

# ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

## DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES

УДК 519.25, 004.93 + 621.397.13.037.372

DOI: 10.17587/it.25.39-45

**Я. А. Хасан**<sup>1</sup>, аспирант, e-mail: midocom@mail.ru,

**Н. Г. Рыжов**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц., e-mail: ngryzhov@mail.ru,

**Ш. С. Фахми**<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, доц., e-mail: shakeebf@mail.ru,

**Е. В. Костикова**<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доц., e-mail: kostikovaev@mail.ru,

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ",

<sup>2</sup>Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН,

<sup>3</sup>Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

### Адаптивный способ спектрального преобразования видеoinформации транспортных изображений

*Предложен метод кодирования и декодирования видеoinформации на основе адаптивного трехмерного дискретного косинусного преобразования, обеспечивающий повышение эффективности устройств передачи и уменьшение информационных показателей качества видеосистем: уровни искажения, скорости передачи и сложности кодирующих устройств. Для повышения производительности алгоритма сжатия изображений используется классификация транспортных сюжетов по типу движения. Получены результаты тестирования алгоритма и приведен сравнительный анализ предложенного метода с известными методами MPEG2 и MPEG4.*

**Ключевые слова:** трехмерное косинусное преобразование, видеoinформации, адаптивность, сложность, сканирование

#### Введение

Методы кодирования и декодирования изображений за последние десятилетия стали весьма актуальной областью исследований [1]. Главной задачей обработки видеoinформации является сокращение избыточности на изображениях и построение компактных форм представления изображений для хранения и передачи визуальных данных по каналу связи [2]. Важная объединяющая характеристика большинства изображений заключается в том, что имеются локальные области, где соседние пиксели сильно коррелированы и, следовательно, имеют избыточную информацию. Для более компактного и экономного представления изображения используются различные схемы декорреляции, которые разделяются на два класса: пространственные [3] и трансформационные (спектральные) [4].

Суть трансформационного кодирования изображений часто заключается в применении дискретного косинусного преобразования (ДКП) [5, 6], обеспечивающего хороший компромисс между способностью сжатия ви-

деоинформации и вычислительной сложностью. Наиболее распространенным стандартом является JPEG [7] — известная технология сжатия, использующая ДКП и достигающая высокой степени сжатия с меньшей потерей данных. Другим стандартом сжатия видео является MPEG [8], обеспечивающий лучший коэффициент сжатия видеоизображений с низкой скоростью передачи при высоком качестве восстановления.

В данной статье предлагается новый адаптивный метод кодирования и декодирования изображений на основе адаптивного трехмерного ДКП (АДКП-3D) с использованием модифицированной таблицы квантования для кубов различного размера [9].

В работе предложена методика оценки информационных показателей качества устройств сжатия изображений с использованием АДКП-3D. Предложенная методика использует модифицированную таблицу квантования и метод преобразования куба трехмерного изображения в одномерный массив (1D), обеспечивая лучшую эффективность кодирования путем изменения размера куба для ДКП с уче-

том пространственной корреляции в пределах одного кадра и временной межкадровой корреляции по времени. Для повышения производительности алгоритма сжатия изображений используется пирамидально-рекурсивный метод [10, 11] для определения неравномерной сетки, которая в дальнейшем и определяет размер кубов в последовательности кадров видеопотока. Результирующее 2D-изображение преобразуется в 3D-кубики, размеры которых определяются на основе типа изображения (низкая или высокая детализация). Затем ДКП-3D применяется к полученным кубам.

Параллельная реализация предложенного алгоритма используется для увеличения времени вычислений двумя способами: первый использует процесс распараллеливания вычислений с использованием SPMD (одна программа с несколькими данными), а другой метод использует графический процессор (GPU) с программно-аппаратной архитектурой параллельных вычислений (CUDA), которая позволяет существенно увеличить вычислительную производительность.

