

МЕТОД СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ДЗЗ БЕЗ ПОТЕРЬ

© 2016 Е. П. Петров, Н. Л. Харина, П. Н. Сухих

Вятский государственный университет, г. Киров

В статье предложен метод сжатия цифровых изображений без потерь, который требует для своей реализации минимальных вычислительных ресурсов и может быть эффективно использован в системах дистанционного зондирования Земли. Метод позволяет максимально удалить статистическую избыточность, присутствующую в изображениях, и не имеет спектральных преобразований. Цифровое изображение раскладывается на битовые плоскости, которые обрабатываются независимо друг от друга, что позволяет применить к ним параллельную обработку, и при этом отсутствует ограничение на разрядность изображения. Каждая битовая плоскость аппроксимируется двумерным марковским дискретно-значным случайным полем. На основе теории условных марковских процессов осуществляется предсказание элементов битовой плоскости. Для предсказания используются только операции логического сравнения и не требуется вычислительных операций, таких как умножение, сложение, что позволяет увеличить скорость обработки изображений. Проведённые исследования показали, что метод не уступает по своей эффективности известным методам сжатия без потерь и значительно превосходит их по скорости обработки. Метод применим как к панхроматическим, так и цветным изображениям и может быть использован в любых системах обработки цифровых изображений.

Математическая модель цифровых изображений, процесс Маркова, матрица вероятностей перехода, предсказание элементов изображения, сжатие изображений без потерь.

Современные средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) формируют на борту космического аппарата (КА) большие объёмы информационных потоков, значительная часть которых связана с передачей цифровых изображений (ЦИ). Необходимость применения компрессии видеоинформации на борту КА обусловлена использованием датчиков, обеспечивающих съёмку 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: ВТС (усеченное блочное кодирование), ДИКМ (дифференциальная импульсно-кодовая модуляция), DST (дискретное косинусное преобразование), DWT (дискретное вейвлет-преобразование) [1; 2]. Большинство современных тяжёлых КА

обладают энергетическими возможностями для обеспечения непрерывного режима передачи информации, требующего больших вычислительных ресурсов на борту КА. Наметившаяся в последнее время тенденция к «миниатюризации» космических средств наблюдения (малые КА) ведёт к ужесточению требований к эффективности использования энергетических ресурсов и не всегда позволяет реализовать вышеперечисленные методы сжатия ЦИ, особенно ЦИ с большим разрешением. Отсюда следует, что для сжатия ЦИ на борту малых КА необходимо решить задачу разработки новых методов, не уступающих по своей эффективности известным методам сжатия ЦИ и требующих меньших вычислительных ресурсов. В данной работе предлагается один из возможных методов сжатия ЦИ, удовлетворяющий указанным требованиям.

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

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

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) (рис. 1).

Каждое РДИ представляет собой двумерный марковский процесс с двумя ($N = 2$) равновероятными состояниями

вероятностей переходов (МВП) ${}^1\Pi$ и ${}^2\Pi$ из M_i в соседнее M_j состояние ($i, j \in N$) по горизонтали и вертикали соответственно [3]:

($p_1 = p_2$) и МВП ${}^1\Pi$ и ${}^2\Pi$ из M_i в соседнее состояние M_j ($i, j \in N$) по горизонтали и вертикали соответственно [3]:

