонов обеспечивается по-

тенциал относительно дополнительного устранения структурной избыточности в изображениях.

3. Разработан метод сжатия трансформант на основе диагонально-неравномерного позиционного кодирования. Особенность метода заключается в том, что:

- позиционные числа строятся на базе неравномерных диагоналей трансформанты;

- основания элементов диагоналей определяются как значения динамических диапазонов на основе неравномерно-диагонального метода выявления;

- первая и последняя диагонали исключаются из базиса оснований НДП чисел и обрабатываются отдельно. Это обусловлено тем, что: первая диагональ содержит низкочастотную компоненту трансформанты, которая имеет резко отличные характеристики относительно других компонент трансформант; последняя диагональ для достаточно широкого класса изображений будет содержать компоненту с нулевым значением.

4. Построена обобщенная технология кодового представления диагоналей без учета априорной информации о ее длине и порядковом номере в трансформанте. В данном случае учитывается симметрия структурных свойств трансформанты относительно наибольшей диагонали. Это позволяет упростить алгоритмическую реализацию процесса кодирования.

5. Разработана технология кодообразования кодограммам на основе диагонально-неравномерного принципа выделения количества разрядов на основе информации о длине ДНП числа и его основании.

6. Экспериментальная оценка количества разрядов на представление трансформанты в случае ее по-диагонального кодирования в неравновесном позиционном диагонально-неравномерном базисе оснований в зависимости от степени насыщенности соответствующих фрагментов базовых кадров и значения ПОСШ, позволила сделать следующие заключения:

- в зависимости от степени насыщенности фрагментов базовых кадров количество бит на представление трансформант снижается до уровня 50 – 190

бит/трансформанта для ПОСШ не ниже 45 дБ, и до уровня 17 – 35 бит/трансформанта при ПОСШ не выше 30 дБ;

- дополнительное сокращение количества разрядов на представление трансформанты за счет использования неравномерного кодообразования для кода ДНП числа относительно неравновесного позиционного кодирования в строчно-столбцовом базисе оснований составляет от 15 до 30 % в зависимости от степени насыщенности и значения ПОСШ.

Такой выигрыш обусловлен следующими причинами: существует тенденция уменьшения значений компонент от диагонали к диагонали; по диагоналям будет больше возможности наблюдать нулевые цепочки, вплоть до длины равной длине самой диагонали, т.е. будем получать нулевую диагональ с динамическим диапазоном равным 1. Причем вероятность появления таких диагоналей увеличивается в нижней половине трансформанты; внутри диагонали будет наблюдаться тенденция монотонности снижения значений компонент по зигзагу; для предложенного подхода требуется на одно основание меньше, чем для строчно-столбцового метода формирования базиса оснований.

7. Сформулированы требования относительно реконструкции базовых кадров в условиях обеспечения заданного уровня коррекционных преобразований для контролируемости искажений при реконструкции кадров Р-типа и В-типа.

8. Разработан метод реконструкции базовых кадров на основе диагонально-неравномерного позиционного декодирования трансформант дискретного косинусного преобразования. Основными технологическими этапами являются:

1) безпогрешностное восстановление массивов служебных данных: базиса оснований ДНП чисел и матриц знаков;

2) декомпозиция неравномерных кодовых конструкций компрессионного представления диагоналей трансформанты;

3) выполнение взаимобратных преобразований на основе известной служебной информации, включающих в себя: статистическое декодирование низкочастотной ДС-компоненты; диагонально-неравномерное позиционное де-

кодирование для переменного количества элементов диагоналей трансформанты; обратное двумерное дискретное косинусное преобразование с коррекцией компонент трансформант.

9. Создана технология реконструкции кодограмм, содержащих кодовые значения ДНП чисел. Для этого выполняются такие этапы:

1) декомпозиция служебной и информационной частей кодовой конструкции сжатого представления текущего фрагмента базового кадра на основе разметки кодового потока базового кадра на кодовые конструкции трансформант с последующей их разметкой на кодовые конструкции отдельных диагоналей с использованием информации о значениях оснований диагоналей трансформант;

2) декомпозиция информационной части кодовой конструкции путем разметки фиксированного числа кодограмм компактного представления диагоналей трансформанты. Здесь учитывается то, что количество оснований постоянно и зависит от размера трансформанты. Данный процесс реализуется на основе информации о базисе оснований с использованием следующих этапов:

а) вычисление накопленного произведения оснований для текущей диагонали трансформанты;

б) нахождение количества разрядов на представление кодового значения для ДНП числа.

Здесь пункты научной новизны

1) впервые относительно метода формирования базиса оснований по неравномерно-диагональному принципу. Отличие в том, что основания для трансформанты выявляются для диагоналей по зигзагообразному обходу с учетом наличия высокочастотных составляющих спектра. Это позволяет дополнительно снизить количество структурной избыточности трансформированного представления фрагмента базовых кадров.

2) получило дальнейшее развитие модель для оценки информативности представления фрагмента изображений на основе трансформирования и выяв-

ления комбинаторной избыточности. Отличие состоит в том, что оценка количества информации осуществляется для трансформанты как комбинаторного объекта формируемого по неравномерной диагональной структуре. Это позволяет оценить нижнюю границу эффективности кодового представления трансформанты;

3) впервые разработан метод кодирования трансформант в неравновесном диагонально-неравномерном позиционном базисе оснований. Отличия состоят в том, что диагональ трансформанты рассматривается как неравномерно-диагональное позиционное число с неравномерным кодообразованием кодограмм. Это позволяет дополнительно снизить количество разрядов на представление фрагмента базового кадра.

#### Научная новизна

Впервые создана технология реконструкции кодограмм, содержащих кодовые значения ДНП чисел на основе декомпозиции служебной и информационной частей кодовой конструкции сжатого представления текущего фрагмента базового кадра. В отличие от других технологий проводится разметка кодового потока базового кадра на кодовые конструкции трансформант с последующей их разметкой на кодовые конструкции отдельных диагоналей с использованием информации о значениях оснований и фиксированного количества кодограмм. Это позволяет без потерь информации установить кодограммы по назначению, содержащейся в них информации.

Впервые построена обобщенная технология прямого и обратного кодовых преобразований диагоналей без учета априорной информации о ее длине и порядковом номере в трансформанте. В отличие от существующих подходов учитывается симметрия структурных свойств трансформанты относительно наибольшей диагонали, и формирование для нее диагонально-неравномерных позиционных чисел. Это позволяет упростить алгоритмические реализации процессов кодирования и декодирования.

Основные научные и практические результаты исследований данного раздела представлены в следующих трудах [10 – 13; 14; 17; 68; 70; 96].

## РАЗДЕЛ 4

### СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАЗРАБОТАННОГО И СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОТНОСИТЕЛЬНО ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПРЕССИОННОГО КОДИРОВАНИЯ ВИДЕОПОТОКА

Изложена разработка метода оценки интенсивности потока, приходящегося на базовый кадр, с учетом формирования кодовых конструкций сжатого представления трансформант на основе диагонально-неравномерного позиционного кодирования и статистического кодирования DC-компоненты.

Осуществляется создание метода оценки интенсивности на группу кадров и всего видеопотока с учетом: дифференцированного вклада типов кадров в интенсивность и качество визуального восприятия реконструированного видеопотока; компрессии базовых кадров на основе их трансформирования и последующего диагонально-неравномерного позиционного кодирования.

Организуется построение метода оценки алгоритмической сложности по количеству типовых операций для метода обработки базовых кадров на основе диагонально-неравномерного позиционного кодирования трансформант в неравновесном базисе оснований. Особенность созданной технологии с позиции алгоритмической реализации заключается в том, что диагонали имеют неравномерную длину, количество разрядов на кодограммы выбираются по диагонально-неравномерному принципу.



#### 4.1. Оценка интенсивности потока в расчете на базовый кадр

Проведем оценку интенсивности  $I_I$  для компактно-представленного кадров I-типа с использованием разработанного метода. Структура кодовой конструкции сжатого представления фрагмента базового кадра для разработанного метода приведена на рис. 4.1. Оценим интенсивность  $I_I^{(n \times n)}$  потока в расчете на фрагмент базового кадра как количество  $\bar{Q}_I^{(n \times n)}$  разрядов на его компактное представление, т.е. [11 – 14; 16; 17; 68; 70; 71; 96]:

$$I_I^{(n \times n)} = \bar{Q}_I^{(n \times n)} \text{ (бит/фрагмент).}$$

В свою очередь, согласно рис. 4.1, длина  $\bar{Q}_I^{(n \times n)}$  кодовой конструкции сжатого представления фрагмента определяется по формуле

$$\bar{Q}_I^{(n \times n)} = \bar{Q}_n + \bar{Q}_Z + \bar{Q}_R, \quad (4.1)$$

где  $\bar{Q}_n$  - количество разрядов на представление кодограммы компрессионного описания трансформанты;

$\bar{Q}_Z$  - компактное представление двоичной матрицы знаков;

$\bar{Q}_R$  - количество бит на представление шага  $R$  квантизации.

Соответственно величина  $\bar{Q}_n$  определяется как суммарное количество разрядов, задаваемое следующей формулой [11 – 14; 16; 17; 68; 70; 71; 96]:

$$\bar{Q}_n = \bar{Q}_{DC} + \bar{Q}_{(n \times n)-2} + \bar{Q}_{v_d} \text{ (бит),} \quad (4.2)$$

где  $\bar{Q}_{DC}$  - длина статистического кода низкочастотной DC-компоненты;

$\bar{Q}_{(n \times n)-2}$  - количество разрядов на представление трансформанты путем диагонально-неравномерного позиционного кодирования без учета первой и последней диагоналей;

$\bar{Q}_{v_d}$  - количество разрядов на представление последней диагонали трансформанты. Чаще всего данное количество разрядов не учитывается.

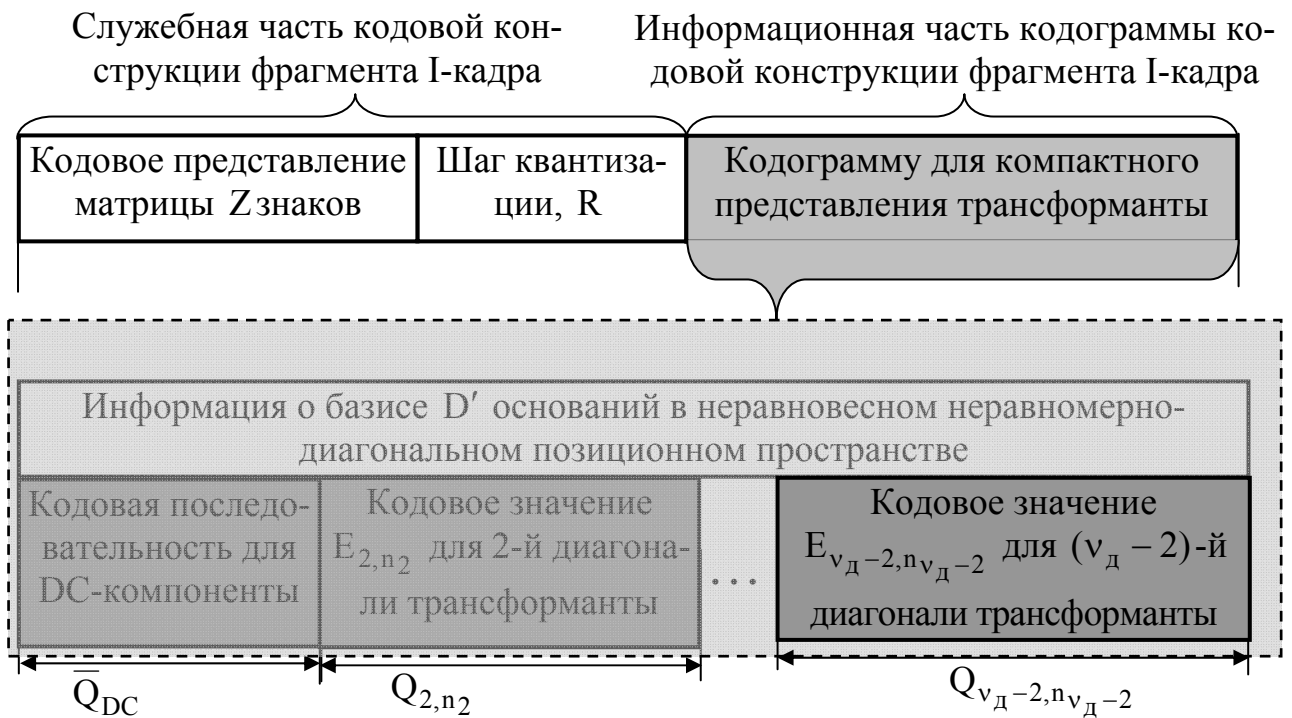


Рис. 4.1. Структура кодовой конструкции сжатого представления фрагмента базового кадра

Соответственно суммарное количество  $\bar{Q}'_{(n \times n)-2}$  разрядов на представление всех кодовых значений диагональных неравномерных позиционных чисел будет определяться на основе соотношения [11 – 14; 16; 17; 68; 70; 71; 96]:

$$\bar{Q}_{(n \times n)-2} = \sum_{\xi=2}^{2n-2} \bar{Q}_{\xi, n_{\xi}} = \sum_{\xi=2}^{2n-2} ([n_{\xi} \log_2 d'_{\xi}] + 1) \text{ (бит)}. \quad (4.3)$$

Свернув выражения (4.1) – (4.3) в одно, получим соотношение для величины  $I_1^{(n \times n)}$ , а именно [11 – 14; 16; 17; 68; 70; 71; 96]:

$$I_1^{(n \times n)} = \bar{Q}_{DC} + \sum_{\xi=2}^{2n-2} ([n_{\xi} \log_2 d'_{\xi}] + 1) + \bar{Q}_{v_d} + \bar{Q}_Z + \bar{Q}_R. \quad (\text{бит/фрагмент}) \quad (4.4)$$

На основе данного выражения интенсивность  $I_1$  потока, приходящегося на один базовый кадр, будет формироваться как сумма интенсивностей его фрагментов, т.е.

$$I_1 = \sum_{i=1}^{MN/nn} I_{1,i}^{(n \times n)}, \quad (4.5)$$

Здесь  $I_{1,i}^{(n \times n)}$  - интенсивность  $i$ -го фрагмента базового кадра;  $MN/nn$  - количество фрагментов размером  $(n \times n)$  в базовом кадре;  $MN$  - размер базового кадра.

