

УДК 004.932

МЕТОД СЖАТИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ БЕЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Петров Е.П., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой радиоэлектронных средств Вятского государственного университета (ВятГУ), e-mail: EPPetrov@mail.ru;

Харина Н.Л., к.т.н., доцент кафедры радиоэлектронных средств ВятГУ, e-mail: NataL_res@mail.ru;

Сухих П.Н., аспирант кафедры радиоэлектронных средств ВятГУ, e-mail: raznodel@yandex.ru.

METHOD OF DIGITAL IMAGES COMPRESSION WITHOUT SPECTRAL TRANSFORMATIONS

Petrov E.P., Kharina N.L., Sukhikh P.N.

Nowadays some applications demand new methods of digital images (DI) compression which do not concede by the efficiency to the well-known methods (JPEG, JPEG2000), but demand smaller computing resources. In this work a method of compression of DI meeting the specified requirements is offered. The method provides division of a digital image into binary images (BI). Each BI is considered as a two-dimensional Markov process with two states. On the basis of the theory of conditional Markov processes a prediction of BI elements is carried out. For BIs containing low order bits preliminary separation and the removal of areas containing the background similar with the white gaussian noise (WGN) is carried out. These areas are filled with WGN selections in case of restoration. The method does not concede to the traditional methods of compression (JPEG) as for the quality/compression ratio with minimum of computing resources. It allows to work with multidigital images (8 and more) without increase in time of compression due to parallel processing of the BIs.

Keywords: digital images, image compression, binary image, Markov process, matrix of transitions probabilities, statistical characteristics, casual background, white Gaussian noise, coding of images.

Ключевые слова: цифровые изображения, сжатие изображений, марковский процесс, матрица вероятностей переходов, статистические характеристики, случайный фон, белый гауссовский шум, кодирование изображений.

Введение

В настоящее время использование цифровых изображений (ЦИ) в различных сферах деятельности, таких как телевидение, медицина, геодезия, картография, системы мониторинга и т.п. привело к необходимости использования различных методов сжатия ЦИ. Существующие методы сжатия, такие как H264, H265, JPEG, JPEG2000 успешно справляются с этой задачей [1-4]. Однако существует ряд приложений, где использование этих методов не всегда возможно из-за ограничений на вычислительные и энергетические ресурсы, например, системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), формирующие на борту космического аппарата (КА) огромные объемы информационных потоков, значительная часть которых связана с передачей цифровых изображений (ЦИ). Необходимость применения компрессии видеoinформации на борту КА обусловлена использованием датчиков, обеспечивающих съемку земной поверхности в различных спектральных диапазонах с максимально возможным пространственным разрешением. В настоящее время для кодирования ЦИ используются различные алгоритмы, базирующиеся на следующих основных методах: BTC (усеченное блочное

В настоящее время в некоторых приложениях необходимы новые методы сжатия цифровых изображений (ЦИ), не уступающие по своей эффективности известным методам (JPEG, JPEG2000), но требующие меньших вычислительных ресурсов. Предлагается метод сжатия ЦИ, удовлетворяющий указанным требованиям. Метод основан на разделении ЦИ на разрядные двоичные изображения (РДИ) и представлении РДИ двумерной цепью Маркова с двумя состояниями. На основе теории условных марковских процессов выполняется предсказание состояний пикселей РДИ. Для младших РДИ выполняется процедура удаления фона, близкого по своим статистическим характеристикам к белому гауссовскому шуму (БГШ). Эти области заполняются выборками БГШ при восстановлении. Предложенный метод не требует спектральных преобразований и позволяет осуществлять сжатие ЦИ любой разрядности (8 и более на цветовую плоскость) без увеличения вычислительных ресурсов за счет возможности параллельной обработки.

кодирование), ДИКМ (дифференциальная импульсно-кодовая модуляция), DCT (дискретное косинусное преобразование), DWT (дискретное вейвлет-преобразование) [1, 2]. Большинство современных КА обладают энергетическими возможностями для обеспечения непрерывного режима передачи информации, которые требуют больших вычислительных ресурсов на борту КА. Намечившаяся в последнее время тенденция на «миниатюризацию» космических средств наблюдения (малые спутники) ведет к ужесточению требований к эффективности использования энергетических ресурсов, и не всегда позволяет реализовать вышеперечисленные методы сжатия ЦИ, особенно ЦИ с большим разрешением.