Производительность предложенного алгоритма оценивается с использованием некоторых наиболее часто используемых в литературе по сжатию тестовых изображений. Результаты тестирования показывают, что предложенный алгоритм превосходит несколько методов сжатия по соотношению сигнал/шум (PSNR) и скорости сжатия.

### Постановка задачи исследования

Оценка движения играет ключевую роль в каждом видеокоде. Например, в гибридном кодировании с компенсацией движения в известных кодеках, таких как кодеки семейства MPEG и H.26x. При этом движение напрямую влияет на временную точность прогнозирования и является основным фактором эффективности кодера. В предложенном методе кодирования на основе адаптивного косинусного преобразования движение также играет решающую роль, поскольку оно напрямую влияет на способ определения размера кубов и соответствующего коэффициента сканирования. Однако в АДКП-3D-кодировании движение может быть представлено явно в пространственно-временной области в виде вектора или неявно через параметры ориентации расположения доминантной энергии в пространственно-временном частотном пространстве.

Эта двойственность представления движения позволяет разработать два различных подхода к оценке вектора параметров ориентации, необходимых для оптимального размера кубов и способа сканирования коэффициентов ДКП.

Появление в последнее время технологии "система-на-кристалле" и современных САПР на базе репрограммируемых логических интегральных схем привело к формализованному учету сложности устройств кодирования и декодирования изображений. Кроме того, такая формализация была необходима для создания и развития новой элементной базы вычислительной техники в виде сложно-функциональных блоков в составе видеосистем-на-кристалле [12, 13].

Оптимизация алгоритмов кодирования и декодирования видеoinформации должна выполняться с учетом не только точности восстановления (среднеквадратического отклонения, СКО) и скорости создания кода ( $R$  — числа бит на пиксель), как принято в большинстве реализуемых на сегодняшний день алгоритмах, но и с учетом сложности устройств ( $W$ ) [13]. Эти три величины взаимосвязаны, и выбор оптимальных параметров устройств кодирования и декодирования необходимо осуществлять по критерию минимума целевой функции ( $P$ ), включающей весовые коэффициенты  $\{c_j\}$  этих трех информационных показателей качества: степени искажения восстановленных изображений ( $\Delta I$ ), скорости передачи ( $R$ ) и сложности устройств кодирования ( $W$ ) [14].

Таким образом, задача оптимизации при синтезе видеосистем-на-кристалле в целом сводится к поиску оптимальных значений информационных показателей качества при заданных соответствующих весовых коэффициентах, в то же время обеспечивающих минимум целевой функции [15]:

$$P = c_0 \Delta I(\varepsilon) + c_1 R(\varepsilon) + c_2 W_k(\varepsilon) + c_3 W_d(\varepsilon) \rightarrow \min.$$

Заметим, что определение множества решений с учетом ограничений для данной функции является труднейшим этапом всего процесса оптимизации при проектировании видеосистем из-за антагонистических и конфликтных ситуаций, в условиях вероятностной и нечеткой неопределенности статистических характеристик нестационарного источника изображений.

В данной работе решаются задачи:

- разработки адаптивного метода спектрального косинусного преобразования изобра-

жений, учитывающего пространственно-временную корреляцию видеопотоков, полученных из различных камер наблюдения на транспорте;

- определения информационных показателей качества системы кодирования изображений: СКО и скорости передачи ( $R$ );
- сравнения результатов исследований с известными методами кодирования и декодирования изображений (MPEG2 и MPEG4) для различных классов изображений транспортной системы наблюдения.