Как видно из анализа полученных соотношений величина  $I_1$  в значимой степени зависит от количества  $\bar{Q}'_{(n \times n)-2}$  разрядов на представление всех кодовых значений диагоналей трансформанты. В свою очередь величина  $\bar{Q}'_{(n \times n)-2}$  определяется коэффициентом сжатия  $k'_c$  трансформанты на основе диагонально-неравномерного позиционного кодирования. Оценка степени сжатия  $k'_c$  без учета затрат количества разрядов на матрицу знаков и шаг квантизации находится с помощью выражения

$$k'_c = bn^2 / \bar{Q}_n = bn^2 / (\bar{Q}_{DC} + \bar{Q}'_{(n \times n)-2} + \bar{Q}_{v_d}),$$

и рассматривается в виде диаграмм на рис. 4.2.

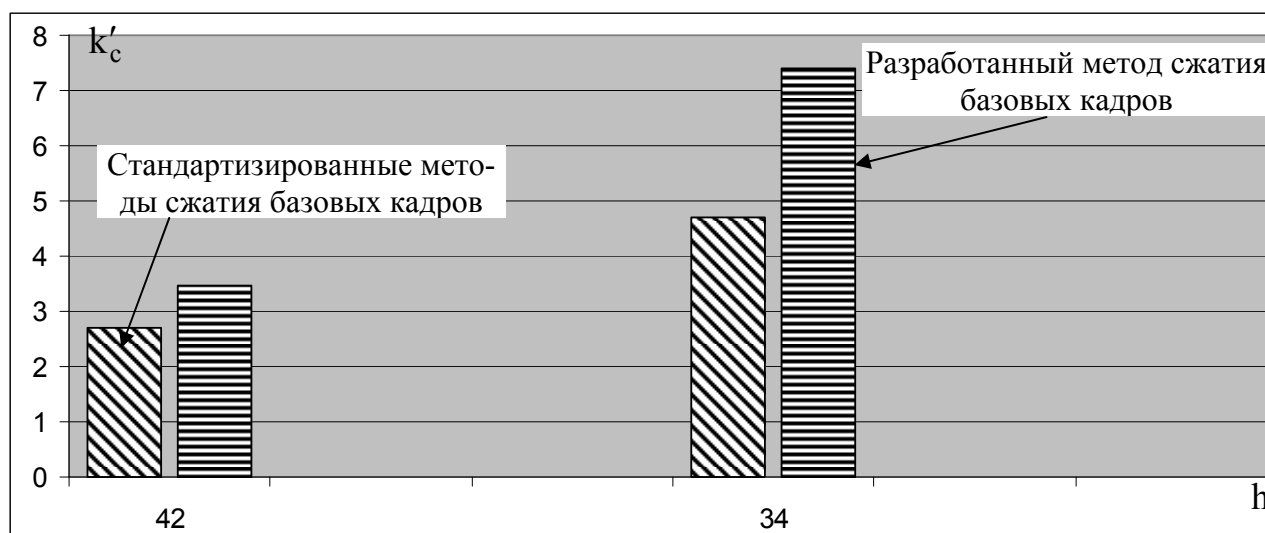


Рис. 4.2. Значение  $k'_c$  для различных типов кодеков базовых кадров при средней насыщенности их деталями в зависимости от  $h$

Анализа диаграмм на рис. 4.2 показывает, что степень сжатия кадров I-типа для разработанного метода на основе диагонально-неравномерного позиционного кодирования (ДНПК) превышает степень сжатия для стандартизованных технологий (JPEG-технология), а именно для ПОСШ на уровне 42 дБ на 22 %, а для ПОСШ 34 дБ – на 37%. При этом степень сжатия для созданного метода будет соответственно принимать следующие значения: для ПОСШ 42 дБ – 3,5 раз, для ПОСШ 34 дБ – 7,4 раз (Приложение А).

Соответствующая оценка интенсивности  $I_1$  в расчете на базовый кадр с учетом дополнительных затрат количество бит на представление служебной информации (код матрицы знаков  $\bar{Q}_Z$ , код значения  $\bar{Q}_R$  шага квантизации) для стандартизированной и разработанной технологий кодирования в зависимости от ПОСШ  $h$  и степени насыщенности изображения приводится в табл. 4.1 и в виде диаграмм на рис. 4.3. Усредненная экспериментальная оценка интенсивности, приходящейся на базовый кадр проводилась в расчете на то, что в качестве структуры кадра выбирался формат 4CIF (720x576).

Анализ диаграмм на рис. 4.3 показывает, что:

1) интенсивность потока, приходящаяся на средненасыщенный базовый кадр формата 4CIF (720x576), для разработанного метода кодирования изменя-

ется в диапазоне от 0,64 до 1,53 Мбит/кадр в зависимости от ПОСШ от 38 до 42 дБ;

Таблица 4.1.

Значения  $I_I$  от  $h$  для базового кадра на основе разработанного метода, М бит

Типа кадра	I-кадр		
$h$ дБ	38	40	42
$I_I$	0,64	1,16	1,53
%	20 %	17 %	15 %

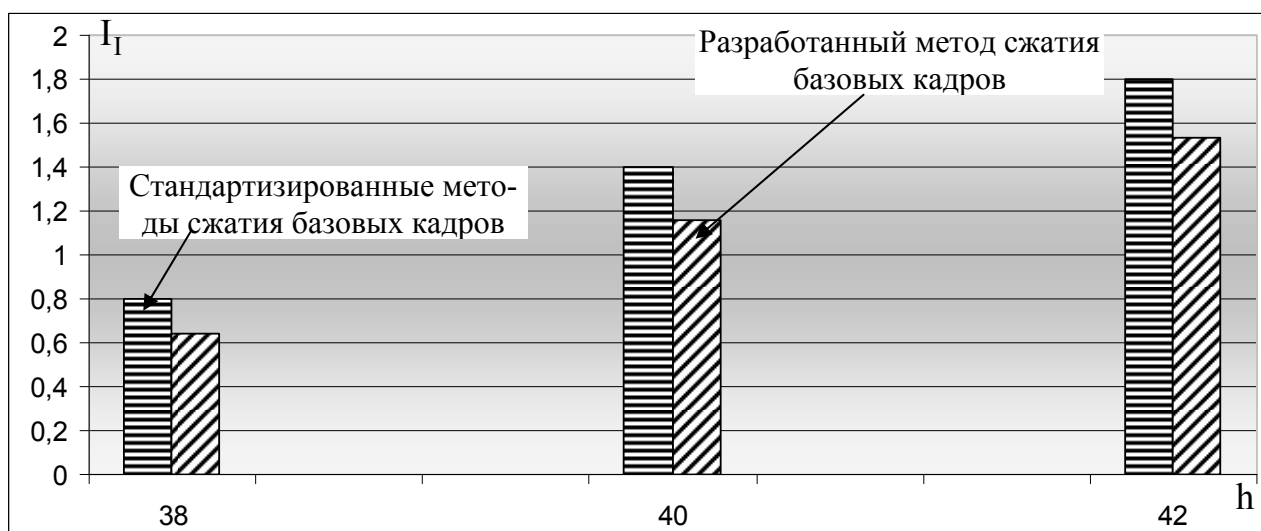


Рис. 4.3. Значения  $I_I$  от  $h$  для базового кадра на основе разработанной и стандартизированной технологии

2) в случае обработки базового кадра на основе разработанного метода ДНПК его интенсивность снижается относительно случая обработки стандартизированной технологией в среднем от 15 % до 20 % в зависимости от ПОСШ. Здесь наибольший выигрыш достигается при снижении уровня ПОСШ с 42 дБ до 38 дБ (Приложение А). Это объясняется тем, что увеличивается количество диагоналей содержащих цепочки нулевых компонент трансформант. Отсюда значение динамического диапазона будет равно единице. В свою очередь не будет увеличиваться весовая составляющая соответствующих элементов диа-

гонально-неравномерных позиционных чисел в процессе их кодирования. Соответственно снижаются затраты на информационную и служебную части кодовой конструкции фрагмента базового кадра.

Значит, по изложенному можно заключить, что [11 – 14; 16; 17; 70; 71]:

а) разработан метод оценки интенсивности потока, приходящегося на базовый кадр, с учетом формирования кодовых конструкций сжатого представления трансформант на основе диагонально-неравномерного позиционного кодирования и статистического кодирования DC-компоненты;

б) проведенные экспериментальные оценки показали следующее:

- степень сжатия кадров I-типа для разработанного метода на основе диагонально-неравномерного позиционного кодирования (ДНПК) превышает степень сжатия для стандартизированных технологий (JPEG-технология), а именно для ПОСШ на уровне 42 дБ на 22 %, а для ПОСШ 38 дБ – на 37%;

- в случае обработки базового кадра на основе разработанного метода ДНПК его интенсивность снижается относительно случая обработки стандартизированной технологией в среднем от 15 % до 20 % в зависимости от ПОСШ.

#### **4.2. Оценка интенсивности видеопотока на группу кадров на основе стандартизированных и разработанной технологий компрессии трансформант**

Рассмотрим оценку интенсивности  $I(\text{GOP})'_k$  компрессированного видеопотока, приходящуюся на группу кадров, с использованием разработанной технологии диагонально-неравномерного позиционного кодирования. Здесь принимается в расчет, что группа кадров состоит из 8 кадров, и включает в себя один кадр I-типа, два кадра P-типа и пять кадров B-типа. Обработка кадров проводится в соответствии с режимом реального времени. В этом случае не учитывается компенсация движения между кадрами в потоке, и допускается

что степень сжатия для кадров конкретного типа будет отличаться не менее, чем на 5%. Тогда с учетом выражения для интенсивности базового кадра, получим следующее соотношение для оценки интенсивности  $I(\text{GOP})'_k$  [11; 14; 16]:

$$I(\text{GOP})_k = I_I + 2I_P + 5I_B = \sum_{i=1}^{MN/nn} I_{I,i}^{(n \times n)} + 2I_P + 5I_B =$$

$$= \sum_{i=1}^{MN/nn} (\bar{Q}_{DC} + \sum_{\xi=2}^{2n-2} ([n_{\xi} \log_2 d'_{\xi}] + 1) + \bar{Q}_{v_d} + \bar{Q}_Z + \bar{Q}_R)_i + 2I_P + 5I_B, \quad (4.6)$$

где  $I_I$ ,  $I_P$ ,  $I_B$  - значения интенсивностей для компактно-представленных кадров соответственно I-типа, P-типа и B типа.

Здесь величина  $I(\text{GOP})'_k$  оценивается как количество бит, передаваемое за время  $t_{\text{GOP}}$ , равное  $t_{\text{GOP}} = 8/v_t$  (сек)., где  $v_t$  - количество кадров, которое передается за 1 сек.

Каждый тип кадров обрабатывается с использованием методов на JPEG совместимой платформе. При этом учитывается иерархия относительно зависимости порядка реконструкции кадров в группе. В результате устанавливается неравнозначное влияние кадров различных типов на качество реконструкции всех кадров в GOP.