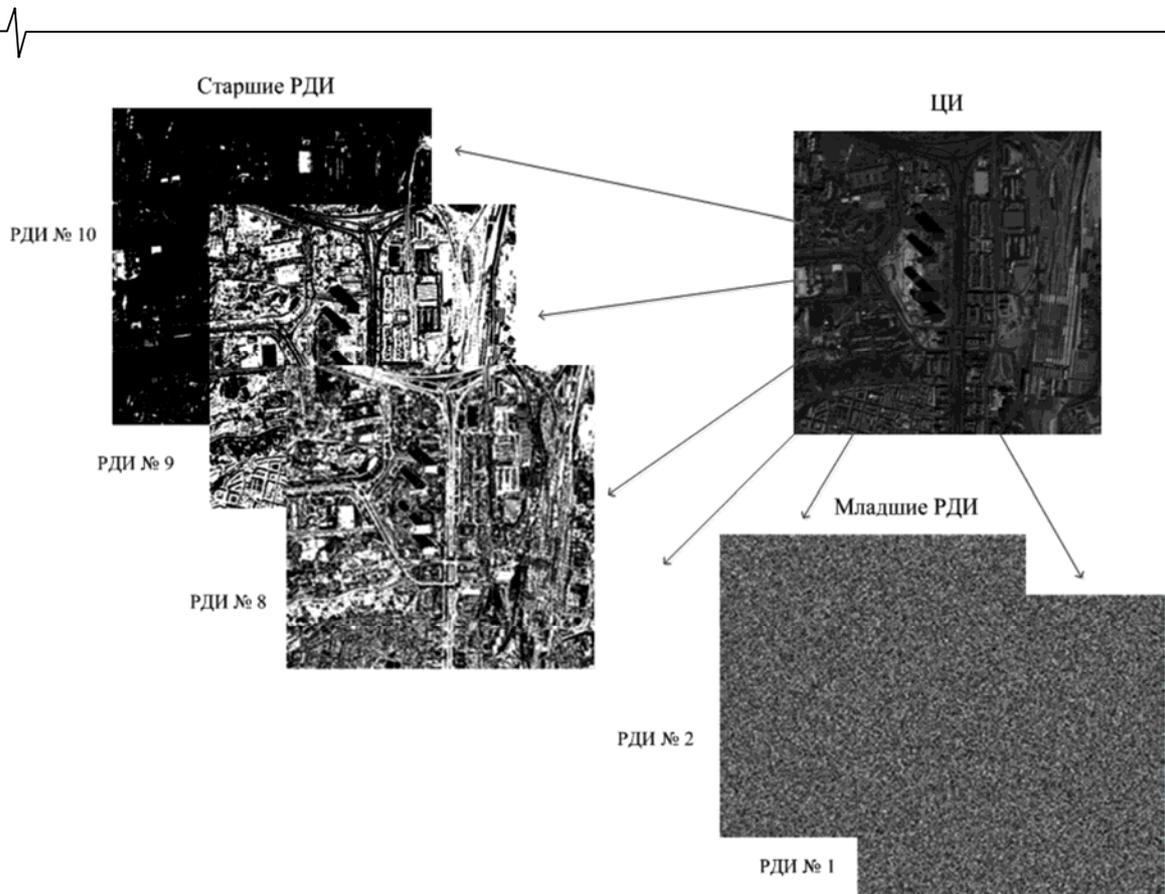


Рис. 1. Разложение ЦИ на РДИ

Отсюда следует, что для малых КА необходимы новые методы сжатия ЦИ, не уступающие по своей эффективности известным методам, но требующие меньших вычислительных ресурсов. В данной работе предлагается один из возможных методов сжатия ЦИ, удовлетворяющий указанным требованиям.

