

УДК 004.627.5

Н.С. Агеева

РАЗРАБОТКА ВЗАИМОУВЯЗАННОЙ СИСТЕМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА МЕТОДОВ СЖАТИЯ ВИДЕОДАНЫХ ДЛЯ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Агеева Нина Сергеевна, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории Военной академии связи им. С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург; соискатель Военной академии связи. Окончила инженерно-физический факультет Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Имеет публикации и патенты в области кодирования и декодирования подвижных изображений. [e-mail: n.4geeva@gmail.com].

Аннотация

В работе на основе проведённого анализа основных существующих методов и алгоритмов кодирования видеоданных разработана взаимосвязанная система показателей качества методов сжатия видеоданных. Подобная система показателей качества имеет важное значение для формирования и передачи видеоинформации в системах, функционирующих в режиме времени, близком к реальному. Такими системами могут быть, например, системы передачи данных с борта беспилотного летательного аппарата на наземный пункт управления (НПУ). Приводятся результаты исследования проведённого в работе математического моделирования методов и алгоритмов сжатия видеоданных, позволяющие проводить анализ взаимного влияния критериев качества, а также их влияние на качество полученных видеоданных на НПУ.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, сжатие видеоданных, восстановление видеоданных, неортогональное преобразование, ортогональное преобразование, фрактальное преобразование видеоданных, косинусное преобразование, вейвлет-преобразование, идентификация подвижных объектов, система показателей качества преобразования видеоданных, каналы связи, энтропийное кодирование, энтропийное декодирование.

DEVELOPING AN INTERCONNECTED SYSTEM OF QUALITY METRICS OF VIDEO DATA COMPRESSION METHODS FOR REAL-TIME SYSTEMS

Nina Sergeevna Ageeva, Junior Research Assistant of the Research Laboratory at S.M. Budyonny Military Communication Academy; graduated from the Faculty of Engineering and Physics of St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; an author of articles and patents in the field of coding and decoding of mobile image. e-mail: n.4geeva@gmail.com.

Abstract

The paper is concerned with an interconnected system of quality metrics (SQM) of video data compression methods. The system was developed on the basis of the analysis of the main existing methods and algorithms for video data coding. The system of quality parameters is important for formation and transmission of video data in systems working in time close to real. For example, such systems could be systems of data transmission from aboard an unmanned aerial vehicle (UAV) to a ground control post (GCP). The paper presents the research results of mathematical modeling methods and video data compression algorithms enabling analysis of the mutual impact of quality metrics and also their impact on the quality of video data obtained at the GCP.

Key words: unmanned aerial vehicles, video data compression, video data reconstruction, non-orthogonal transformation, orthogonal transformation, fractal video data transformation, cosine transform, wavelet decomposition, identification of mobile objects, system of quality metric of video data compression, telecommunication channels, entropy coding, entropy decoding.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БЛА) находят все более широкое применение при решении различных задач, таких как составление картографических планов местности, ведение пожарной разведки, сбор метеоданных и др. [1].

В процессе полета видеоданные, полученные от видеодатчиков БЛА, передаются на наземный пункт управления (НПУ) в режиме, близком к режиму реального времени. Эти видеоданные в процессе передачи подвергаются процедурам кодирования и декодирования с целью уменьшения информационной избыточности. Необходимость сжатия видеоизображений обуславливается реальными

пропускными способностями каналов передачи данных, наличием различного рода помех в каналах связи, а также особенностями применяемых пакетных протоколов сетевого уровня [2]. Методы и алгоритмы сжатия и кодирования видеоданных должны отвечать различным, иногда противоречивым, требованиям. Например, необходимость увеличения показателей помехоустойчивости приводит к увеличению избыточной передаваемой информации, а требования работы в режиме реального времени приводят к необходимости ее уменьшения. Следовательно, разнообразие методов сжатия видеоизображений для различных условий их передачи по каналам связи приводит к необходимости создания взаимосвязанной системы показателей качества (СПК) для методов и алгоритмов сжатия и кодирования передаваемой видеoinформации с борта БЛА на НПУ. Таким образом, разработка СПК для подобных методов и алгоритмов является весьма актуальной научно-технической задачей.

Анализ основных существующих методов сжатия видеоданных

Существуют различные алгоритмы сжатия видеоданных, позволяющие обеспечить согласование пропускной способности каналов связи и необходимую информационную скорость передачи информации. Например, к таким алгоритмам можно отнести различного рода многомерные ортогональные и неортогональные преобразования видеоизображений.