Оценка интенсивностей  $I(\text{GOP})'_k$  и  $I'_k^{(24)}$ , приходящихся соответственно на группу кадров за время  $t_{\text{GOP}}$  и на  $v_t$  кадров за 1 сек рассматривается в табл. 4.2 и на диаграммах рис. 4.4. Здесь  $v_t = 24$  кадрам. Расчеты проводятся по формуле (4.6). В последней строке табл. 4.2 приводятся расчеты величины  $\Delta I(\text{GOP})'_k$ , оцениваемой в процентах как уровень снижения интенсивности потока группы кадров за счет уменьшения интенсивности базового кадра. Получение диаграмм на рис. 4.4 осуществлялось для трех режимов обработки кадров с учетом обеспечения следующих уровней ПОСШ [11 – 14; 16; 17; 68; 70; 71]:

- режим 1, высокое качество базового кадра: I-кадр – 42 дБ, P-кадр – 28 дБ, В-кадр – 22 дБ (Приложение А);

- режим 2, хорошее качество базового кадра: I-кадр – 40 дБ, P-кадр – 28 дБ, В-кадр – 22 дБ (Приложение А);

- режим 2, достаточное качество базового кадра: I-кадр – 38 дБ, P-кадр – 28 дБ, В-кадр – 22 дБ (Приложение А).

Таблица 4.2.

Зависимость интенсивностей  $I(\text{GOP})'_k$  и  $I_k^{(24)}$  от ПОСШ, М бит/с

Тип кадра	h дБ					
	42	40	40	40	38	38
I-кадр	42	40	40	40	38	38
P-кадр	28	28	30	32	28	30
B-кадр	22	22	24	24	22	24
$I(\text{GOP})'_k$	2,13	1,76	2,01	2,17	1,24	1,49
$I_k^{(24)}$	6,3	5,2	6	6,4	3,7	4,3
$\Delta I(\text{GOP})'_k, \%$	-11,25	-12	-10,7	-9,6	-11,43	-9,7

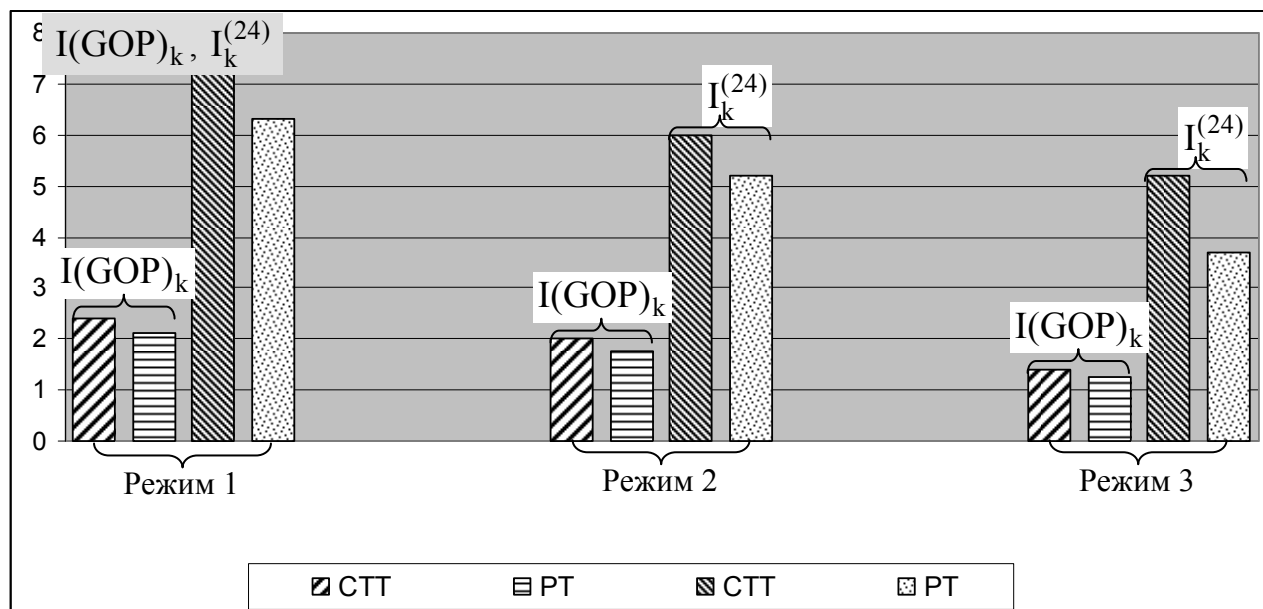


Рис. 4.4. Значения интенсивностей  $I(\text{GOP})'_k$  и  $I_k^{(24)}$  для стандартизированной (СТТ) и разработанной (РТ) технологии обработки базовых кадров в зависимости от режимов ПОСШ видеопотока



По результатам исследований данных в табл. 4.2 и диаграмм на рис. 4.4 можно сделать такие заключения:

1. Интенсивность потока кадров с учетом использования для сжатия базового кадра созданной технологии изменяется в пределах от 3,7 Мбит/с для режима достаточного визуального качества до 6,3 Мбит/с для режима хорошего качества.

2. За счет обработки базовых кадров на основе диагонально-неравномерного позиционного кодирования трансформант достигается снижение суммарной интенсивности видеопотока от 10 до 13 %. Наибольшее снижение интенсивности происходит в случае наиболее весомого вклада интенсивности базовых кадров в суммарную интенсивность. Такое наблюдается для режима высокого визуального качества реконструкции видеопотока.

3. Снижение интенсивности видеопотока обеспечивает:

- с одной стороны использование для его передачи беспроводных технологий с более низкой пропускной способностью, а именно на уровне 4 - 10 Мбит/с;

- с другой стороны допускается повышение качества визуальной оценки видеопотока за счет использования соответствующих матриц коррекции компонент трансформант. В первую очередь появляется возможность снизить искажения без повышения интенсивности видеопотока одновременно для Р-кадров с уровня 28дБ до уровня 32 дБ (табл. 4.2, второй и пятый столбцы), и для кадров В-типа с 22 дБ до 24 дБ.

По материалам исследований можно подытожить следующее:

1) разработан метод оценки интенсивности на группу кадров и всего видеопотока с учетом:

- дифференцированного вклада типов кадров в интенсивность и качество визуального восприятия реконструированного видеопотока;

- компрессии базовых кадров на основе их трансформирования и последующего диагонально-неравномерного позиционного кодирования;

2) достигается снижение дисбаланса между интенсивностью  $I_k$  и скорость передачи по сети  $U_n$  в среднем на 12 %. Это позволяет:

- с одной стороны использовать для передачи видеопотока ИКС технологий с более низкой пропускной способностью, а именно на уровне 4 - 10 Мбит/с;

- с другой стороны повысить качество визуальной оценки видеопотока за счет снижения искажений без повышения интенсивности видеопотока одновременно для Р-кадров с уровня 28дБ до уровня 32 дБ (табл. 4.2, второй и пятый столбцы), и для кадров В-типа с 22 дБ до 24 дБ.

### **4.3. Оценка задержки на обработку базовых кадров видеопотока**

Интенсивность видеопотока определяется не только количеством бит на сжатое представление потока кадров, но и временными задержками  $t$  на их обработку. Такие задержки входят в состав суммарного времени доставки видеопотока, и следовательно, влияют на основную характеристику эффективности функционирования инфокоммуникационных систем – оперативность доставки данных. Поскольку видеопоток представляет собой последовательность кадров различных типов, относительно обработки которых предъявляются различные требования, то временные задержки в потоке будут распределяться неравномерно. На обработку кадров Р-типа и В-типа требуется затратить меньшее количество операций, чем для кадров I-типа. Это обусловлено следующими причинами [11 – 16; 17; 68; 70; 71; 96]:

1) сокращением количества компонент цветоразностных цветовых составляющих в макроблоках;

2) увеличением количества отбрасываемых компонент трансформант, соответствующих высокочастотной составляющей спектра.

Наоборот, для базовых кадров существует необходимость обеспечения высокого качества реконструкции. Это требует проводить их обработку с сохранением максимальной информации. Поэтому время обработки будет распределено по кадрам видеопотока неравномерно.

Рассмотрим суммарную временную задержку  $t_{\text{GOP}}^{(r)}$  для группы кадров. Для стандартизированной технологии обработки время  $t_{\text{GOP}}^{(r)}$  оценивается как:

$$t_{\text{GOP}}^{(r)} = t_I + t_P + t_B,$$

где  $t_I, t_P, t_B$  - временные задержки на обработку соответственно кадров I-типа, P-типа и B-типа.

Величина  $t_{\text{GOP}}^{(r)}$  в случае использования для обработки базового кадра созданного метода на основе диагонально-неравномерного позиционного (ДНП) кодирования оценивается по формуле [15]:

$$t_{\text{GOP}}^{(r)} = t'_I + t_P + t_B,$$

где  $t'_I$  - временные задержки на обработку кадров I-типа на основе разработанного метода с использованием ДНП кодирования.

Соответственно для оценки временной составляющей  $t'_I$  необходимо оценить количество  $q'_I$  операций на обработку кадра I-типа.

Для разработанного метода первый этап связан с выполнением двумерного дискретного косинусного преобразования фрагмента базового кадра размером  $n \times n$  элементов. Это требует выполнения  $n^2 \log_2 n^2$  операций умножения и  $n^2 \log_2 n^2$  операций сложения.

Второй этап состоит в квантизации трансформанты ДКП. Здесь затрачивается  $n^2$  операций деления.

Последующие этапы связаны с проведением диагонально-неравномерного позиционного кодирования квантизированных трансформант.

Такой процесс обработки трансформанты раскладывается на следующие составляющие [11 – 16; 17; 68; 70; 71; 96]:

1. Построение неравновесного неравномерно-диагонального позиционного базиса  $D'$  оснований. На что требуется затратить  $(n^2 - 2)$  операций сравнения.

2. Формирование кодового значения  $\bar{E}'_{\xi, n_\xi}$  для диагоналей  $\bar{Y}^{(\xi)}$  трансформанты. Здесь на определение кодового значения  $\bar{E}'_{\xi, n_\xi}$  для  $\xi$ -й диагонали требуется выполнить следующее количество операций:

-  $(n_\xi - 1)$ -ую операцию умножения для определения весовых коэффициентов  $d'_\xi^{n_\xi - \tau - 1}$ ;

-  $(n_\xi - 1)$ -ую операцию сложения для вычисления слагаемых кодового выражения (3.27);

Всего на всю трансформанту необходимо будет затратить количество операций равное:  $\sum_{\xi=2}^{n^2-2} (n_\xi - 1) = n^2 - 2$  операций сложения и  $(n^2 - 2)$  операций умножения.

3. Образование кодограмм  $V_\xi$  для кодовых значений диагоналей требует дополнительного выполнения  $(2n - 3)$  операций умножения и  $(2n - 3)$  операций для определения количества разрядов кодограмм.

Суммарное количество операций по типам на выполнение диагонально-неравномерного позиционного кодирования трансформант представлено в табл. 4.3.

Последний этап обработки трансформанты связан с табличным кодированием низкочастотной ДС-компоненты. Построение статистического кодового

описания для DC компоненты связано с такими затратами количества типовых операций, а именно:

- вычисление значения разности, на что необходимо затратить одну операцию вычитания;

Таблица 4.3.

Количество типовых операций на ДНП кодирование трансформанты

Вид операции	Сравнения	Умножения/деления	Сложение/вычитание
Построение базиса оснований	$(n^2 - 2)$	-	-
Формирование кодовых значений для всех диагоналей трансформанты	-	$(n^2 - 2)$	$(n^2 - 2)$
Кодообразование	-	$(2n - 3)$	-
Всего	$(n^2 - 2)$	$(n^2 + 2n - 5)$	$(n^2 - 2)$

- на формирование основного кода, необходимо выполнить одну операцию сравнения, со стандартными кодами для низкочастотных компонент, хранящихся в специальных таблицах;

- на определение дополнительного кода, при условии отрицательного значения разности соседних DC-компонент, необходимо затратить одну операцию вычитания.

Отсюда суммарное количество типовых операций, которые необходимо затратить на статистическую обработку DC-компоненты, будет включать *две операции вычитания и одна операция сравнения*.

Суммарные количества типовых операций необходимые на обработку фрагмента базового кадра, приведены в табл. 4.4 [11 – 16; 17; 68; 70; 71; 96].

Количество  $q'_1$  операций с учетом их типов, которое необходимо затратить на обработку всего базового кадра на основе разработанного метода, представлено в табл. 4.5.

Здесь учитывается, что количество фрагментов для базового кадра, размером  $M \times N$  элементов будет равно  $(M \times N / n^2)$ .