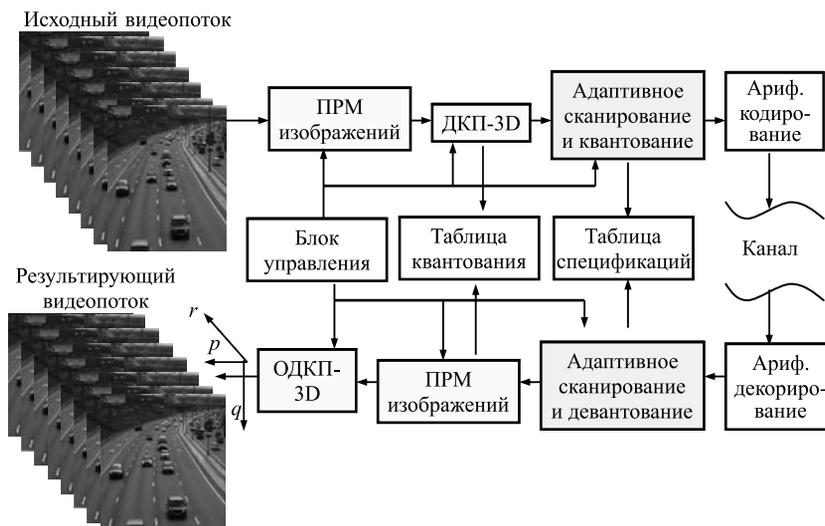


Рис. 1. Структурная схема устройства видеосистемы передачи изображений транспортных сюжетов

### Описание предложенного адаптивного метода ДКП-3D

Адаптивное трехмерное ДКП (АДКП-3D). ДКП представляет собой важный инструмент декорреляции из-за симметричности функции косинуса и осуществляет уплотнение энергии путем извлечения только необходимых коэффициентов частотной области сигнала. Другими словами, ДКП позволяет четко разделить исходное изображение на две области — высокочастотную и низкочастотную [1, 4].

Процесс кодирования и декодирования изображений включает четыре этапа (рис. 1).

#### Этап 1. Формирование неравномерной сетки ДКП

Для определения оптимальных размеров кубов, подвергающихся в дальнейшем АДКП-3D, проводится анализ пространственной корреляции локальных областей первого кадра куба и временной корреляции для определения числа кадров куба. Анализ пространственной корреляции и разбиение изображения на блоки различной формы и размера осуществляется на основе пространственно-рекурсивного метода (ПРМ) разбиения [10, 11, 13].

Анализ временной корреляции выполняется на основе сравнения спектральных коэффициентов ДКП кубов размера  $4 \times 4 \times 4$  в пределах кубов большего размера ( $32 \times 32 \times 32$  или  $64 \times 64 \times 64$ ).

Для определения типа движения и соответствующего числа кадров в кубе вычисляется разность ( $\Delta$ ) коэффициентов первого кадра и последнего и сравнивается с заданными пороговыми ( $\rho_1$  и  $\rho_2$ ):

- при  $\Delta \leq \rho_1$  — движение отсутствует, и ДКП по времени не выполняется;
- при  $\rho_1 \leq \Delta \leq \rho_2$  — движение слабое, и размер куба устанавливается равным  $16 \times 16 \times 16$ ;
- при  $\rho_2 \leq \Delta \leq \rho_3$  — движение среднее, и размер куба равен  $8 \times 8 \times 8$ ;
- при  $\Delta \geq \rho_3$  — движение сильное, и размер куба равен  $4 \times 4 \times 4$ .

#### Этап 2. ДКП-3D

Для заданной трехмерной последовательности пространственных данных  $\{X_{ijk}; i, j, k = 0, 1, \dots, N-1\}$  трехмерная последовательность данных ДКП-3D  $\{Y_{pqr}; p, q, r = 0, 1, \dots, N-1\}$  определяется по формуле:

а) для прямого АДКП-3D:

$$Y_{pqr} = E_p E_q E_r \sqrt{\frac{z}{N^3}} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} X_{ijk} \times \frac{\cos(2i+1)p\pi}{2N} \cdot \frac{\cos(2j+1)q\pi}{2N} \cdot \frac{\cos(2k+1)r\pi}{2N},$$

где  $E_x = \begin{cases} \sqrt{1/\sqrt{2}}, & \text{при } x = 0, \\ 1, & \text{при } x \neq 0, \end{cases}$  где  $x = p, q, r$ ;

б) для обратного ДКП-3D (ОДКП-3D):

$$X_{ijk} = \sqrt{\frac{z}{N^3}} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} Y_{pqr} \times \frac{\cos(2i+1)p\pi}{2N} \cdot \frac{\cos(2j+1)q\pi}{2N} \cdot \frac{\cos(2k+1)r\pi}{2N},$$

где значение  $z$  определяется размером куба.