Одним из основных методов неортогонального преобразования является фрактальное сжатие видеоданных, которое имеет высокий показатель степени сжатия (коэффициент сжатия) видеоданных, приблизительно равный $1,2 \div 2 \times 10^3$. Это преобразование требует больших вычислительных и временных затрат при кодировании, что затрудняет его применение в системах реального времени [3, 4].

Другие известные алгоритмы основываются на ортогональных преобразованиях, таких как дискретное косинусное преобразование (ДКП) и дискретное вейвлет-преобразование (ДВП). Коэффициент сжатия данных ортогональных преобразований лежит в диапазоне $4,5 \div 5$ [5]. Вместе с тем, они требуют относительно небольших временных и вычислительных затрат для своей реализации, что делает их весьма привлекательными для применения в системах реального времени. Отметим, что алгоритмы сжатия ДКП и ДВП являются основой международных стандартов JPEG и JPEG 2000.

Алгоритм ДКП позволяет представить видеоизображение в виде суммы синусоид с различными амплитудами, частотами и фазами. В общем виде ДКП исходного массива данных $D(i, j)$, $u=0,1,\dots, N-1$ и $v=0,1,\dots, N-1$, определяется согласно выражению 1 [6]:

$$D(i, j) = \frac{1}{\sqrt{2N}} C(i)G(j) \times \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} p(x, y) \cos \left[\frac{(2x+1)i\pi}{2N} \right] \cos \left[\frac{(2y+1)j\pi}{2N} \right], \quad (1)$$

$$\text{где } N = 8 \text{ и } C(k) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & \text{если } k = 0 \\ 1, & \text{если } k > 0 \end{cases}.$$

Местоположение пикселя $p(x, y)$ с координатами (x, y) в блоке $i \times j$, $x, y \in [0 \dots 7]$ [7, 8].

В матричном виде ДКП записывается в виде:

$$I_1 = M \cdot I \cdot M^T, \quad (2)$$

где I_1 – изображение после ДКП;

I – матрица изображения $n \times n$;

M – матрица коэффициентов преобразования ДКП;

M^T – транспонированная матрица коэффициентов преобразования ДКП.

При декодировании (восстановлении) видеоизображения данный алгоритм выполняется в обратном порядке.

Алгоритм ДВП позволяет разложить яркостную и цветовую функции видеосигнала по компактным базисным функциям для различных частот и сдвигов по времени компонент видеоизображения, что позволяет локализовать временные и локально-пространственные особенности видеосигнала.

ДВП вычисляется с помощью масштабирующих множителей, которые равны отрицательным степеням числа 2, и временных сдвигов, которые равны положительным степеням числа 2. Например, в работе [9] рассматривается ДВП на примере вейвлетов Добеши ($D4$). В общем случае, ДВП имеет вид:

$$W_\varphi(j_0, i, j) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \varphi_{j_0, m, n}(x, y),$$

$$W_\psi^i(j_0, i, j) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \psi_{j_0, m, n}^i(x, y), \quad (3)$$

$$i = \{H, V, D\}$$

где j_0 – произвольный начальный масштаб;

$W_\varphi(j_0, i, j)$ – коэффициенты, определяющие приближение функции $f(x, y)$ в масштабе j_0 ;

$W_\psi^i(j_0, i, j)$ – коэффициенты, определяющие горизонтальные, вертикальные и диагональные детали для масштабов $j \geq j_0$;

H, V, D – вейвлеты, измеряющие вариации значений функции – изменения яркости для изображений вдоль столбцов, вдоль строк и вдоль диагоналей соответственно [10, 11].

ДВП в матричном виде определяется согласно выражению:

$$I_2 = D4 \cdot I \cdot D4^T, \quad (4)$$

где I_2 – изображение после ДВП;

I – матрица изображения фиксированного размера – 8×8 ;

$D4$ – матрица коэффициентов преобразования ДВП;

$D4^T$ – транспонированная матрица коэффициентов преобразования ДВП.

Для декодирования изображения алгоритм выполняется в обратном порядке.

Анализ рассмотренных процедур сжатия видеоизображений позволяет сделать вывод о том, что выбор методов, алгоритмов и параметров сжатия видеоданных представляет собой решение многокритериальной многопараметрической задачи, и подобное решение всегда является компромиссом различных требований.