Математическая модель цифровых изображений

Будем полагать, что g -разрядное ЦИ является двумерным марковским процессом с несколькими состояниями $N = 2^g$ с вектором вероятностей начальных состояний $P = \|p_1, p_2, \dots, p_N\|^T$ и матрицами вероятностей переходов (МВП) ${}^1\Pi$ и ${}^2\Pi$ из состояния M_i в соседнее состояние M_j ($i, j \in N$) по горизонтали и вертикали соответственно [3]:

$$\begin{aligned}
 {}^1\Pi &= \begin{pmatrix} {}^1\pi_{11} & {}^1\pi_{12} & \dots & {}^1\pi_{1N} \\ {}^1\pi_{21} & {}^1\pi_{22} & \dots & {}^1\pi_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ {}^1\pi_{N1} & {}^1\pi_{N2} & \dots & {}^1\pi_{NN} \end{pmatrix}, \\
 {}^2\Pi &= \begin{pmatrix} {}^2\pi_{11} & {}^2\pi_{12} & \dots & {}^2\pi_{1N} \\ {}^2\pi_{21} & {}^2\pi_{22} & \dots & {}^2\pi_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ {}^2\pi_{N1} & {}^2\pi_{N2} & \dots & {}^2\pi_{NN} \end{pmatrix}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Разработка метода сжатия ЦИ в таком представлении требует больших вычислительных ресурсов, особенно для ЦИ с большим разрешением ($g > 8$). Поэтому

предлагается разделить g -разрядное ЦИ на g разрядных двоичных изображений (РДИ). На рис. 1 представлено панхроматическое 10-разрядное изображение, полученное с борта КА, после разделения на РДИ.

Каждое РДИ представляет собой двумерную цепь Маркова с двумя ($N = 2$) равновероятными состояниями ($p_1 = p_2$) и МВП ${}^1\Pi$ и ${}^2\Pi$ из состояния M_i в соседнее состояние M_j ($i, j \in N$) по горизонтали и вертикали соответственно [3]:

$${}^1\Pi = \begin{pmatrix} {}^1\pi_{11} & {}^1\pi_{12} \\ {}^1\pi_{21} & {}^1\pi_{22} \end{pmatrix}, \quad {}^2\Pi = \begin{pmatrix} {}^2\pi_{11} & {}^2\pi_{12} \\ {}^2\pi_{21} & {}^2\pi_{22} \end{pmatrix},
 \tag{2}$$

Элементы МВП (2) удовлетворяют условию нормировки

$$\sum_{j=1}^N {}^q\pi_{ij} = 1, \quad i \in N, \quad q = \overline{1, 2}
 \tag{3}$$

и стационарности

$$p_i = \sum_{j=1}^N p_j \pi_{ij}, \quad i \in N
 \tag{4}$$

РДИ представляет марковское случайное поле размером $m \times n$ на несимметричной полуплоскости, полученной классической разверткой с левого верхнего угла слева направо вниз (рис. 2).

Состояние элемента $M_{i,j}$ ($i \in m, j \in n$) зависит только от известных элементов некоторого подмножества $\Lambda_{i,j}$, называемого окрестностью элемента $M_{i,j}$. Лучшим образом удовлетворяющее условию каузальности является конфигурация окрестности (рис. 3) [5].

$$\Lambda_{i,j} = \{M_{i,j-1}, M_{i-1,j}, M_{i-1,j-1}\}. \quad (5)$$

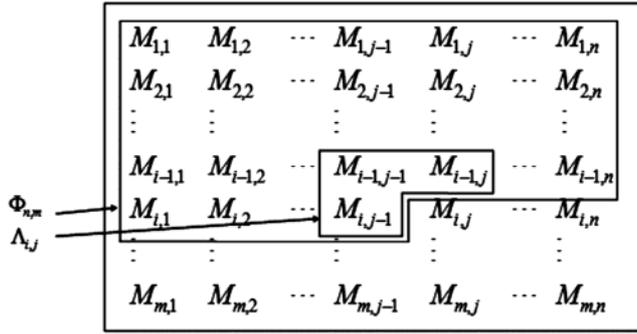


Рис. 2. Модель РДИ

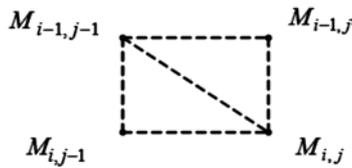


Рис. 3. Окрестность предсказываемого элемента РДИ

Вероятности перехода от состояний элементов окрестности $\Lambda_{i,j}$ к состоянию $M_{i,j}$ образуют МВП вида [5]:

$$\Pi = \begin{bmatrix} \pi_{111} & \pi_{121} & \pi_{211} & \pi_{221} \\ \pi_{112} & \pi_{122} & \pi_{212} & \pi_{222} \end{bmatrix}^T. \quad (6)$$