Анализ данных в табл. 4.5 позволяет заключить следующее:

а) сложность алгоритмической реализации разработанного метода сжатия базовых кадров находится в линейной зависимости от размеров кадра,  $M \times N$ ;

Таблица 4.4.

Суммарное количество операций на обработку фрагмента базового кадра на основе ДНП кодирования трансформант

Вид операции	Сравнения	Умножения/деления	Сложение/вычитание
Выполнение двумерного ДКП		$n^2 \log_2 n^2$	$n^2 \log_2 n^2$
Коррекция компонент трансформант в соответствии со стратегией квантизации		$n^2$	
Диагонально-неравномерное позиционное кодирование в неравновесном базисе оснований	$(n^2 - 2)$	$(n^2 + 2n - 5)$	$(n^2 - 2)$
Кодирование DC-компоненты	1	2	
Всего	$n^2 - 1$	$n^2 \log_2 n^2 + 2n^2 + (2n - 3)$	$n^2 \log_2 n^2 + (n^2 - 2)$

Таблица 4.5.

Количество  $q_1'$  операций затрачиваемых для всего базового кадра с использованием разработанного метода

Вид операции	Сравнения	Произведения	Деления	Сложения/вычитания
Количество операций	$MN$	$MN \log_2 n^2 + MN + \frac{MN(2n - 3)}{n^2}$	$MN$	$MN \log_2 n^2 + MN$

б) основное количество операций, т.е. основная сложность алгоритмической реализации, приходится на выполнение двумерного косинусного преобразования. Так, для  $n=8$  удельные затраты количества операций на трансформирование достигают 80 %.

в) количество операций типа умножения/деления не превышают 50 % от общего количества операций на обработку;

д) количество операций для созданного метода на основе ДПН кодирования трансформант относительно технологии JPEG<sub>1</sub>, использующей статические таблицы кодов, будет меньше в среднем на 10 %.

Количество основных операций для сжатия изображения на основании существующих методов в форматах JPEG<sub>2</sub> и JPEG2000, приведено в табл. 4.6 и табл. 4.7 [28; 11 – 14; 70; 71; 77]. Для случая JPEG размер сегмента равен  $n^2$ .

Таблица 4.6.

Количество операций для метода JPEG2000

Вид операции	Сдвиг	Сложение/вычитания	Произведение	Деление
Смена цветовой модели	$M \times N$	$4M \times N$	$M \times N$	-
Вейвлет преобразование	$M \times N$	$4M \times N$	-	$M \times N$
Арифметическое кодирование	-	$12M \times N$	$6M \times N$	$12M \times N$
Всего	$M \times N$	$20M \times N$	$7M \times N$	$13M \times N$

Данные, представленные в табл. 4.5 – 4.7 позволяют сравнить сложность алгоритмической реализации по количеству типовых операций для разработанного метода кодирования базовых кадров относительно стандартизированных технологий на JPEG-платформе.

Таблица 4.7.

Количество операций для метода JPEG<sub>2</sub>

Метод сжатия	Количество операций сложения/вычитания	Тип операций	Количество операций произведения/деления	Тип операций
Блок $M \times N$	$2M \times N \log_2 n^2$	Вещественный	$2M \times N \log_2 n^2$	Вещественный
	$12M \times N$	Целочисленный	-	-
Всего	$2M \times N \log_2 n^2 + 12M \times N$	Смешанный	$2M \times N \log_2 n^2$	Вещественный

В случае обработки базовых кадров насыщенных деталями и сценами в режиме обеспечения высокого качества их реконструкции на основе созданного

метода с использованием ДНП кодирования трансформант выявлено, что относительно технологии JPEG<sub>2</sub>, обеспечивается сокращение:

- количества типовых операций произведения минимум на 53 %;
- количества типовых операций сложения/вычитания минимум на 75%;

При этом в отличии от стандартизированных JPEG технологий обработки базовых кадров для разработанного метода все выполняемые операции являются целочисленными. В этом случае временная задержка дополнительно будет сокращаться на 20 %.

В тоже время для стандартизированных технологий обработки базовых кадров, как показывают эксперименты, выполняются соотношения затрат количества операций на обработку для разных типов кадров, что показано в табл. 4.8.

Таблица 4.8.

Зависимость соотношения количества операций  $q_I$ ,  $q_P$ ,  $q_B$  от ПОСШ

Тип кадра	h дБ				
	I-кадр	42	40	40	40
P-кадр	28	28	30	32	28
B-кадр	22	22	24	24	22
$q_I : q_P$	1: 3	1: 2,5	1: 2	1: 2	1: 2
$q_I : q_B$	1: 5	1: 4	1: 3,5	1: 3,5	1: 4
$q'_I : q_P$	1: 1,5	1: 1,5	1: 1	1: 1	1: 1
$q'_I : q_B$	1: 2,5	1: 2,5	1: 1,7	1: 1,7	1: 2

В табл. 4.8 приняты такие обозначения:  $q_I : q_P = 1: 3$ ;  $q_I : q_B = 1: 5$  - означает, что количество операций, затрачиваемое на обработку базового кадра соотносится с количеством операций, приходящимся на обработку соответственно трех кадров P-типа и пяти кадров B-типа.

Например, для режима 1, соответствующего высокому качеству базового кадра, когда выполняются уровни ПОСШ: I-кадр – 42 дБ, P-кадр – 28 дБ, B-



кадр. Здесь получим следующее соотношение для оценки суммарного количества  $q_{\text{GOP}}^{(r)}$  операций на группу кадров:

$$q_{\text{GOP}}^{(r)} = q_I + 2q_P + 5q_B = q_I + 2 \cdot \frac{1}{3} q_I + 5 \cdot \frac{1}{5} q_I = \frac{8q_I}{3}.$$

Тогда для режима 1 в случае использования созданного метода для обработки базового кадра суммарное количество  $q_{\text{GOP}}^{(r)}$  операций на группу кадров будет равно

$$q_{\text{GOP}}^{(r)} = q'_I + 2q_P + 5q_B = \frac{q_I}{2} + 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{q_I}{2} + 5 \cdot \frac{1}{5} \cdot \frac{q_I}{2} = \frac{8q_I}{6}.$$

Откуда можно заключить, что суммарное количество операций за счет использования для обработки базового кадра созданного метода относительно использования стандартизированных технологий сократиться на 50 %.

Аналогичным образом получим оценки для других показательных режимов:

- режим 2, хорошее качество базового кадра: I-кадр – 40 дБ, P-кадр – 28 дБ, B-кадр – на 38 %;

- режим 2, достаточное качество базового кадра: I-кадр – 38 дБ, P-кадр – 28 дБ, B-кадр – на 50 %.

Отсюда можно утверждать, что в среднем количество операций на обработку видеопотока на основе сжатия базового кадра путем диагонально-неравномерного позиционного кодирования трансформант относительно стандартизированных технологий обработки кадров сокращается в среднем на 45 %.

С другой стороны сокращение количества операций создает возможность повысить качество предоставляемых видеоинформационных сервисов, а именно:

1) увеличить размер кадров, например, с формата 4CIF на формат кадра HD, или от формата кадра HD на формат FullHD;

2) повысить разрядность элементов изображений с 8 бит/элемент на 16 бит/элемент;

3) увеличить частоту кадров с 25 кадров/с на 50 кадров/с.

По результатам исследований можно заключить, что:

- построен метод алгоритмической сложности по оценки количества типовых операций для метода обработки базовых кадров на основе диагонально-неравномерного позиционного кодирования трансформант в неравновесном базисе оснований. Особенность созданной технологии с позиции алгоритмической реализации заключается в том, что диагонали имеют неравномерную длину, количество разрядов на кодограммы выбираются по диагонально-неравномерному принципу;

- сложность алгоритмической реализации разработанного метода сжатия базовых кадров находится в линейной зависимости от размера кадра, и в основном определяется количеством операций, приходящимся на выполнение двумерного косинусного преобразования. Для  $n=8$  удельные затраты количества операций на трансформирование достигают 80 %;

- количество операций типа умножения/деления не превышают 50 % от общего количества операций на обработку;

- количество операций для созданного метода на основе ДПН кодирования трансформант относительно технологии JPEG<sub>1</sub>, использующей статические таблицы кодов, будет меньше в среднем на 10 %, относительно технологии JPEG<sub>2</sub> достигается: сокращение количества типовых операций произведения минимум на 53 %, а количества типовых операций сложения/вычитания - минимум на 75%;

- в среднем количество операций на обработку видеопотока на основе сжатия базового кадра путем диагонально-неравномерного позиционного кодирования трансформант относительно стандартизированных технологий обработки кадров сокращается в среднем на 45 %.

## Выводы

1. Разработан метод оценки интенсивности потока, приходящегося на базовый кадр, с учетом формирования кодовых конструкций сжатого представления трансформант на основе диагонально-неравномерного позиционного кодирования и статистического кодирования DC-компоненты.

Проведенные экспериментальные оценки показали следующее:

- степень сжатия кадров I-типа для разработанного метода на основе диагонально-неравномерного позиционного кодирования (ДНПК) превышает степень сжатия для стандартизированных технологий (JPEG-технология), а именно для ПОСШ на уровне 42 дБ на 22 %, а для ПОСШ – на 37%;

- в случае обработки базового кадра на основе разработанного метода ДНПК его интенсивность снижается относительно случая обработки стандартизированной технологией в среднем от 15 % до 20 % в зависимости от ПОСШ.

2. Разработан метод оценки интенсивности на группу кадров и всего видеопотока с учетом: дифференцированного вклада типов кадров в интенсивность и качество визуального восприятия реконструированного видеопотока; компрессии базовых кадров на основе их трансформирования и последующего диагонально-неравномерного позиционного кодирования.

Достигается снижение дисбаланса между интенсивностью  $I_k$  и скорость передачи по сети  $U_{\Pi}$  в среднем на 12 %. Это позволяет:

- с одной стороны использовать для передачи видеопотока ИКС технологий с более низкой пропускной способностью, а именно на уровне 4 - 10 Мбит/с;

- с другой стороны повысить качество визуальной оценки видеопотока за счет снижения искажений без повышения интенсивности видеопотока одновременно для Р-кадров с уровня 28дБ до уровня 32 дБ (табл. 4.2, второй и пятый столбцы), и для кадров В-типа с 22 дБ до 24 дБ.

3. Построен метод оценки алгоритмической сложности по количеству типовых операций для метода обработки базовых кадров на основе диагонально-

неравномерного позиционного кодирования трансформант в неравновесном базисе оснований. Особенность созданной технологии с позиции алгоритмической реализации заключается в том, что диагонали имеют неравномерную длину, количество разрядов на кодограммы выбираются по диагонально-неравномерному принципу.

Сложность алгоритмической реализации разработанного метода сжатия базовых кадров находится в линейной зависимости от размера кадра, и в основном определяется количеством операций, приходящимся на выполнение двумерного косинусного преобразования. Для  $n=8$  удельные затраты количества операций на трансформирование достигают 80 %. Количество операций типа умножения/деления не превышают 50 % от общего количества операций на обработку.

4. Сравнительная оценка показала, что количество операций для созданного метода на основе ДПН кодирования трансформант относительно технологии JPEG<sub>1</sub>, использующей статические таблицы кодов, будет меньше в среднем на 10 %, относительно технологии JPEG<sub>2</sub> достигается: сокращение количества типовых операций произведения минимум на 53 %, а количества типовых операций сложения/вычитания - минимум на 75%;

В среднем количество операций на обработку видеопотока на основе сжатия базового кадра путем диагонально-неравномерного позиционного кодирования трансформант относительно стандартизированных технологий обработки кадров сокращается в среднем на 45 %. С другой стороны сокращение количества операций создает возможность повысить качество предоставляемых видеoinформационных сервисов, а именно: увеличить размер кадров, например, с формата 4CIF на формат кадра HD, или от формата кадра HD на формат FullHD; повысить разрядность элементов изображений с 8 бит/элемент на 16 бит/элемент; увеличить частоту кадров с 25 кадров/с на 50 кадров/с.

Основные результаты научно-прикладных исследований, изложенных в данном разделе опубликованы в следующих трудах [11 – 17; 68; 70; 71; 96].

## ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена актуальная научно-прикладная задача относительно снижения интенсивности сжатого потока видеокадров в инфокоммуникационных системах для повышения качества видеoinформационного сервиса. Создан метод снижения интенсивности видеопотока на основе трансформирования и диагонально-неравномерного позиционного кодирования базовых кадров в неравновесном базисе оснований. Разработана технология кодообразования, основанная на диагонально-неравномерном выделении количества разрядов. Построен метод реконструкции базовых кадров, который базируется на восстановлении диагонально-неравномерных позиционных чисел. Предложенные методы обеспечивают повышение степени сжатия базовых кадров, снижение интенсивности видеопотока и уменьшения временной задержки на его обработку.