РАЗРАБОТКА ВЗАИМУВЯЗАННОЙ СИСТЕМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ДЛЯ ПРОЦЕДУР СЖАТИЯ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ

Основные требования к процедурам сжатия приведены на рисунке 1 в виде системы показателей качества процедуры кодирования.

Оптимизация системы показателей качества для процедуры кодирования видеоданных может быть проведена на основе решения нечеткой задачи математического программирования, имеющей следующий общий вид:

$$\begin{cases}
 K_c \rightarrow \max \\
 \text{при ограничениях:} \\
 \left\{ \begin{array}{l}
 K_{иск} \leq K_{иск. доп}, \\
 V_k \geq V_{к. доп}, \\
 P_{ош} \leq P_{ош. тр.}
 \end{array} \right.
 \end{cases} \quad (5)$$

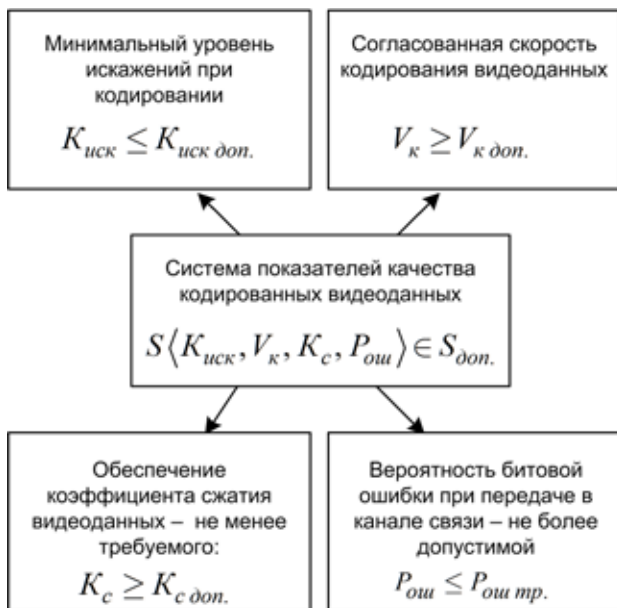


Рис.1. Система показателей качества процедуры кодирования

Решение данной оптимизационной задачи нелинейного программирования может быть найдено на основе применения теоремы Каруша-Куна-Таккера [12].

Требования к процедурам сжатия и видеокодекам, применяемым при передаче данных с борта БЛА на НПУ, определяются с учетом статистических и спектральных

свойств передаваемых видеоданных. Эти особенности можно разделить на следующие группы:

- видеоизображения подвижных объектов размером 1080×1920 пикселей и частотой следования кадров 10÷25 кадров/с. Подобная информация позволяет получить общее представление о наземной обстановке. Передача видеоизображений с малым разрешением может осуществляться с использованием стандартов сжатия, реализованных, например, в видеокодеках стандартов H.264, H.265, JPEG2000, MPEG-4;

- неподвижные изображения с разрешением 5–25 Мпикс и более. Позволяют детально изучить объект наблюдения. Скорость передачи этих данных составляет 1÷3 кадра/с;

- видеоданные инфракрасного диапазона (тепловизоров). Позволяют идентифицировать объекты, когда визуальная разведка затруднена. Данные в инфракрасном диапазоне должны передаваться без использования сжатия, так как возможна потеря информации.

Таким образом, к основным требованиям, предъявляемым к алгоритмам сжатия и видеокодекам, применяемым при передаче видеоданных с борта БЛА, можно отнести:

- обеспечение необходимого коэффициента сжатия видеоданных, который определяется как:

$$K_{сж} = \frac{24 \cdot P \cdot N \cdot f_k}{V_{KC}} \quad (6)$$

где P и N – размеры изображения в пикселях;

f_k – частота передачи кадров;

V_{KC} – скорость передачи данных по каналу связи [12];

- обеспечение заданного качества восстановленных на приеме видеоданных.