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

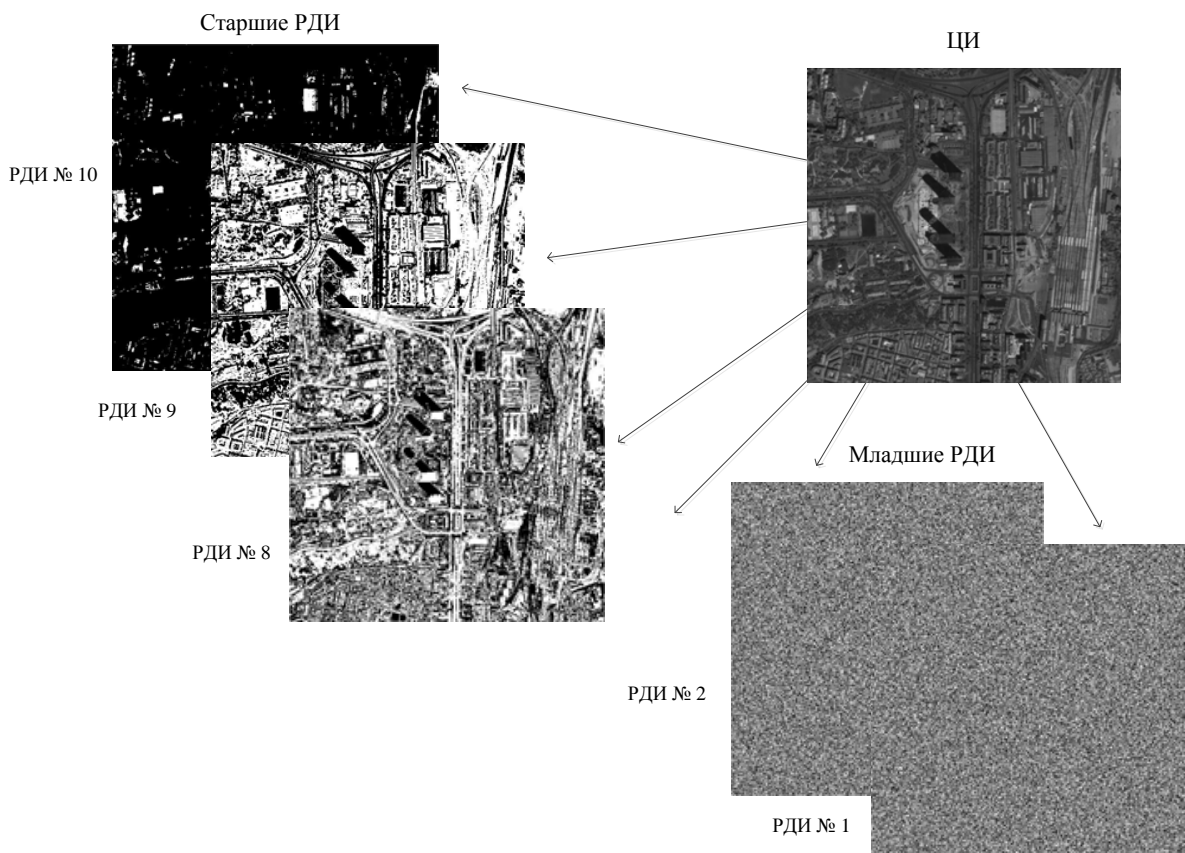


Рис. 1. Разделение панхроматического ЦИ на РДИ

Элементы МВП (2) удовлетворяют условиям нормировки

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

и стационарности

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

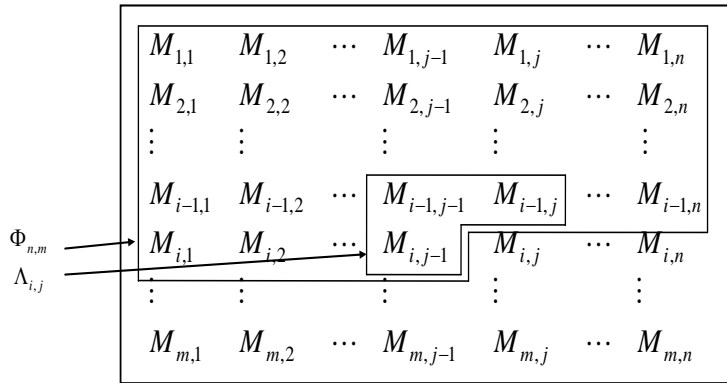


Рис. 2. Модель РДИ

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 удовлетворяющей условию каузальности является конфигурация окрестности (рис. 3) [3]:

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

Вероятности перехода от состояний элементов окрестности $\Lambda_{i,j}$ к состоянию $M_{i,j}$ образуют МВП вида [3]:

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

Основой алгоритма является процедура предсказания каждого элемента РДИ на основе известной окрестности $\Lambda_{i,j}$ и МВП (6), используя критерий максимальной вероятности. В результате предсказания формируется РДИ по следующему

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

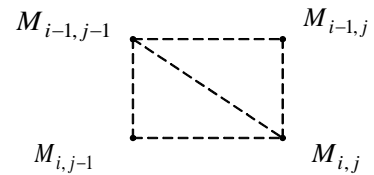


Рис. 3. Окрестность элемента РДИ

правилу – если элемент предсказан верно, то обозначим 0, иначе 1. При восстановлении РДИ нулевые элементы заменяются результатом предсказания, а единичные – инверсией результата предсказания.

В качестве примера на рис. 4а; 4б приведён результат предсказания старшего разряда панхроматического ЦИ (рис. 1); белым показаны области, присутствующие в битовом потоке (рис. 4б).

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

Приведём 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. Формируется РДИ после предсказания.



Рис. 4а. Старший разряд ЦИ

8. Одномерный поток сжимается кодом Хаффмана.

9. Полученные данные и служебная информация записываются в файл формата mrk.