Элементы матрицы Π (6) связаны с элементами МВП (2) следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \pi_{111} &= \frac{{}^1\pi_{11} \cdot {}^2\pi_{11}}{{}^3\pi_{11}}, & \pi_{112} &= \frac{{}^1\pi_{12} \cdot {}^2\pi_{12}}{{}^3\pi_{11}}, \\ \pi_{121} &= \frac{{}^1\pi_{11} \cdot {}^2\pi_{21}}{{}^3\pi_{12}}, & \pi_{122} &= \frac{{}^1\pi_{12} \cdot {}^2\pi_{22}}{{}^3\pi_{12}}, \\ \pi_{211} &= \frac{{}^1\pi_{21} \cdot {}^2\pi_{11}}{{}^3\pi_{21}}, & \pi_{212} &= \frac{{}^1\pi_{21} \cdot {}^2\pi_{12}}{{}^3\pi_{21}}, \\ \pi_{221} &= \frac{{}^1\pi_{21} \cdot {}^2\pi_{21}}{{}^3\pi_{22}}, & \pi_{222} &= \frac{{}^1\pi_{22} \cdot {}^2\pi_{22}}{{}^3\pi_{22}}. \end{aligned}$$

где ${}^3\pi_{ii}$ – элементы дополнительной МВП ${}^3\Pi = {}^1\Pi \times {}^2\Pi'$.

Метод сжатия цифровых изображений

Основой алгоритма является процедура предсказания состояния каждого пиксела РДИ на основе известной окрестности $\Lambda_{i,j}$ и МВП (6), используя критерий максимальной вероятности. В результате предсказания формируется РДИ по следующему правилу – если состояние пиксела предсказано верно, то этот пиксел в РДИ принимает состояние 0, иначе 1. В качестве примера на рис. 4 а, б, в, г приведены результаты предсказания двух старших РДИ ЦИ, белым показаны области, присутствующие в битовом потоке (рис. 3 б). При восстановлении РДИ нулевые пикселы заменяются состояниями по результатам предсказания, а единичные – инверсией результата предсказания.

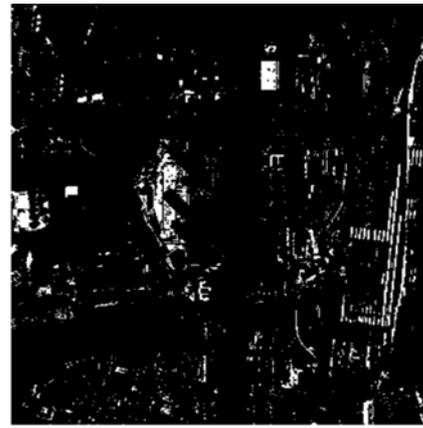


Рис. 4а. РДИ № 10



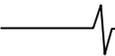
Рис. 4б. РДИ № 10 после процедуры предсказания



Рис. 4в. РДИ № 9



Рис. 4 г. РДИ № 9 после процедуры предсказания



РДИ после предсказания представляет собой разреженное поле, что позволяет эффективно применять алгоритмы кодирования RLE и Хаффмана.

Формализованное описание алгоритма [4, 5]:

1. ЦИ разбивается на g РДИ;
2. Для каждого РДИ вычисляются МВП по горизонтали $^1\Pi$ и вертикали $^2\Pi$, соответственно;
3. Исходя из МВП $^1\Pi$ и $^2\Pi$ вычисляется МВП $^3\Pi$.
4. Прогнозируется элемент \hat{M}_{ij} на основе МВП Π и окрестности $\Lambda_{i,j}$.

5. Если $M_{ij} = \hat{M}_{ij}$, то элемент предсказан верно;

6. Если $M_{ij} \neq \hat{M}_{ij}$, элемент M_{ij} предсказан неверно;

7. Формирование РДИ после предсказания;

8. РДИ сжимается кодом RLE в одномерный поток;

9. Одномерный поток сжимается кодом Хаффмана;

10. Сжатые данные записываются в файл.