Доля видеoinформационного трафика в настоящий момент составляет более 80% по отношению к другим видам трафика. Это неизбежно приводит к росту интенсивности видеотрафика, и как следствие повышению нагрузки на инфокоммуникационную систему. Проведенный анализ возможных средств доставки видеотрафика и требований, предъявляемых видеoinформационными сервисами, выявил наличие дисбаланса между интенсивностью видеопотока и пропускной способностью сети. Для преодоления сложившегося дисбаланса между реальной пропускной способностью сети и интенсивностью видеопотока, требуется обеспечить снижение последней на основе технологий компрессии потока видеокадров.

Анализ интенсивностей сжатого потока позволяет заключить, что существует противоречие, вызванное: с одной стороны ростом требований относительно качества видеoinформационных сервисов, а с другой стороны возникают сложности относительно предоставления видеoinформационных сервисов

заданного качества с использованием беспроводных технологий. Это обусловлено недостаточными характеристиками технологий компрессии потоков видеокадров по таким показателям, как степень сжатия и количество операций на обработку в зависимости от качества визуального восприятия реконструируемых видеокадров.

Проведенная оценка значений интенсивности видеопотока, приходящего соответственно на группу кадров и на поток из 24 кадров в секунду выявила следующее. Во-первых, интенсивность видеопотока, который требуется доставлять за одну секунду превышает реальную пропускную способность беспроводных технологий. В случае использования кадра формата HD (1280x720) дисбаланс между интенсивностью и скоростью передачи по сети будет расти. Во-вторых, вклад интенсивности кодового представления базового кадра в суммарную интенсивность видеопотока в зависимости от качества визуальной реконструкции кадров изменяется от 50 до 75 %. Это указывает на значимое влияние интенсивности базового кадра на суммарную интенсивность видеопотока. Отсюда в качестве направления совершенствования технологий компрессии видеопотока для снижения его интенсивности *предлагается* модернизировать методы обработки базовых кадров.

### **Основные научные результаты:**

1. Разработан метод формирования неравновесного позиционного неравномерно-диагонального базиса оснований на основе выявления динамических диапазонов для отдельных неравномерных диагоналей в зависимости от их порядкового номера и направления зигзаг-обхода. Это позволяет учесть наличие тенденций относительно структурных характеристик трансформанты ДКП в *диагональном* направлении, а именно то, что: значения компонент уменьшаются при обходе диагонального зигзага в направлении слева – направо; для зигзагообразного обхода в диагональном направлении в области высокочастотных компонент наблюдается появление наиболее длинных цепочек компонент с нулевыми значениями.

2. Создана модель оценки информативности трансформанты с учетом того, что трансформанта ДКП, рассматривается по неравномерной диагональной структуре, и представляет собой комбинаторный объект, а именно перестановку с повторениями, на динамические диапазоны элементов которых наложены ограничения. Обосновано, что в условиях наличия тенденции в изменении свойств трансформанты в диагональном направлении для неравномерно-диагонального метода выявления динамических диапазонов обеспечивается потенциал относительно дополнительного устранения структурной избыточности в изображениях.

3. Разработан метод сжатия трансформант на основе диагонально-неравномерного позиционного кодирования. Особенность метода заключается в том, что:

- позиционные числа строятся на базе неравномерных диагоналей трансформанты;

- основания элементов диагоналей определяются как значения динамических диапазонов на основе неравномерно-диагонального метода выявления;

- первая и последняя диагонали исключаются из базиса оснований НДП чисел и обрабатываются отдельно. Это обусловлено тем, что: первая диагональ содержит низкочастотную компоненту трансформанты, которая имеет резко отличные характеристики относительно других компонент трансформант; последняя диагональ для достаточно широкого класса изображений будет содержать компоненту с нулевым значением.

4. Построена обобщенная технология кодового представления диагоналей без учета априорной информации о ее длине и порядковом номере в трансформанте. В данном случае учитывается симметрия структурных свойств трансформанты относительно наибольшей диагонали. Это позволяет упростить алгоритмическую реализацию процесса кодирования.

5. Разработана технология кодообразования кодограммам на основе диагонально-неравномерного принципа выделения количества разрядов на основе информации о длине ДНП числа и его основании.

6. Сформулированы требования относительно реконструкции базовых кадров в условиях обеспечения заданного уровня коррекционных преобразований для контролируемости искажений при реконструкции кадров Р-типа и В-типа.

7. Разработан метод реконструкции базовых кадров на основе диагонально-неравномерного позиционного декодирования трансформант дискретного косинусного преобразования. Основными технологическими этапами являются:

1) безпогрешностное восстановление массивов служебных данных: база оснований ДНП чисел и матриц знаков;

2) декомпозиция неравномерных кодовых конструкций компрессионного представления диагоналей трансформанты;

3) выполнение взаимобратных преобразований на основе известной служебной информации, включающих в себя: статистическое декодирование низкочастотной DC-компоненты; диагонально-неравномерное позиционное декодирование для переменного количества элементов диагоналей трансформанты; обратное двумерное дискретное косинусное преобразование с коррекцией компонент трансформант.

8. Создана технология реконструкции кодограмм, содержащих кодовые значения ДНП чисел. Для этого выполняются такие этапы:

1) декомпозиция служебной и информационной частей кодовой конструкции сжатого представления текущего фрагмента базового кадра на основе разметки кодового потока базового кадра на кодовые конструкции трансформант с последующей их разметкой на кодовые конструкции отдельных диагоналей с использованием информации о значениях оснований диагоналей трансформант;

2) декомпозиция информационной части кодовой конструкции путем разметки фиксированного числа кодограмм компактного представления диагоналей трансформанты. Здесь учитывается то, что количество оснований постоянно и зависит от размера трансформанты. Данный процесс реализуется на основе информации о базисе оснований с использованием следующих эта-



пов: вычисление накопленного произведения оснований для текущей диагонали трансформанты; нахождение количества разрядов на представление кодового значения для ДНП числа.

### **Основные практические результаты:**

1. Разработан метод оценки интенсивности потока, приходящегося на базовый кадр, с учетом формирования кодовых конструкций сжатого представления трансформант на основе диагонально-неравномерного позиционного кодирования и статистического кодирования DC-компоненты. Проведенные экспериментальные оценки показали следующее:

- степень сжатия кадров I-типа для разработанного метода на основе диагонально-неравномерного позиционного кодирования (ДНПК) превышает степень сжатия для стандартизированных технологий (JPEG-технология), а именно для ПОСШ на уровне 42 дБ на 22 %, а для ПОСШ – на 37%;

- в случае обработки базового кадра на основе разработанного метода ДНПК его интенсивность снижается относительно случая обработки стандартизированной технологией в среднем от 15 % до 20 % в зависимости от ПОСШ.

2. Разработан метод оценки интенсивности на группу кадров и всего видеопотока с учетом: дифференцированного вклада типов кадров в интенсивность и качество визуального восприятия реконструированного видеопотока; компрессии базовых кадров на основе их трансформирования и последующего диагонально-неравномерного позиционного кодирования. Достигается снижение дисбаланса между интенсивностью  $I_k$  и скорость передачи по сети  $U_{\Pi}$  в среднем на 12 %. Это позволяет:

- с одной стороны использовать для передачи видеопотока ИКС технологий с более низкой пропускной способностью, а именно на уровне 4 - 10 Мбит/с;

- с другой стороны повысить качество визуальной оценки видеопотока за счет снижения искажений без повышения интенсивности видеопотока одновременно для Р-кадров с уровня 28дБ до уровня 32 дБ (табл. 4.2, второй и пятый столбцы), и для кадров В-типа с 22 дБ до 24 дБ.

3. Построен метод оценки алгоритмической сложности по количеству типовых операций для метода обработки базовых кадров на основе диагонально-неравномерного позиционного кодирования трансформант в неравновесном базисе оснований. Особенность созданной технологии с позиции алгоритмической реализации заключается в том, что диагонали имеют неравномерную длину, количество разрядов на кодограммы выбираются по диагонально-неравномерному принципу. Сложность алгоритмической реализации разработанного метода сжатия базовых кадров находится в линейной зависимости от размера кадра, и в основном определяется количеством операций, приходящимся на выполнение двумерного косинусного преобразования. Для  $n=8$  удельные затраты количества операций на трансформирование достигают 80 %. Количество операций типа умножения/деления не превышает 50 % от общего количества операций на обработку.

4. Сравнительная оценка показала, что количество операций для созданного метода на основе ДПН кодирования трансформант относительно технологии JPEG<sub>1</sub>, использующей статические таблицы кодов, будет меньше в среднем на 10 %, относительно технологии JPEG<sub>2</sub> достигается: сокращение количества типовых операций произведения минимум на 53 %, а количества типовых операций сложения/вычитания - минимум на 75%. В среднем количество операций на обработку видеопотока на основе сжатия базового кадра путем диагонально-неравномерного позиционного кодирования трансформант относительно стандартизированных технологий обработки кадров сокращается в среднем на 45 %. С другой стороны сокращение количества операций создает возможность повысить качество предоставляемых видеoinформационных сервисов, а именно: увеличить размер кадров, например, с формата 4CIF на формат кадра HD, или от формата кадра HD на формат FullHD; повысить разрядность элементов изображений с 8 бит/элемент на 16 бит/элемент; увеличить частоту кадров с 25 кадров/с на 50 кадров/с.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается следующим:

1) адекватностью результатов экспериментальных и теоретических исследований относительно степени сжатия, интенсивности видеопотока, временных задержек на обработку, полученных на основе программной реализации и математической модели;

2) непротиворечивостью полученных результатов относительно положений теории сокращения избыточности и методов позиционного кодирования;

4) визуальной оценкой качества реконструируемых изображений с использованием разработанного метода снижения интенсивности потока кадров.

**Результаты диссертационной работы целесообразно использовать:**

- в системах дистанционного формирования видеопотока и его передачи с использованием беспроводных средств телекоммуникаций;

- для проведения конструкторских и научно-исследовательских работ по созданию новых технических средств и программных изделий по обработке потока кадров для повышения качества предоставления видеоинформационного сервиса;

- для изучения учебных дисциплин по кодированию и обработке видеопотока в высших учебных заведениях Украины.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание: Пер. с англ. / Э. Айфичер, Б. Джервис. - М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. - 992 с.
2. Ансон Л., Барнсли М. Фрактальное сжатие изображений // Мир ПК. - 1992. - №4. - С. 23 - 27.
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 и др.] // Праці УНДІРТ. – 2000. – № 3. – С. 3-40.
4. Ахмед Н. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов / Н. Ахмед, К.Р. Рао; пер. с англ. под ред. И.Б. Фоменко. – М. : Связь, 1980. – 248 с.
5. Баранник В.В. Структурно-комбинаторное представление данных в АСУ / В.В. Баранник, Ю.В. Стасев, Н.А. Королева - Х.: ХУПС, 2009. – 252 с.
6. Баранник В.В. Кодирование трансформированных изображений в инфокоммуникационных системах / В.В. Баранник, В.П. Поляков - Х.: ХУПС, 2010. – 234 с.
7. Баранник В.В. Кодирование трехмерных моделей видеок кадров в инфотелекоммуникационных системах / В.В. Баранник, В.П. Поляков, А.В. Слободянюк // Каменец-Подольский-Харьков: Вид-во Каліграф, 2011. – 210 с.
8. Баранник В.В. Метод повышения доступности видеоинформации аэромониторинга / В.В. Баранник, С.В. Туренко, О.С. Кулица // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2013. - №3. – С. 31 – 36.
9. Баранник В.В. Метод верификации кодека вектора кортежей в систему компрессии базовых кадров видеопотока в инфокоммуникациях / В.В. Баранник, С.В. Туренко // АСУ и приборы автоматики. – 2013. - №165. – С. 22 – 30.

10. Баранник В.В. Метод реконструкции трансформант в диагонально-неравномерном базисе оснований на основе декодирования неравномерных кодограмм / В.В. Баранник, Отман Шади О.Ю., Хаханова А.В. // АСУ и приборы автоматики. - 2014. - № 166. - С. 42-47.

11. Баранник В.В. Метод кодування діагональних нерівномірно позиційних чисел для компресії базових кадрів відеопотоку в інфокомунікаційних системах / В.В. Баранник, Отман Шаді О.Ю. // Наукоємні технології. – 2014. - № 4. – С. 24-30.

12. Баранник В.В. Метод снижения интенсивности видеопотока в инфокоммуникационных системах / В.В. Баранник, Отман Шади О.Ю., А.В. Хаханова // АСУ и приборы автоматики. - 2014. - № 167. - С. 23-28.