Параллельная архитектура для вычисления АДКП-2D основана на методе декомпозиции фреймов строк и столбцов и использует один и тот же одномерный АДКП-1D модуль для всех трех измерений.

**Этап 3. Адаптивное сканирование и квантование**

С этапом квантования связано понятие визуальной избыточности. Важно на этом этапе, с одной стороны, учитывать взаимосвязь анизотропии яркостей и способа сканирования для достижения нужного коэффициента сжатия, а с другой стороны, сохранять качество при заданном уровне искажений. В работе в качестве исходных визуальных данных были взяты видеопотоки из различных камер наблюдения на дорогах мегаполиса. Вся видеоинформация транспортной специфики разделена на три группы в зависимости от типа движения и интенсивности транспортных средств (рис. 2).

В результате исследования большого объема видеоданных были сформулированы три класса видеопотоков: 1) видеопоток без движения; 2) видеопоток со средним движением; 3) видеопоток с высоким движением.

Адаптивное квантование выполнялось с пороговыми значениями, полученными с учетом статистических характеристик распределения спектральных коэффициентов и уровнями — в серединах интервалов квантования [16, 17]. По форме пространственного распределения спектральных коэффициентов ДКП и по оценке степени корреляции использованы следующие способы сканирования (рис. 2): горизонтальные, вертикальное и зигзагообразное. Если в пределах блока яркости пикселей не превышают заданного минимального порога, то ДКП не выполняется, и на этапе восстановления всем пикселям присваивается среднее значение яркости.

**Этап 4. Арифметическое кодирование**

Завершающим этапом процесса кодирования является энтропийное кодирование. Подобно сжатию неподвижных изображений [18] используется кодирование Хаффмана. После квантования и адаптивного сканирования все ненулевые коэффициенты подвергаются кодированию длин серии рядом с предшествующими нулевыми коэффициентами, т. е. используется кодирование длины пробоя [19]. Для 3D-коэффициентов ДКП были получены новые словари кодов (см. таблицу).