Качество восстановленных изображений определяется по критерию PSNR (*Peak Signal – to – Noise Ration*), то есть как отношение между максимумом возможного значения сигнала и мощностью шума, искажающего значения видеосигнала [9].

$$PSNR = 20 \log_{10} \frac{\max_i |P_i|}{RMSE} \quad (7)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2,$$

где P_i – пиксели исходного видеоизображения;

Q_i – пиксели восстановленного видеоизображения;

MSE – значение среднеквадратической ошибки;

$RMSE$ – корень квадратный из значения среднеквадратической ошибки;

- обеспечение необходимой устойчивости сжатых видеоданных к ошибкам в каналах связи, которая определяется как PSNR восстановленного изображения на приеме в условиях моделирования ошибок в канале связи

$$P_{ош} = 10^{-4} [13].$$

При определении требований к качеству восстанавливаемых на приеме видеоизображений необходимо учитывать, что оператор НПУ должен иметь возможность

идентифицировать малоразмерные объекты. Например, для видеоизображений объемом 5 Мпикс, при высоте полета БЛА около 150 м идентификация объектов размером $M \times N$ возможна при четырехкратном или восьмикратном пиксельном увеличении изображения, в результате которого возникшие на этапе кодирования неточности становятся заметны. Следовательно, необходимо также задать требования к качеству восстановленного изображения по критерию PSNR.

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для проведения математического моделирования использовался математический пакет Matlab. В качестве исходных данных использовались изображения формата JPEG размером 1920×1080 пикселей.

Анализ результатов проведенного математического моделирования позволяет сделать вывод, что при качестве восстановления видеоизображения с параметром

PSNR = 35 дБ и более (рис. 2) восьмикратное увеличение исследуемого изображения позволяет проводить идентификацию объектов наблюдения.

Для передачи видеоконтента с борта БЛА используются каналы связи диапазона сантиметровых длин волн ($f_n = 2 \div 10$ ГГц) [14]. Особенностью таких каналов связи является их высокая информационная емкость, а также особенности распространения электромагнитных волн данного диапазона, которые состоят в том, что даже небольшие препятствия на пути распространения сигнала приводят как к одиночным ошибкам, так и к трекам ошибок. Проведенное численное моделирование показало, что длина треков ошибок в среднем составляет 10–12 бит, количество треков ошибок по всей битовой последовательности кодовый блок составляет 40–50, при восьмикратном сжатии изображения с разрешением 5 Мпикс, откуда следует, что вероятность битовой ошибки $P_{ои} = 10^{-4}$. В перспективных комплексах БЛА необ-



а) Исходное изображение



Фрагмент исходного изображения, увеличенного в 8 раз



б) восстановленное на приеме изображение
 $PSNR = 35,5$ [дБ]



Фрагмент исходного изображения, увеличенного в 8 раз
 $PSNR = 35,5$ [дБ]

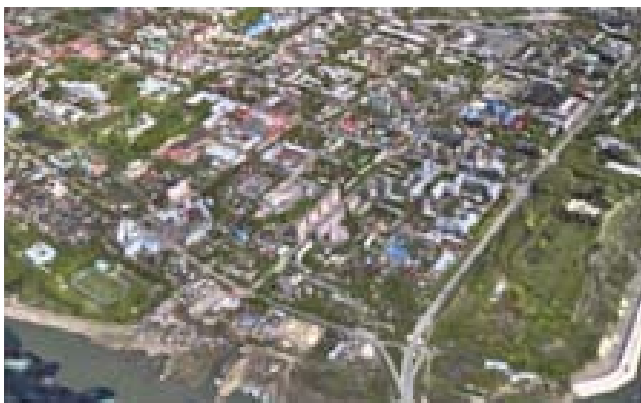


в) восстановленное на приеме изображение
 $PSNR = 30,5$ [дБ]

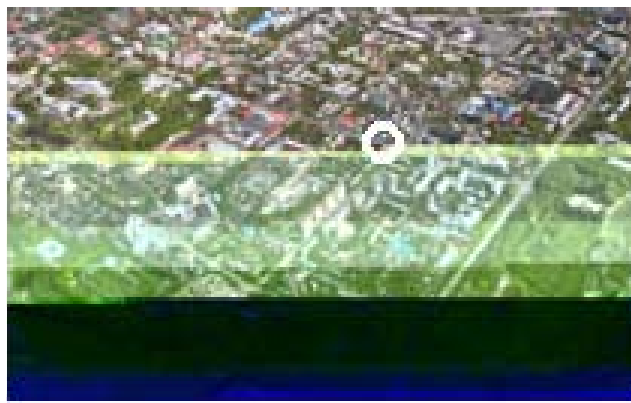


Фрагмент исходного изображения, увеличенного в 8 раз
 $PSNR = 30,5$ [дБ]

Рис. 2. Пример исходного и восстановленного изображений



Исходное изображение



Изображение, восстановленное алгоритмом JPEG (белым обозначено место возникновения ошибки)

Рис. 3. Пример исходного и восстановленного изображений при возникновении одиночных ошибок

ходимо обеспечить устойчивость передачи устойчивого видеоконтента со средней вероятностью битовой ошибки $P_{ош} = 10^{-2} \div 10^{-3}$.