13. Баранник В.В. Технологическая концепция обработки базовых кадров для снижения интенсивности кодового представления / В.В. Баранник, О. Ю. Отман Шади // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2014. – № 4. – С. 25-31.

14. Баранник В.В. Методологические рекомендации по совершенствованию технологии снижения интенсивности кодового представления базовых кадров / В.В. Баранник, Отман Шади О.Ю., А.А. Подорожняк // Системи обробки інформації. – № 8(124). – 2014 . – С. 87-93.

15. Баранник В.В. Методология оценки задержки на обработку базовых кадров видеопотока для инфокоммуникационных технологий / В.В. Баранник, Отман Шади О.Ю., С.Ю. Стасев, А.П. Мусиенко // Радиоэлектроника и информатика. – 2014. - № 4. – С. 10 – 13.

16. Баранник В.В. Метод оцінки інтенсивності відеопотоку у розрахунку на базовий кадр/ В.В. Баранник, Ю.М. Рябуха, Отман Шаді О.Ю. / Системи озброєння та військова техніка.– 2015. - № 1. – С. 34 – 41.

17. Баранник В.В. Концепция обработки кадров видеопотока для снижения интенсивности / В.В. Баранник, О.Ю. Отман Шади // Третя міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми інформатизації", (Київ, 11-13 грудня 2014 г.) / Державний університет телекомунікацій, Київ, 2014. – С. 9.

18. Баранник В.В. Методология селективной защиты видеопотока по базовым кадрам для ведомственных систем / Баранник В.В., Комолов Д.И., Тарнополов Р.В., Отман Шади О.Ю. // Научно-техническая конференция [«Информационная безопасность Украины»] / Киевский национальный университет имени Тараса Шевченка, 12-13 березня 2015 р. - С. 25.
19. Багатоканальний електрозв'язок та телекомунікаційні технології: Підручник для студентів вищих навч. закладів / За редакцією Поповського В.В. - Харків: «Компанія СМІТ»; 2003.- 512 с.
20. Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории / К. Блаттер. – М. : Техно сфера, 2006. – 279 с.
21. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. – М.: Мир, – 1989. – 448 с.
22. Бондарев В.Н. Цифровая обработка сигналов: методы и средства. Учебное пособие для вузов. 2-е изд. / В.Н. Бондарев, Г. Трестер, В.С. Чернега. – Х.: Конус, 2001. – 398с.
23. Букрина Е.В. Сети связи и системы коммутации: Учебное пособие / Е.В. Букрина. - Екатеринбург: УрТИСИ ГОУ ВПО «СибГУТИ», 2007. – 186с.
24. Бузов Є. Комп'ютерні мережі. - Львів: Бак, 1999. - 468 с.
25. Быков Р.Е. Цифровое преобразование изображений / Р.Е. Быков. – М. : Горячая линия - Телеком. – 2003. – 228 с.
26. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений / [Т.С. Хуанг, Дж.О. Эклунд, Г.Дж. Нуссбаумер и др.]; под ред. Т.С. Хуанга; пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1984. – 224 с.
27. Васильев В.Н. Компьютерная обработка сигналов / В.Н. Васильев, И.П. Гуров. - СПб: БХВ Санкт-Петербург, 1998. - 240 с.
28. Ватолин Д. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео / Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкин – М.: ДИАЛОГ – МИФИ, 2003. – 384с.
29. Величко В.В. Телекоммуникационные системы и сети: Учебное пособие. В 3 томах. Том 3. – Мультисервисные сети / В.В. Величко, Б.А. Суббо-

тин, В.П. Шувалова, А.Ф. Ярославцев; под ред. профессора В.П. Шувалова. – М.: 2005. – 592 с.

30. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат.лит. – 1988. - 480с.

31. Введение в контурный анализ: приложения к обработке изображений и сигналов / [Я.А. Фурман, А.В. Кревецкий, А.К. Передреев и др.]; под ред. Я.А. Фурмана. – [2-е изд.]. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 592 с.

32. Воробьев В.И. Теория и практика вейвлет – преобразования / В.И. Воробьев, В.Г. Грибунин. – СПб.: ВУС, 1999. – 203 с.

33. Гладырева А.Ю. Влияние степени сжатия и цветности на качество медицинских ультразвуковых изображений / А.Ю. Гладырева, Н.Н. Будник, А.С. Коваленко // Клиническая информатика и Телемедицина. – 2010. Т.6. Вып.7. – С.43-49.

34. Голубов Б.И. Ряды и преобразования Уолша: теория и применения / Б.И. Голубов, А.В. Ефимов, В.А. Скворцов. – М. : Наука, 1987. – 344 с.

35. Гольдштейн Б.С. Сети связи: Учебник для ВУЗов. СПб.: БХВ – Петербург. 2010. – 400 с.

36. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1073 с.

37. Гургенидзе А.Т., Корше В.И. Мультисервисные сети и услуги широкополосного доступа.-С.-П., 2003. - 434с.

38. Дмитриев В.И. Прикладная теория информации. - М.: Высш. шк., 1989. – 320 с.

39. Дядунов А.М. Адаптивные системы сбора и передачи аналоговой информации / А.М. Дядунов, Ю.А. Онищенко, А.И. Сенин. - М.: Машиностроение, 1988 – 288 с.

40. Засядько А.А. и др. К анализу эффективности алгоритмов и программ быстрых ортогональных дискретных преобразований // Электрон. моделирование. - 1998. - №6. - С. 109 - 111.

41. Залманзон Л.А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях / Л.А. Залманзон. – М. : Наука, 1989. – 496 с.
42. Золотарев В.В. Реальный энергетический выигрыш кодирования для спутниковых каналов / В.В. Золотарев // Спутниковая связь – ICSC-2000: IV междунар. конф.: труды конф. – М. : МЦНТИ, 2000. – Т. 2. – С. 20-25.
43. Зубков С.В. Assembler. Для DOS, Windows и Linux. - М.: ДМК, 1999. - 640 с.
44. Иванов В.Г. Формальное описание дискретных преобразований Хаара // Проблемы управления и информатики. - 2003. - №5. - С. 68 – 75.
45. Катунин Г.П. Телекоммуникационные системы и сети: Учебное пособие. В 3 томах. Том 2. – Радиосвязь, радиовещание, телевидение / Г.П. Катунин, Г.В Манчев, В.П. Попантонопуло, В.П. Шувалова, под ред. профессора В.П. Шувалова. – М.: 2004. – 672 с.
46. Кашкин В.Б. Цифровая обработка аэрокосмических изображений: Конспект лекций.- Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – 121 с.
47. Климаш М.М. Динамічний моніторинг параметрів навколишнього середовища в реальному масштабі часу: монографія / Ю.Я. Бобало, Ю.Г. Даник, М.М. Климаш, Л.О. Комарова // Національний університет «Львівська політехніка» - 2013. – 186 с.
48. Коган Б.М. Основы проектирования микропроцессорных устройств автоматики / Б.М. Коган, В.Б. Сташин . - М.: Энергия, 1989. - 376 с.
49. Корнеев В.В. Современные микропроцессоры / В.В. Корнеев, А.В. Киселев. - СПб.: БВХ-Петербург, 2003. – 448 с.
50. Королев А.В. Метод восстановления трансформант дискретного косинусного преобразования / А.В. Королев, В.В. Баранник // Системи обробки інформації.-Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ.-2000.-Вип. 3(9).-С. 83-86.
51. Кравченко В.Ф. "Wavelet"– системы и их применение в обработке сигналов / В.Ф. Кравченко, В.А. Рвачев // Зарубежная радиоэлектроника. – №4. – 1996. – С. 3 – 20.



52. Красильников Н.Н. Теория передачи и восприятия изображений. Теория передачи изображений и ее приложения / Н.Н. Красильников. – М. : Радио и связь, 1986. – 248 с.
53. Красильников Н.Н. Цифровая обработка изображений. – М.: Вузовская книга, 2011. – 320 с.
54. Красноручкий А.А. Анализ влияния процесса сжатия видеoinформации на основные характеристики телекоммуникационной сети [Текст] / А.А. Красноручкий, А.В. Ширяев // Сучасна спеціальна техніка, К. ДНДІ МВС України, 2012. – №1(28), – С. 42-48.
55. Кривонос В.Н. Метод компактного представления вектора масштабирующих компонент трансформант/ В.Н. Кривонос, Н.К. Гулак, М.В. Думанский. // Сучасна спеціальна техніка – 2012. – № 3(30) – С. 28 – 33.
56. 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.
57. Лидовский В.В. Теория информации / В.В. Лидовский. - М.: Компания Спутник+, 2004. - 111 с.
58. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов: Пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 671 с.
59. Мастрюков Д. Алгоритмы сжатия информации. Часть 2. Арифметическое кодирование // Монитор. – 1994. – №1. – С. 20 – 23.
60. Мачалин И. А. Анализ и оценка показателей эффективности эксплуатации стационарного оборудования телекоммуникационных систем / И.А. Мачалин // Захист інформації.– 2012.– №4.– С.55–59.
61. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / В.В. Поповський, С.О. Сабурова, В.Ф. Олійник, Ю.І. Лосєв, Д.В. Агєєв та ін.: За загал. ред. В.В. Поповського. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 564 с.
62. Миано Дж. Форматы и алгоритмы сжатия изображений в действии: учебное пособие / Дж. Миано; пер. с англ. – М. : Триумф, 2003. – 336 с.

63. MATLAB 6.0. Финансовые, инженерные и научные расчеты в среде Windows. - М.: Информационно-издательский дом «Филинь», 1997. - 712 с.
64. Нетравали А.М. Кодирование изображений / А.М. Нетравали, Дж.О. Лимб // ТИИЭР. - 1980. - №3. - С. 76 - 124.
65. Обработка изображений и цифровая фильтрация / [под ред. Т.С. Хуанга]. – М. : Мир, 1979. – 318 с.
66. 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.
67. Осипов Л.А. Обработка сигналов на цифровых процессорах / Л.А. Осипов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 112 с.
68. Отман Шади О.Ю. Методологическая база для представления трансформанты в неравновесном позиционном неравномерно-диагональном пространстве // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте.– 2014. - № 6. – С. 58-64.
69. Отман Шади О.Ю. Стиснення стереозображень / О.Ю. Шаді Отман, А.О. Подорожняк, С.С. Бульба, Р.А. Москаленко // Чотирнадцята міжнародна науково-технічна конференція [«Проблеми інформатики та моделювання»], (Харків 22-28 вересня 2014 р.) / Національний технічний університет «ХПІ». – 2014. – С. 45.
70. Отман Шади О.Ю. Обоснование рекомендаций для технологий снижения интенсивности потока кадров в инфокоммуникациях / В.В. Баранник, Шади Отман О.Ю., С.А. Сидченко // Науково-методична конференція [«Сучасні проблеми телекомунікації і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2014»] / Національний університет «Львівська політехніка», 1-4 листопада 2014р. – С. – 115-116.
71. Отман Шаді О.Ю. Спосіб оцінки інформативності зображень з трансформуванням / О.Ю. Отман Шади, В.К.Бондарчук // Науково-технічна конференція [«Інформатика, управління та штучний інтелект»] / Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», (Харків, 26 – 27 листопада 2014 р.) – С. 23.

72. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработка изображений, М.: Радио и связь, 1986, 400 с.
73. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ. / Под ред, Д.Д Кловского. – М.: Радио и связь. 2000. - 800 с.
74. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: в 2 т. / У. Прэтт; пер. с англ. – М. : Мир, 1985. – 736 с.
75. Свириденко В.А. Анализ систем со сжатием данных. – М.: Связь 1978.- 183с.
76. Синепол В.С. Системы компьютерной видеоконференцсвязи / В.С. Синепол, И.А. Цикин. – М.: ООО “Мобильные коммуникации”, 1999. – 166 с.
77. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука / Д. Сэломон. – М: Техносфера, 2004. – 368 с.
78. Тропченко А.Ю. Методы сжатия изображений, аудтосигналов и видео / А.Ю. Тропченко, А.А. Тропченко // Учебное пособие – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 108 с.
79. Фисенко В.Т. Компьютерная обработка и распознавание изображений: учебн. пособие / В. Т. Фисенко, Т. Ю. Фисенко. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2008. – 192 с.
80. 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.
81. Фисенко В. Т.. Компьютерная обработка и распознавание изображений: учебн. пособие / В. Т. Фисенко, Т. Ю. Фисенко. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2008. – 192 с.
82. Цифровая обработка изображений в информационных системах / И.С. Грузман, В.С. Киричук и др. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.
83. Чернега В.С. Сжатие информации в компьютерных сетях / В.С. Чернега. – Севастополь: Изд – во СевГТУ, 1997. – 214 с.
84. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. – М.: Изд - во иностр. лит - ры, 1963. – 793 с.