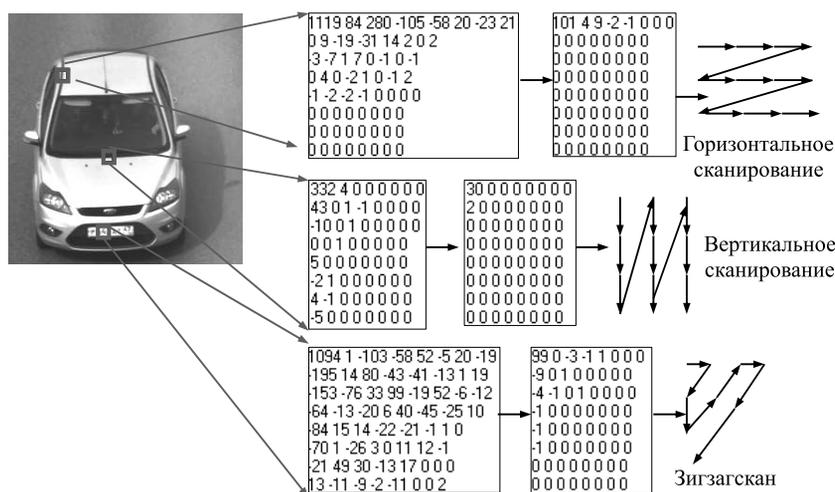


Рис. 2. Способы сканирования блоков ДКП изображений

Кодовые слова ДКП-3D

Значения		Коды		Длина
<0	>0	<0	>0	
0				0
-1	1	0	1	1
-1 -3	2,3	00,01	10,11	2
-7, -6, -5, -4	4,5,6,7	000,001,010,011	100,101,110,111	3
-15, ..., -8	8, ..., 15	0000, ..., 0111	1000, ..., 1111	4
-31, ..., -8	32, ..., 15	00000, ..., 01111	10000, ..., 11111	5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
-2047, ..., 1024	1024, ..., 2047	0000000000,...	...,1111111111	11

Коэффициент в верхнем левом углу матрицы коэффициентов ДКП называется DC-коэффициентом (direct current coefficient), а все остальные коэффициенты — AC-коэффициентами (alternating current coefficient).

Как упоминалось выше, в пределах одного блока (куба) коэффициенты переменного тока переупорядочиваются с помощью модифицированного адаптивного сканирования (рис. 2), затем выполняется кодирование длин серий, которое заканчивается идентификатором EOB (End-Of-Block), обозначающим конец блока.

Динамический диапазон коэффициентов ДКП превышает в 8 раз динамический диапазон значений пикселей исходного изображения. Например, при 8-битном представлении отсчетов изображения его динамический диапазон составляет 256 дискретных уровней (значения от 0 до 255), а динамический диапазон коэффициентов спектра ДКП — 2048 значений уровней (от 0 до 2048 для DC-коэффициентов и от  $-1023$  до  $+1024$  для AC-коэффициентов).

Кодирование коэффициентов ДКП в таком широком динамическом интервале потребует в последующих блоках MPEG-кодера перехода от 8-битного к 11-битному коду. Для предотвращения усложнения кодера после ДКП проводится сжатие динамического диапазона сигналов коэффициентов ДКП за счет увеличения шага квантования в 8 раз. Эта операция сводится к делению полученных в матрице значений коэффициентов ДКП на 8. Результат деления затем округляется до ближайших целых значений уровней новой шкалы квантования. Например, если исходное значение коэффициента ДКП было 22, то после деления на 8 ( $22/8 = 2,75$ ) и округления до ближайшего целого значения новое значение будет равно 3. При этом новый динамический интервал составит 256 дискретных уровней от  $-128$  до  $+127$ . Если размер куба для ДКП  $N = 8$ , следовательно, куб содержит от 0 до 255 AC-коэффициентов. Подобно DC-коэффициентам, весь интервал возможных значений делится на 11 подынтервалов (так как максимальное значение ДКП-коэффициента = 2047), и теоретически их значения варьируются от 0 до 2047 (см. таблицу).

Иными словами, положительные значения прямо кодируются их двоичным представлением, а отрицательные — так же, но с заменой ведущей 1 на 0.

Согласно обширному словарю кодов, менее распространенные значения AC представлены

широкими кодовыми словами (см. таблицу). Например, кодовое слово для субынтервала  $[8...15]$  имеет ширину 8 бит, для субынтервала  $[-31...15]$  требуется 10 бит и для субынтервала  $[-2047...2047]$  необходимо 22 бит.

### Результаты исследований различных транспортных видеопотоков

Эксперименты проводились над тремя различными транспортными видеопотоками: с малым движением; со средним движением; с высоким движением.

Основными преимуществами использования косинусного преобразования с переменным размером кубов как в пространстве сигнала, так и по времени являются следующие:

а) незначительное уменьшение СКО по сравнению с известными ДКП-3D и MPEGx. При этом скорость передачи видеoinформации почти не различается для всех кодеков и равна  $R = 0,01$  бит/пиксель (рис. 3), а коэффициент сжатия предложенного метода в 2...3 раза больше для случаев видеопотока со слабым и средним движением;

б) существенное снижение вычислительной сложности (в среднем в 4...5 раз) по сравнению с стандартом MPEG и увеличение в среднем в 1,5...2 раза по сравнению с известным косинусным преобразованием фиксированного размера блоков.