Средние и младшие РДИ (№№1-6) содержат значительные области с фоном, характеристики которого близки к белому гауссовскому шуму. Процедура предсказания в этом случае мало эффективна, поэтому из младших РДИ на основе априорно известных или вычисленных статистических характеристик осуществляется удаление случайного фона и замена его детерминированным фоном, на котором остаются детали объектов ЦПИ с резко выраженными границами. После удаления фона РДИ подвергается кодированию, т.е. выполняются пункты 8-10 алгоритма сжатия. При восстановлении области детерминированного фона заполняются выборками белого гауссовского шума.

На рис. 5а приведено РДИ № 5 и выделенные черным области детерминированного фона (рис. 5б).

С увеличением разрядности у большинства ЦИ в младших РДИ присутствует практически один фон. На рис. 6а,б представлены два младших РДИ 10-разрядного ЦПИ. Во втором РДИ обнаружены мелкие детали объектов (рис. 7), они представлены белыми областями, черным цветом обозначен детерминированный фон. В первом, самом младшем РДИ, деталей объектов не обнаружено, следовательно оно кодированию не подлежит и целиком заполняется выборками белого гауссовского шума при восстановлении. Такой эффект характерен для большинства исследованных 10-разрядных спутниковых снимков.

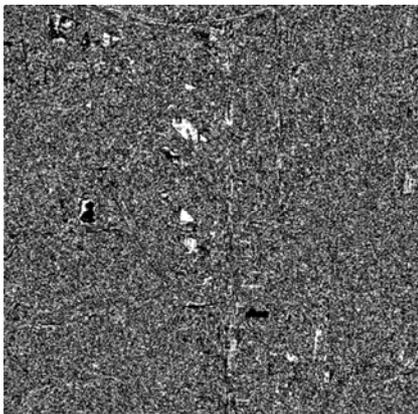


Рис. 5а. РДИ № 5

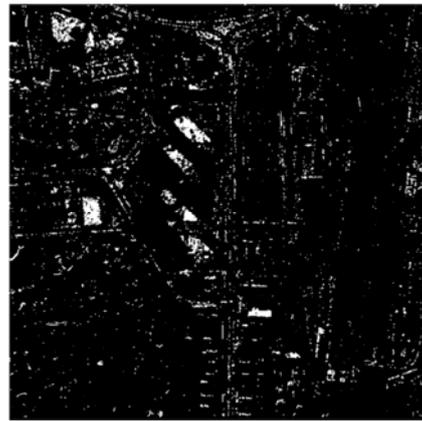


Рис. 5б. РДИ № 5 после удаления фона

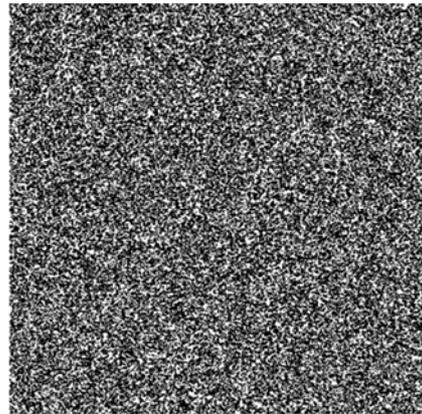


Рис. 6а. РДИ № 2

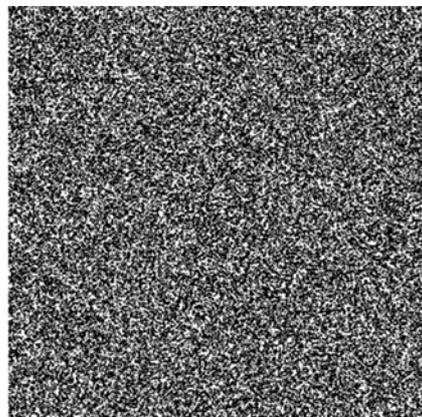


Рис. 6б. РДИ № 1

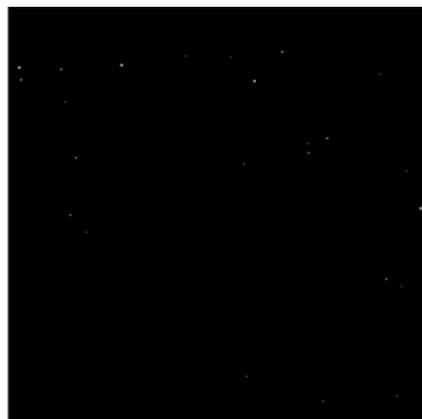


Рис.7 РДИ № 2 после удаления фона

На рис. 8а приведено 10 разрядное панхроматическое ЦПИ (фрагмент 2000×2000) и восстановленное после сжатия предложенным методом (рис. 8 б) с коэффициентом сжатия 6,3. Эффективность разработанного метода сжатия слабо зависит от разрядности ЦПИ в пределах 8-16 разрядов.