85. Шлихт Г.Ю. Цифровая обработка цветных изображений / Г.Ю. Шлихт // М.: ЭКОМ, 1997. – 336 с.
86. Яковенко А.В. Методологічні основи комплексного представлення зображень з контрольованою погрішністю / А.В. Яковенко // Системи озброєння і військова техніка – Х.: ХУПС. – 2008. – Вип. 2(14). – С. 128-131.
87. Abramov S.K. Multiplicative Noise Variance Evaluation in MM-band Radar Images Using Myriad Estimation / S.K. Abramov, V.V. Lukin, A.A. Zelensky // Physics and Engineering of Millimeter and Sub-Millimeter Waves: Proceeding of the Fourth International Kharkov Symposium, June 2001. – Kharkov, Ukraine, 2001. – Vol. 1. – P. 429–431.
88. Akimov D. Occlusion Refinement for Stereo Video Using Optical Flo / D. Akimov, A. Shestov, A. Voronov, D. Vatolin // In: International Conference on 3D Imaging. - 2012. – P. 115 – 138.
89. Andrews H.C., Hunt B.R. Digital Image Restoration.- Englewood Cliffs (NJ): Prentice Hall, 1977. - XVIII, 238 p.
90. Bai X. Towards temporally-coherent video matting / X. Bai, J. Wang, D. Simons // Proceedings of the 5th international conference on Computer vision/computer graphics collaboration techniques. MIRAGE'11, Springer-Verlag. – 2011 – P. 63-74.
91. Barannik V.V. Encoding of Approximating Making Images for their Transmission in Telecommunication System / V.V. Barannik, A.N. Dodukh, R.I. Akimov // International Conference [“The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics”], (Lviv – Polyana, Ukraine, February 19 – 23, 2013) / Lviv – Polyana: 2013. – P. 21.
92. Barannik V. Method Of Encoding Transformant Uolsha Is In Systems Air Monitoring Of Earth / V. Barannik, A. Yakovenko, A. Krasnorutkiy // Lviv-Slavsko, Ukraine, Lviv Polytechnic National University, International Conference TCSET'2009, Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science, February 19 – 23, 2009. – P. 381-383.

93. Barannik V. Technology of the Data Processing on the Basis of Adaptive Spectral-Frequency Transformation of Multiadical Presentation of Images / Barannik V., Sidchenko S., Vasiliev D. // International Symposium ["IEEE East-West Design & Test"], (Moscow, Russia, September 18 – 21, 2009) / Moscow: 2009. – P. 495 – 498.
94. Barannik V. The Positional Structural-Weight Coding of the Binary View of Transformants / Barannik V., Hahanova A. // International Symposium ["IEEE East-West Design & Test"], (Kharkov, Ukraine, September 18 – 21, 2012) / Kharkov: 2012. – P. 490 – 494.
95. Barannik V.V. Method of images reconstruction on the basis of two-level decoding linear transforms / V.V. Barannik, S.V. Turenko // *Захист інформації*. – 2014. - №2. – С. 29 – 34.
96. Barannik V.V. Method of Intensity Lowering for Video Stream in Information Systems / V.V. Barannik, Otman Shadi O.U., A.A. Krasnorutskiy // *Radioelectronics & informatics*. - 2013. - № 1. - С.36-39.
97. Barannik V. A method to control bit rate while compressing predicted frames / V. Barannik, N. Kharchenko, Othman Shadi O.Yo., A. Musienko // The XIIIth International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics CADSM'2015 (24-27 February 2015 Polyana-Svalyava (Zakarpattya), Ukraine). – P. 29-31.
98. Barinova O, On detection of multiple object instances using hough transforms / O. Barinova, V. Lempitsky, P. Kholi // *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions*. 2012. – P. 177 - 184.
99. Barlaud M. Pyramidal lattice vector quantization for multiscale image coding / M. Barlaud // *IEEE Trans. image Proc.* – 1994. – V. 3. – № 4. – P. 367-381.
100. Ding Z. GPU accelerated interactive space-time video matting / Z. Ding, H. Chen, Y. Gua, Q. Peng // *In Computer Graphics International*. – 2010. - P. 163 – 168.
101. Chigorin A, A method for traffic sign detection in an image with learning from synthetic data / A. Chigorin, G. Krivovyaz, A. Velizhev, A. Konushin // 14th

International Conference Digital Signal Processing and its Applications. Vol 2. 2012. - P. 316 - 335.

102. Christophe E. Quality criteria benchmark for hyperspectral imagery / E. Christophe, D. Lager, C. Mailhes // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – Sept 2005. – Vol. 43. – No 9. – P. 2103 - 2114.

103. Gavrishchaka V, Robust Algorithmic Detection of Cardiac Pathologies from Short Periods of RR Data / V. Gavrishchaka, O. Senyukova // IKnowledge-Based Systems in Biomedicine and Computational Life Science - Studies in Computational Intelligence (Springer). Vol 450; - 2013. P. 137 - 153.

104. 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.

105. Gonzales R.C. Digital image processing / R.C. Gonzales, R.E. Woods. - Prentice Inc. Upper Saddle River, New Jersey 2002. – 779 p.

106. Grundmann M. Efficient hierarchical graph based video segmentation / M. Grundmann, V. Kwatra, M. Han, I. Essa / IEEE CVPR. // 2010. – P. 85 -91.

107. Habibi A., Wintz P.F. Image coding by linear transformation and block quantization // IEEE Trans. Commun. Tech. – 1971. V. COM – 19. - №1. P.50-63.

108. Kaarna A. Blockwise Distortion Measure for Lossy Compression of Multispectral Image / A. Kaarna, J. Parkkinen // Proceeding of the 10-th European Signal Processing Conference, 5-8 September 2000. – Tampere, Finland, 2000. – P. 2197-2200.

109. Kang H. R. Color Technology for Electronic Imaging Devices, Vol. PM28, SPIE Press, Bellingham, WA, 1997.

110. Kossentini F., Chung W.C., Smith M. Subband image coding using entropy-constrained residual vector quantization // Information Processing and Management. - 1994. -V.30. -№6. - P. 887 - 896.

111. Milyaev S. Image binarization for end-to-end text understanding in natural images / S. Milyaev, O. Barinova, T. Novikova, V. Lempitsky, P. Kohli // ICDAR. - 2013. – P. 35 – 42.

112. Lee S.Y. Temporally coherent video matting / S.Y. Lee, J.C. Yoon, I.K. Lee // Graphical Models 72. – 2010. – P. 25 – 33.
113. Lezama J. Track to the future: Spatio-temporal video segmentation with long-range motion cues / J. Lezama, K. Alahari, J. Sivic, I. Laptev // In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2011. – P.256 – 289.
114. Othman Shadi O.Yo. Control of Video Compression Parameters with Regard to the Particular Characteristics of Block Content / Shadi Othman, Dmitry Dvukhglavov, Vitaliy Tverdokhlebov, N. Kharchenko // International Symposium [«Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2014)»], (Kiev, Ukraine, September 26–30, 2014) / Kyiv: 2014.– P. 338–340.
115. Petrou M. Image Processing The Fundamentals, John Wiley & Sons, Inc., 1999, 355 p.
116. Ponomarenko N., Lukin V., Egiazarian K., Astola J., Partition Schemes in DCT Based Image Compression, // Technical Report 3-2002, ISBN 952-15-0811-6, Tampere University of Technology, Finland, 2002, 100 p.
117. Pratt W.K., Chen W.H., Welch L.R. Slant transform image coding // Proc. Computer Processing in communications. – New York: Polytechnic Press, 1969. P. 63-84.
118. Pratt K. Digital Image Processing: PIKS Inside, Third Edition. John Wiley & Sons, Inc., 2001, 738 p.
119. Rhemann C. Varying PSF-based Prior for Alpha Matting / C. Rhemann, C. Rother, P. Kohli, M. Gelautz // A Spatially In: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2010. P. – 224 – 242.
120. Ryabukha Yu. Video Data Processing Method in Telecommunication Systems / Yu. Ryabukha, Vladimir Krivonos, S. Turenko// XII<sup>th</sup> International Conference [“Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, TCSET'2014 ”], (Lviv-Slavske, Ukraine, February 25 – March 1, 2014) / Lviv-Slavske: 2014. – P. 531.

121. Sindeev M. Alpha-flow for video matting / M. Sindeev, A. Konushin, C. Rother // Technical Report. – 2012. P. – 41 – 46.
122. 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.
123. Tang Z. Video matting via opacity propagation / Z. Tang, Z. Miao, Y Wan, D. Zhang // The Visual Computer. – 2011. – P.1 – 15.
124. Tsai D. Motion coherent tracking with multi-label MRF optimization / D. Tsai, M. Flagg, M. J. Rehg // BMVC - 2010. P. 112 – 119.
125. 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.
126. Wallace G.K. The JPEG Still Picture Compression Standard // Communication in ACM. – 1991. – V34 - №4. – P.31-34.
127. Voronov A. Methodology of stereoscopic motion picture quality assessment / A. Voronov, D. Vatolin, D. Sumin, V. Napadovsky, A. Borisov // Stereoscopic Displays and Applications XXIV, Proc. of SPIE-IS&T Electronic Imaging, SPIE. - 2013. – P. 67 - 69.



## Приложение А.

Примеры обработки потока кадров в группе с различных качеством визуального восприятия

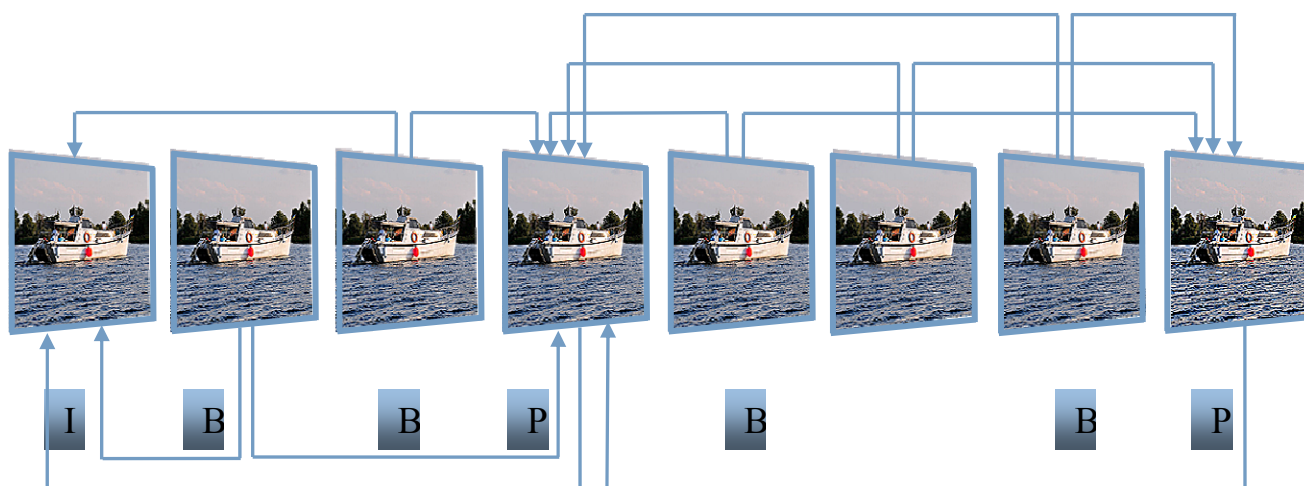


Рис. А.1. Поток исходных кадров в группе

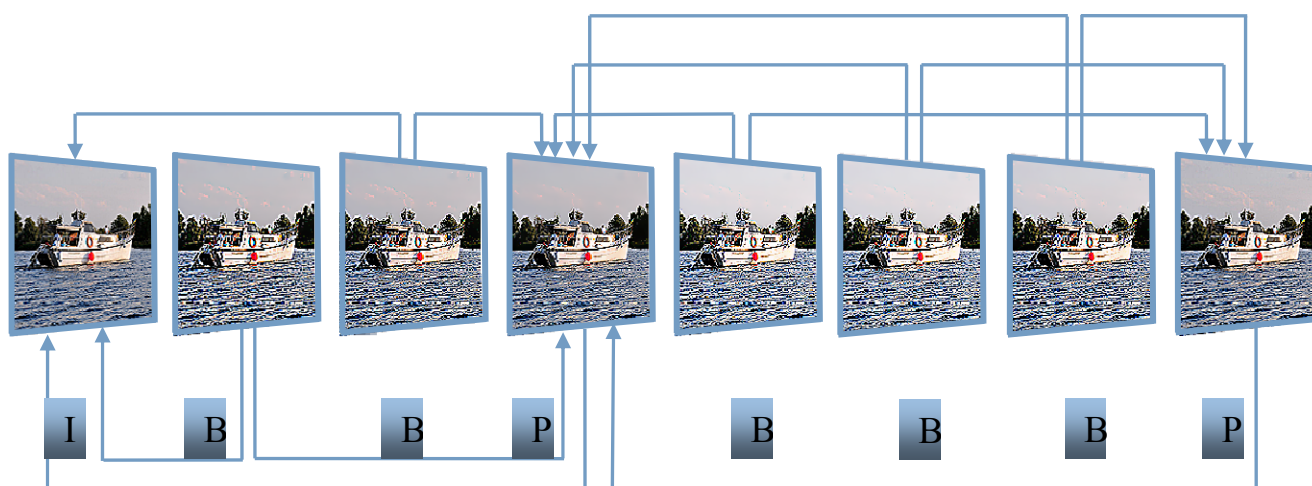


Рис. А.2. Результаты обработки потока кадров на основе разработанного метода для базового кадра (ПОСШ 42дБ)