Потенциальным применением предлагаемого трехмерного адаптивного ДКП подхода

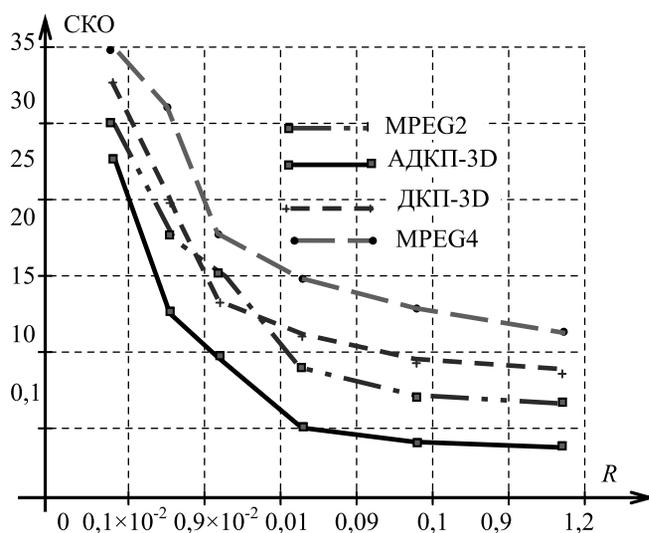


Рис. 3. Зависимость СКО от скорости передачи

могут быть портативные цифровые устройства, такие как мобильный телефон, беспилотники, интеллектуальные камеры наблюдения и др.

### Заключение

Сжатие изображений является чрезвычайно важной частью современных интеллектуальных транспортных видеосистем наблюдения. Имея возможность сжимать видеoinформации до доли их исходного размера, можно сэкономить ценное и дорогое дисковое пространство памяти. Кроме того, с появлением технологии "система-на-кристалле", передача изображений с мест чрезвычайных ситуации и аварий в диспетчерский центр управления в реальном времени становится возможным в современных вычислительных системах.

Из вышеприведенного исследования можно сделать следующие основные выводы:

1) предлагаемый метод на основе адаптивного косинусного преобразования принимает меньшее значение среднеквадратического отклонения, чем методы MPEG2, MPEG4 и классический метод косинусного преобразования без адаптации размеров кубов в 2...2,5 раза;

2) применение адаптивного способа определения размеров кубов для косинусного преобразования позволило увеличить коэффициент сжатия на 10...20 % при сохранении субъективного качества по сравнению с вышеуказанными методами;

3) полученные статистические характеристики и зависимости числа блоков различного размера, подвергающихся косинусному преобразованию, от степени однородности областей изображений позволяют уменьшить вычислительную сложность устройств кодирования и декодирования видеoinформации в транспортных системах наблюдения в 2...3 раза.

### Список литературы

1. **Gonzalez R. C., Woods R. E.** Digital Image Processing. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2008. P. 547—635.
2. **Sayood K.** Introduction to Data Compression. Amsterdam, Boston: Elsevier, 2006. P. 6—10.
3. **Крюкова М. С., Фахми Ш. С.** и др. Методы, алгоритмы кодирования и классификация изображений морских судов // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 1 (43). Т. 3. С. 145—155.
4. **Ричардсон Ян.** Вideoкодирование. H.264 и MPEG-4 — стандарты нового поколения. М.: Техносфера, 2005. 368 с.

5. **Фахми Ш. С., Зубакин И. А.** Адаптивный алгоритм кодирования видеoinформации на основе трехмерного дискретного косинусного преобразования // Изв. вузов России. Сер. Радиоэлектроника. 2010. Вып. 1. С. 49—54.

6. **Патент РФ № 2375838.** Способ кодирования и декодирования видеoinформации на основе трехмерного дискретного косинусного преобразования. Фахми Ш. С., Ибатуллин С. М. и др. Оpub. 10.12. 2009, Б. И. № 34.