Особенностью существующих видеокодеков является использование энтропийного кодирования на заключительном этапе обработки видеоданных. В результате наличие одиночных ошибок в канале связи приведет к их размножению при обратном энтропийном декодировании на приеме. Пример возникновения треков ошибок показан на рисунке 3.

Выводы

Разработанная взаимосвязанная система показателей качества позволяет провести выбор рациональных параметров процедур сжатия и кодирования видеоизображений как на этапе проектирования данных алгоритмов, так и при их эксплуатации с помощью методов их параметрической настройки.

Так, например, основными требованиями к видеокодекам, применяемым при передаче данных с борта БЛА, являются:

- распознавание должно быть не хуже $PSNR = 35$ [дБ] и выше в зависимости от решаемых задач;
- возможность устойчивой передачи изображений по каналам связи с произвольным законом распределения ошибок со средней вероятностью $P_{ош} = 10^{-2} \div 10^{-3}$;
- защита передаваемых сообщений от подмены и перехвата;
- обеспечение необходимого коэффициента сжатия видеоданных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов Д.Я. Методы ролевого интеллекта для управления группами малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2011. – № 3, Т. 116. – С. 221–229.
2. Боев Н.М. Анализ командно-телематической радиоперехватной связи с беспилотными летательными аппаратами

// Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева. – 2012. – № 2 (42). – С. 86–91.

3. Колешин В.Г., Крапивенко А.В. Результаты фрактального сжатия изображений при различных формах ранговых областей // Труды МАИ. – 2009. – № 36. – С. 1–13. – URL: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=10887> (дата обращения 10.06.2016).

4. Илюшин С.В. Ускорение фрактального сжатия изображений путем классификации блоков по полярному углу их центров масс // Т-Comm-Телекоммуникации и транспорт. – 2011. – № 4. – С. 43–47.

5. Богданов П.А. Использование WAVELET-преобразования в алгоритме сжатия изображения JPEG // Т-Comm-Телекоммуникации и транспорт. – 2011. – № 9. – С. 32–36.

6. Ахмед Н., Рао К. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов [пер. с англ.] / под ред. И.Б. Фоменко. – М.: Связь, 1980. – 248 с.

7. Raid A.M., Khedr W.M., El-dosuky M.A., Wesam Ahmed. JPEG image Compression using discrete cosine transform - a survey // International Journal of Computer Science & Engineering Survey (IJCSSES). – April 2014. – Vol. 5. – № 2. – pp. 39–47.

8. Сжатие изображений с использованием дискретного косинусного преобразования адаптивного определенного размера блока на основании дисперсии: пат. 2273112 РФ. – № 202115290/09; заявл. 8.11.2000; опубл. 27.06.2006, Бюл. № 9.

9. Сэлмон Д. Сжатие данных, изображений и звука. – М.: Техносфера, 2006, 368 с.

10. Chun Lin Liu A tutorial of the wavelet transform // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2010. – Vol. 40.

11. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: И. Техносфера, 2012. – 1104 с.

12. Карманов В.Г. Математическое программирование: учеб. пособие. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат.-лит., 1986. – 288 с.

13. Цветков В.В., Оков И.Н., Устинов А.А. Устойчивый к канальным ошибкам видеокодеков подвижных изображений

жений на основе трехмерного ортогонального преобразования с обеспечением конфиденциальности и аутентификации передаваемых видеоданных // Информациа и космос. – 2015. – № 2. – С. 52–59.

14. STANAG 4609 / AEDP-8. NATO Digital Motion Imagery Format. – URL: <http://docplayer.net/7371542-Nato-unclassified-stanag-4609-edition-3.html> (дата обращения 03.06.2016).