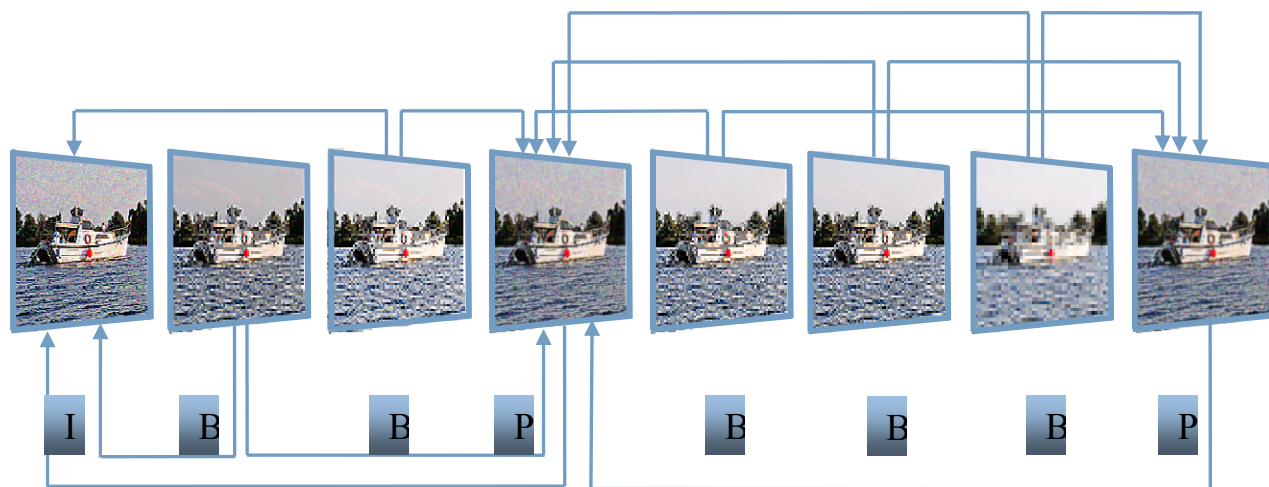


Рис. А.3. Результаты обработки потока кадров на основе разработанного метода при обработке базового кадра (ПОСШ 38 дБ)

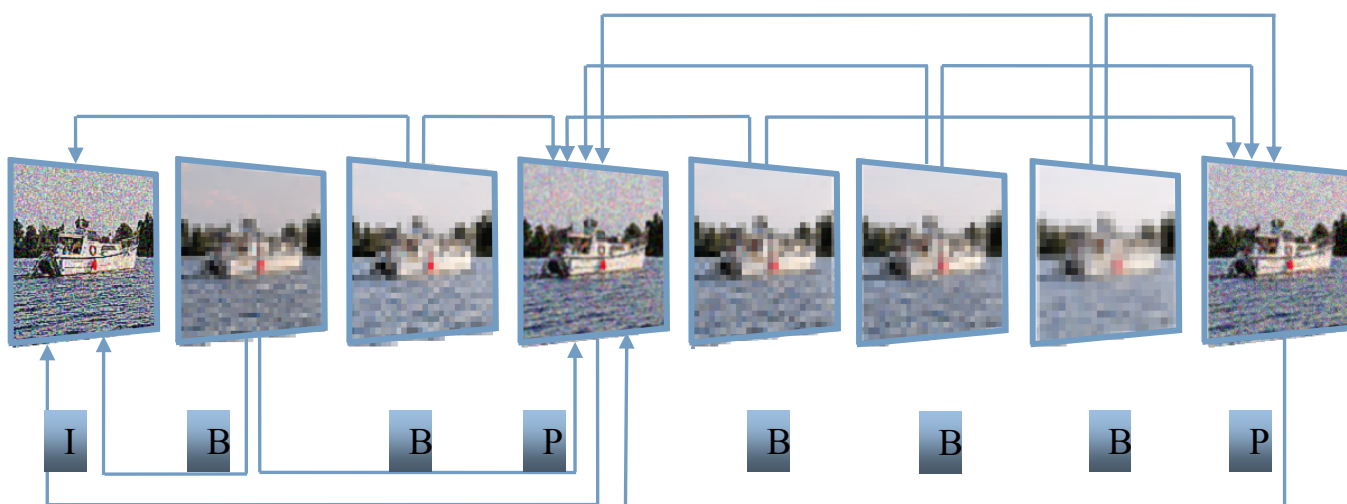


Рис. А.4. Результаты обработки потока кадров для стандартизированных методов (ПОСШ для базового кадра 25дБ)

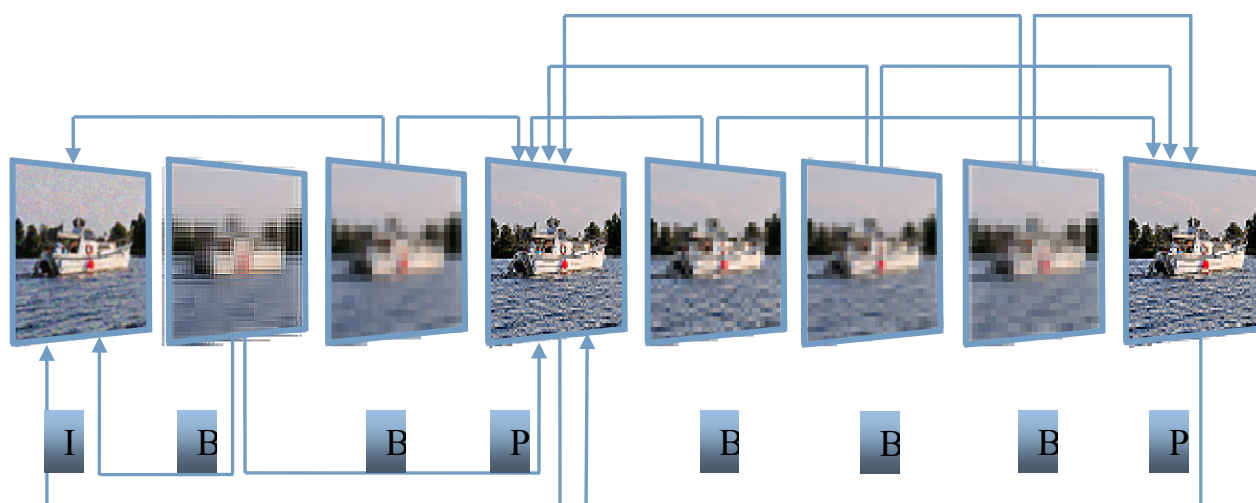


Рис. А.5. Результаты обработки потока кадров для стандартизированных методов (ПОСШ для базового кадра 27 дБ)

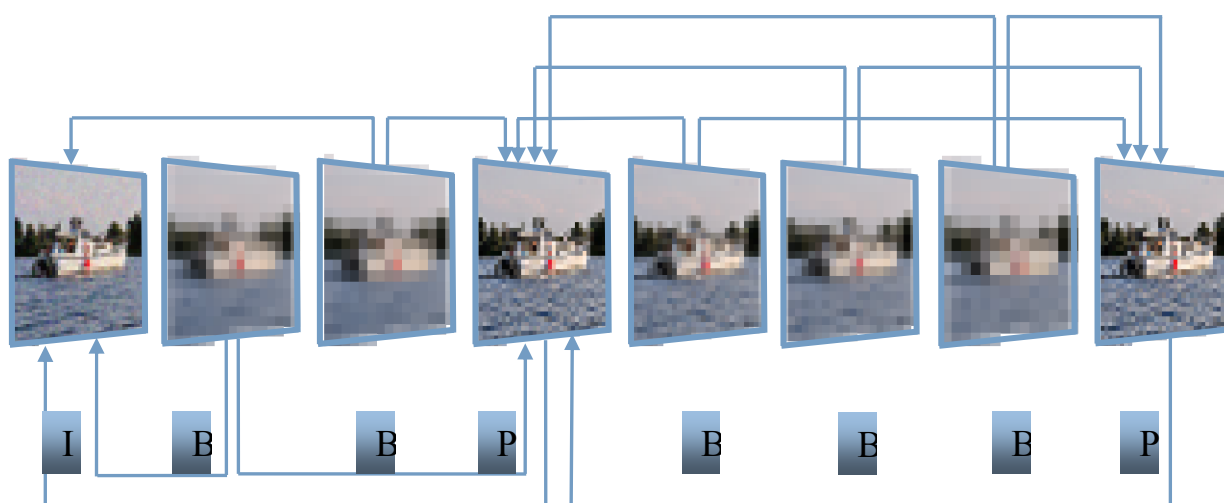


Рис. А.6. Результаты обработки потока кадров для стандартизированных методов (ПОСШ для базового кадра 22 дБ)

## Приложение Б

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Перший заступник Головного конструктора  
ДНВП «Об'єднання Комунар» –  
Головний інженер НТ СКБ «ПОЛІСВІТ»

кандидат технічних наук, доцент,  
заслужений винахідник України



*М.Ф. Сидоренко*

березня 2015 року

**А К Т**

**впровадження результатів науково-прикладних досліджень  
Шаді Отмана О.Ю.**

Комісія у складі: голови начальника відділу Євсюкова М.П. та членів комісії начальника лабораторії Сальникова В.В., провідного інженера, кандидата технічних наук Дашкієва В.М. склала дійсний акт, який полягає в тому, що при виконанні дослідно-конструкторських робіт використані наступні результати науково-прикладних досліджень Шаді Отмана О.Ю.:

1. Метод формування нерівноважного позиційного нерівномірно-діагонального базису основ на підставі виявлення динамічних діапазонів для окремих нерівномірних діагоналей залежно від їх порядкового номера і напрямку зігзаг-обходу.

2. Узагальнена технологія кодового представлення діагоналей без врахування апріорної інформації про її довжину і порядковий номер в трансформанті. В даному випадку враховується симетрія структурних властивостей трансформанти щодо найбільшої діагоналі. Це дозволяє спростити алгоритмічну реалізацію процесу кодування.

3. Технологія кодоформування кодограмам на основі діагонально-нерівномірного принципу виділення кількості розрядів на основі інформації про довжину числа і його основи.

4. Технологія реконструкції кодограм, що містять кодові значення чисел на основі декомпозиції службової і інформаційної частин кодової конструкції представлення поточного фрагменту базового кадру. На відміну від інших технологій проводиться розмітка кодового потоку базового кадру на кодові конструкції трансформант з подальшою їх розміткою на кодові конс-

трукції окремих діагоналей з використанням інформації про значення основ і фіксованої кількості кодограм.

Впровадження результатів досліджень Шаді Отмана О.Ю. в контрольно-перевірочних комплексах КУ560, КУ4560 та в автоматизованій системі відображення інформації АСВІ на основі програмно-апаратних реалізацій дозволило забезпечити:

1) зниження дисбалансу між інтенсивністю та швидкістю передачі по мережі в середньому на 12 %. Це дозволяє: з одного боку використовувати для передачі відеопотоку інфокомунікаційні технології з нижчою пропускнуою спроможністю, а саме на рівні 4 - 10 Мбіт/с; з іншого боку підвищити якість візуальної оцінки відеопотоку за рахунок зниження спотворень без підвищення інтенсивності відеопотоку одночасно з рівня 28 дБ до рівня 32 дБ.

2) скорочення кількості операцій на обробку відеопотоку на основі обробки базового кадру шляхом діагонально-нерівномірного позиційного кодування трансформант щодо стандартизованих технологій обробки кадрів в середньому на 45 %. Це створює можливість підвищити якість сервісів відеоінформацій.

**Голова комісії**

Начальник відділу



М.П. Євсюков

**Члени комісії:**

Начальник лабораторії



В.В. Сальников

Провідний інженер,  
кандидат технічних наук



В.М. Дашкієв