7. **Wallace G. K.** The JPEG still picture compression standard // IEEE Transactions on Consumer Electronics. 1992. Vol. 38, N. 1. P. 18—34.

8. **Sikora T.** MPEG digital video-coding standards // IEEE Signal Processing Magazine. 997. Vol. 14, N. 5. P. 82—100.

9. **Mulla A., Baviskar J., Baviskar A., Warty C.** Image compression scheme based on zig-zag 3D-DCT and LDPC coding // Proc. International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics. 2014. P. 2380—2384.

10. **Фахми Ш. С., Альмахрук М. М., Соколов Ю. М., Бобровский А. И., Еид М. М., Салем А.** Точность, скорость и сложность устройств кодирования изображений по опорным точкам // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16, № 4. С. 678—689.

11. **Фахми Ш. С., Альмахрук М., Салем А., Бобровский А. И., Еид М. М.** Информационные показатели качества устройств кодирования по опорным точкам // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2016. Вып. 3. С. 86—91.

12. **Фахми Ш. С., Соколов Ю. М.** Видеосистемы на кристалле: новые решения в задачах обработки видео // XXIV межд. науч. метод. конф. "Современное образование: содержание, технологии, качество" "Современное образование: содержание, технологии, качество". СПб., СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 21 апреля. 2018. Т. 2. С. 17—19.

13. **Фахми Ш. С.** Концепция проектирования интеллектуальных транспортных видеосистем на основе технологии "система на кристалле" // Журнал университета водных коммуникации. 2013. Вып. II (XVIII). С. 79—88.

14. **Моисеев Н. Н.** Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981. 488 с.

15. **Фахми Ш. С., Цыцулин А. К., Колесников Е. И., Очкур С. В.** Функционал взаимнообмена сложности и точности систем кодирования непрерывного сигнала // Информационные технологии. 2011. № 4. С.71—77.

16. **Lee M. C., Chan K. W., Adjeroh D. A.** Quantization of 3D-DCT coefficients and Scan Order for Video Compression // Journal of visual communication and image representation. 1997. Vol. 8, N. 4. P. 405—422.

17. **Bozinovic N., Konrad J.** Scan order and quantization for 3D-DCT coding // S&T/SPIE Symposium on Image and Video Communications and Proc. Jul. 8—11, 2003.

18. **Mehanna A., Aggoun A., Abdulfatah O., Swash M. R., Tseklevs E.** Adaptive 3D-DCT based compression algorithms for integral images // Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. 2013. P. 1—5.

19. **Priyadarshini K. S., Sharvani G. S.** A survey on parallel computing of image compression algorithms // Proc. International Conference, Computational Systems for Health & Sustainability. April 2015. P. 178—183.

Y. A. Hasan<sup>1</sup>, Postgraduate, e-mail: midocom@mail.ru,  
N. G. Ryzhov<sup>1</sup>, Assistant Professor, e-mail: ngryzhov@mail.ru,  
Sh. S. Fahmi<sup>1,2</sup>, Professor, e-mail: shakeebf@mail.ru,  
E. V. Kostikova<sup>3</sup>, Assistant Professor, e-mail: kostikovaev@mail.ru,

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

<sup>2</sup>Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences

<sup>3</sup>Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

## Adaptive Method of Spectral Transformation of Video Information of Transport Images

*Proposed the method of coding and decoding video data based on adaptive three-dimensional discrete cosine transform (3D-DCT), provide increased efficiency of operation of the transfer device and reduction of information quality, systems: distortion levels, bit rate, and complexity encoders. To improve the performance of the image compression algorithm, the classification of transport subjects by type of motion is used. The results of testing the algorithm and a comparative analysis of the proposed method with the known methods MPEG2 and MPEG4 are obtained.*