REFERENCES

1. Ivanov D.Ia. Metody rolevogo intelekta dlia upravleniia gruppami malorazmernykh bespilotnykh letatelnykh apparatov [Methods of Swarm Intelligence for Control of Groups of Small-Sized Unmanned Aerial Vehicles]. *Izvestiia Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proc. of Southern Federal University. Engineering Sciences], 2011, no. 3, vol. 116, pp. 221–229.
2. Boev N.M. Analiz komandno-telematicheskoi radiolinii svyazi s bespilotnymi letatelnyimi apparatami [Analysis of UAV Radio Control and Telemetry Systems]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akad. M.F. Reshetneva* [Vestnik SibGAU], 2012, no. 2 (42), pp. 86–91.
3. Koleboshin V.G., Krapivenko A.V. Rezultaty fraktalnogo szhatiia izobrazhenii pri razlichnykh formakh rangovykh oblastei [Research Results of Image Fractal Compression with Different Rank Fields]. *Trudy MAI* [Proc. of Moscow Aviation Institute], 2009, no. 36, pp. 1–13. Available at: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=10887> (accessed 10.06.2016).
4. Ilyushin S.V. Uskorenie fraktalnogo szhatiia izobrazhenii putem klassifikatsii blokov po poliarnomu uglu ikh tsevtrov mass [Speed-Up in Fractal Image Coding by Means of Classification]. *T-Comm-Telekommunikatsii i transport* [T-Comm. Telecommunications and Transport], 2011, no. 4, pp. 43–47.
5. Bogdanov P.A. Ispolzovanie WEVELET-preobrazovaniia v algoritme szhatiia izobrazheniia JPEG [WEVELET-Transform used for JPEG-Image Compression Algorithm]. *T-Comm-Telekommunikatsii i transport* [T-Comm. Telecommunications and Transport], 2011, no. 9, pp. 32–36.
6. Ahmed N., Rao K. *Ortogonalnye preobrazovaniia pri obrabotke tsifrovyykh signalov*. Pod red. I.B. Fomenko [Orthogonal Transforms for Digital Signal Processing. Edited by I.B. Fomenko]. Moscow, Sviyaz Publ., 1980. 248 p.
7. Raid A.M., Khedr W.M., El-dosuky M.A., Wesam Ahmed. JPEG image Compression Using Discrete Cosine Transform - A Survey. *International Journal of Computer Science & Engineering Survey (IJCSES)*, vol. 5, no. 2, April 2014, pp. 39–47.
8. *Szhatie izobrazhenii s ispolzovaniem diskretnogo kosinusnogo preobrazovaniia adaptivnogo opredelennogo razmera bloka na osnovanii dispersii* [Image Compression Using Discrete Cosine Transform of the Adaptive Unit with a Specified Size on the Basis of Dispersion]. 2273112 Patent RF, no. 202115290/09, Date of filing: November 08, 2000. Date of publication: June 27, 2006, Bull. no. 9.
9. Salomon D. *Szhatie dannykh, izobrazhenii i zvuka* [Data Compression Methods]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 368 p.
10. Chun Lin Liu. A Tutorial of the Wavelet Transform. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2010, vol. 40.
11. Gonzalez R., Woods R. *Tsifrovaia obrabotka izobrazhenii* [Digital Image Processing]. Moscow, I. Tekhnosfera Publ., 2012. 1104 p.
12. Karmanov V.G. *Matematicheskoe programmirovaniie*. Ucheb. Posobie. 3-e izd., pererab. i dop. [Mathematical Programming. Textbook, 3rd, revised and corrected edition]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 288 p.
13. Tsvetkov V.V., Okov I.N., Ustinov A.A. Ustoichivyi k kanalnym oshibkam videokodek podvizhnykh izobrazhenii na osnove trekhmernogo ortogonalnogo preobrazovaniia s obespecheniem konfidentsialnosti i autentifikatsii peredavaemykh videodannykh [The Animated Image Video Codec, Tolerant to Channel Errors on the Basis of Three-Dimensional Orthogonal Transformation with Ensuring Confidentiality and Authentication of the Transferred Video Data]. *Informatsiia i kosmos* [Informacia i Kosmos Magazine], 2015, no. 2, pp. 52–59.
14. STANAG 4609 / AEDP-8. NATO Digital Motion Imagery Format. Available at: <http://docplayer.net/7371542-Nato-unclassified-stanag-4609-edition-3.html> (accessed 03.06.2016).