Рис. 8а. 10-разрядное панхроматическое ЦПИ



Рис. 8б. 10-разрядное ЦПИ, восстановленное после сжатия предложенным методом, коэффициент сжатия 6,3

оценкам качества показывает, что предложенный метод несколько уступает известным методам сжатия. Это происходит вследствие заполнения удаленных областей фона выборками белого гауссовского шума при восстановлении, что никак не сказывается на точности сохранения деталей объектов.

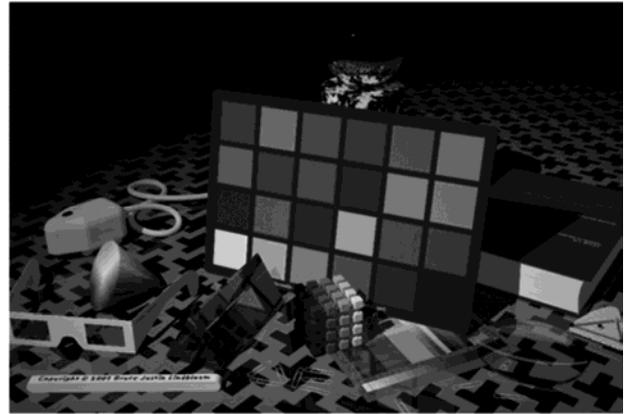


Рис. 9а. Тестовое 24-битное цветное RGB ЦИ

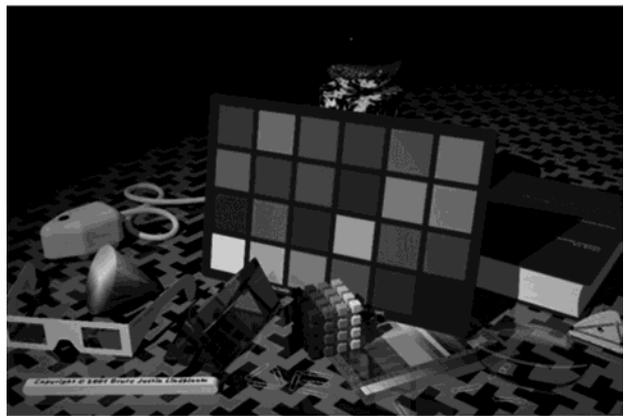


Рис. 9б. 24-битное цветное RGB ЦИ, восстановленное после сжатия предложенным методом, коэффициент сжатия 18

На рис. 9 приведено другое тестовое 24-битное цветное RGB изображение до сжатия (а) и после (б) с коэффициентом сжатия 18.

Для оценки эффективности алгоритма в сравнении с другими алгоритмами взяты параметры MSE и SSIM (рис 10 и рис. 11).

Анализ эффективности предложенного метода по

Кроме того предложенный метод обладает более высоким быстродействием по отношению к аналогам, что является важнейшим критерием в обработке изображений в системах дистанционного зондирования Земли. На рис. 12 представлены зависимости скорости сжатия без потерь тестовых изображений в мс от размера изображений (в процентах).

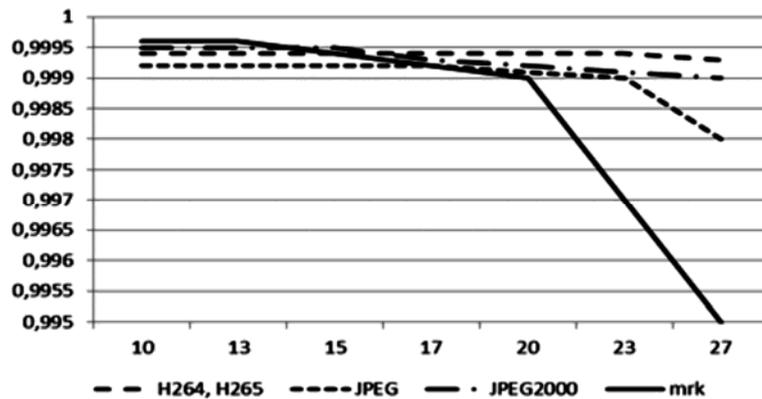


Рис. 10. График зависимости MSE от коэффициента сжатия для предлагаемого метода (формат mrk) и аналогов