**Keywords:** three-dimensional cosine transformation, video information, adaptability, complexity, scanning

DOI: 10.17587/it.25.39-45

### References

1. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing, Upper Saddle River, N.J, Prentice Hall, 2008, pp. 547–635.
2. Sayood K. Introduction to Data Compression, Amsterdam, Boston, Elsevier, 2006, pp. 6–10.
3. Kryukov M. S., Fahmy S. S. et al. Methods, algorithms of coding and classification of images of sea vessels, *Marine Intelligent Technologies*, 2019, vol.3, no. 1 (43), pp. 145–155 (in Russian).
4. Richardson Ian. Video coding. H. 264 and MPEG-4 — new generation standards. Moscow, Technosphere, 2005, 368 p. (in Russian).
5. Fahmi Sh. S., Zubakin I. A. Adaptive algorithm of video information coding based on three-dimensional discrete cosine transformation, *Izv. University of Russia. Ser. Radionics*, 2010, iss. 1, pp. 49–54 (in Russian).
6. Patent RF № 2375838. Method of encoding and decoding video based on three-dimensional discrete cosine transformation, Fahmy sh. S., Ibatullin S. M. et al, Pub. 10.12, 2009, B. I. № 34 (in Russian).
7. Wallace G. K. The JPEG still picture compression standard, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Feb. 1992, vol. 38, no. 1, pp. 18–34.
8. Sikora T. MPEG digital video-coding standards, *IEEE Signal Processing Magazine*, Sep. 1997, vol. 14, no. 5, pp. 82–100.
9. Mulla A., Baviskar J., Baviskar A., Warty C. Image compression scheme based on zig-zag 3D-DCT and LDPC coding, *Proc. International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics*, 2014, pp. 2380–2384.
10. Fahmi Sh. S., Almagro M. M., Sokolov Yu. M., Bobrowski A. I., Eid M. M., Salem A. Precision, speed and complexity of the device coding of images using control points, *Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 678–689 (in Russian).
11. Fahmi Sh. S., Almagro M., Salem, A., Bobrovsky A. I., Uom M. M. Information measure of the quality of encoders at the pivot points, *Questions of radio electronics, ser. Television engineering*, 2016, vol. 3, pp. 86–91 (in Russian).
12. Fahmi Sh. S., Sokolov Y. M. Video systems on chip: new solutions in the tasks in video processing, *The XXIV int. science. method. Conf. "Modern education: content, technology, quality Modern education: content, technology, quality*, SPb., SPbGETU "LETI", April 21, 2018, vol. 2, pp. 17–19 (in Russian).
13. Fahmi Sh. S. the Concept of designing intelligent transport video systems based on the technology "system on a chip", *Journal of the University of water communications*, 2013, iss. II (XVIII), pp. 79–88 (in Russian).
14. Moiseev N. N. Mathematical problems of system analysis. Moscow, Science, 1981, 488 p. (in Russian).
15. Fahmi Sh. S., Sycolin A. K., Kolesnikov E. I., Occur S. V. The functionality of the interchange complexity and accuracy of coding systems a continuous signal, *Informacionnye Tekhnologii*, 2011, no. 4, pp. 71–77 (in Russian).
16. Lee M. C., Chan K. W., Adjero D. A. Quantization of 3D-DCT coefficients and Scan Order for Video Compression, *Journal of visual communication and image representation*, 1997, vol. 8, no. 4, pp. 405–422.
17. Bozinovic N., Konrad J. Scan order and quantization for 3D-DCT coding, *S&T/SPIE Symposium on Image and Video Communications and Proc.*, Jul. 8–11, 2003.
18. Mehanna A., Aggoun A., Abdulfatah O., Swash M. R., Tseklevs E. Adaptive 3D-DCT based compression algorithms for integral images, *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, 2013, pp. 1–5.
19. Priyadarshini K. S., Sharvani G. S. A survey on parallel computing of image compression algorithms, *Proc. International Conference, Computational Systems for Health & Sustainability*, April 2015, pp. 178–183.