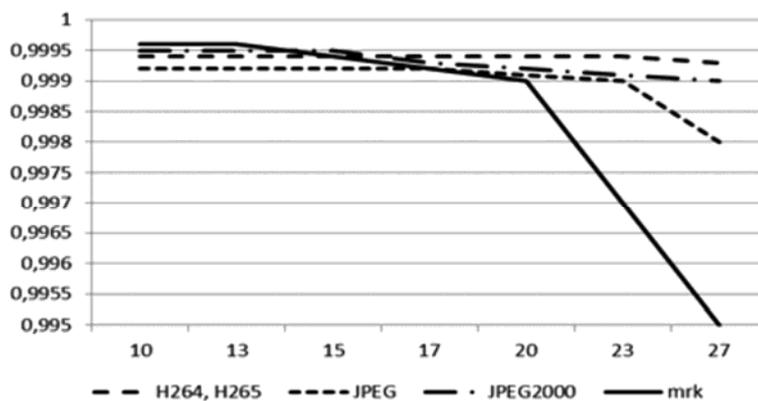


Рис. 11. График зависимости SSIM от коэффициента сжатия для предлагаемого метода (формат mrk) и аналогов

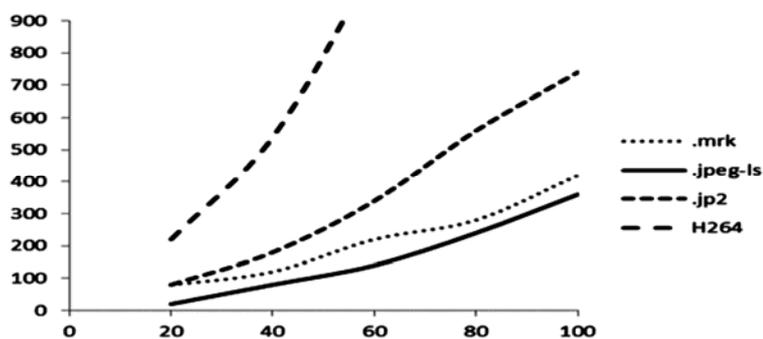


Рис. 12. Зависимости скорости сжатия без потерь тестовых изображений

Заключение

Алгоритм имеет ряд преимуществ перед другими методами сжатия:

- сжатие каждого РДИ происходит независимо от других РДИ, что дает возможность увеличить быстродействие за счет параллельной обработки РДИ;
- алгоритм позволяет обрабатывать изображения любой разрядности;
- алгоритм строится на простых вычислительных операциях, что снижает требования к элементной базе.

Литература

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка сигналов. М.: Техносфера, 2005. - 1072 с.
2. Яне Б. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2007. – 584с.
3. Дворкович В.П., Дворкович А.П. Цифровые видеоинформационные системы (теория и практика). М.: Техносфера, 2012. – 1009с.
4. Дворкович В.П., Дворкович А.П. Метрологическое обеспечение видеоинформационных систем. М.: Техносфера, 2015. – 784с.
5. Петров Е.П., Медведева Е.В., Харина Н.Л. Математическая модель цифровых полутоновых изображений Земли из космоса // II Всероссийская НТК «Актуальные проблемы ракетно-космической техники». Самара. 2011. С. 179-185.
6. Петров Е.П., Харина Н.Л., Ржаникова Е.Д. Метод сжатия цифровых полутоновых изображений на основе цепей Маркова с несколькими состояниями// Труды РНТОРЭС им. А. С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение. – М., 2013. Выпуск: XV-1, – с. 132-135
7. Петров Е.П., Харина Н.Л., Ржаникова Е.Д. Метод сжатия цифровых полутоновых изображений на основе цепей Маркова с несколькими состояниями//Материалы III Всероссийской НТК «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (III Козловские чтения) – Самара, 2013. – с.163-170