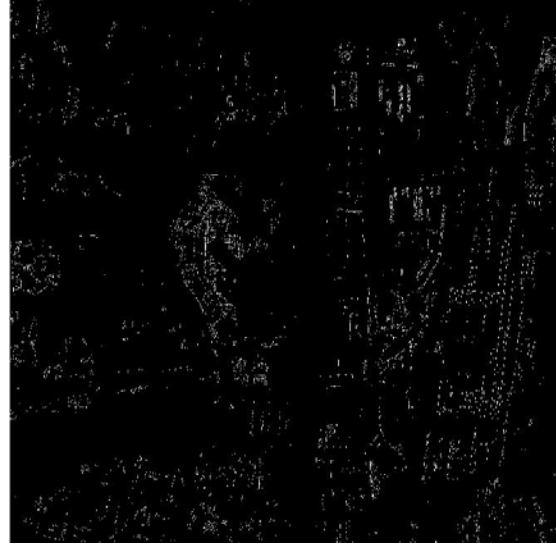


Рис. 4б. Сжатый старший разряд ЦИ

Младшие РДИ содержат значительные области с фоном, характеристики которого близки к белому гауссовскому шуму. Процедура предсказания в этом случае малоэффективна и поэтому данные РДИ подвергаются кодированию без процедуры предсказания. Для принятия решения о необходимости применения процедуры предсказания используется поро-

говое значение элементов ${}^1\pi_{ii}$ и ${}^2\pi_{ii}$ МВП (2), равное $H = 0,6$.

Для исследования эффективности предложенного алгоритма (выходной формат .mrk) произведено сжатие 100 снимков поверхности Земли с КА и беспилотного летательного аппарата (рис. 5). Исходное разрешение снимков 1920×1200 пикселей.



Рис. 5. Образцы тестовых снимков

В качестве аналогов представлены известные алгоритмы сжатия без потерь PNG (формат .png) и JPEG-LS (формат .jls). На рис. 6 представлены графики зависимости среднего коэффициента сжатия

в зависимости от размера изображения. Для оценки быстродействия алгоритма на рис. 7 представлена зависимость скорости сжатия одного изображения (в МБ/с), от его размера.

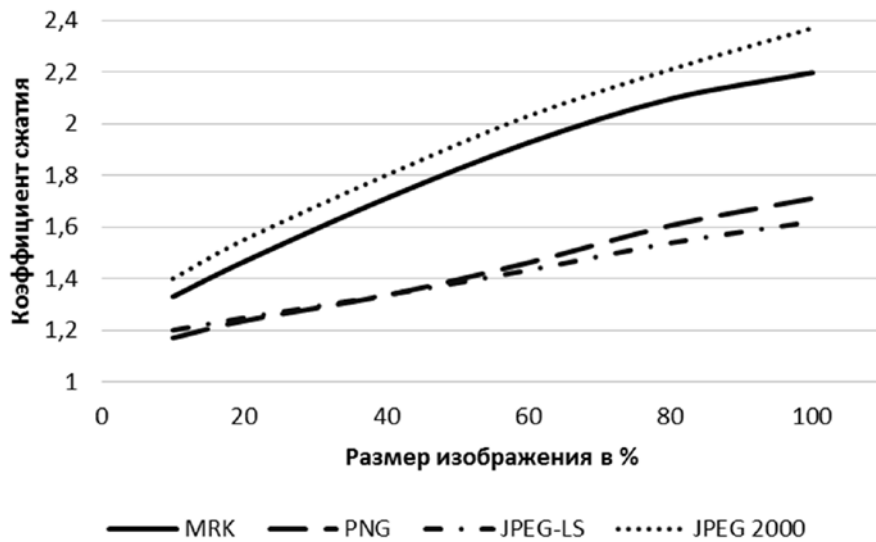


Рис. 6. Зависимость степени сжатия от размера изображения тестовых снимков

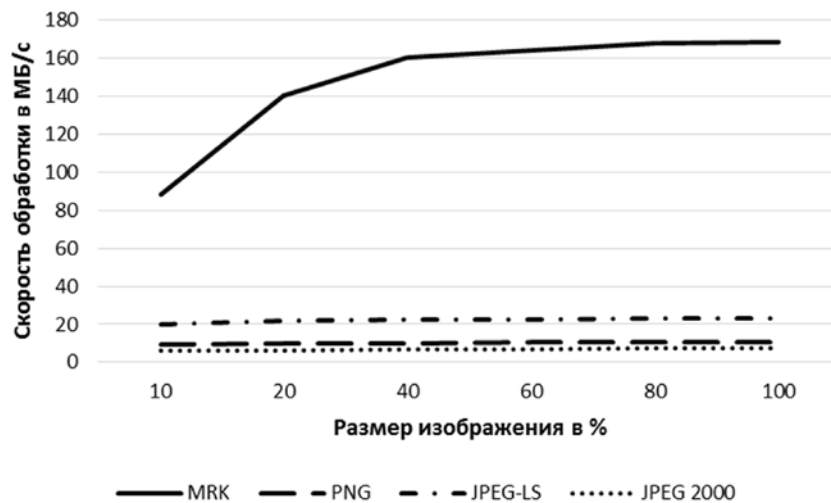


Рис. 7. Зависимость скорости сжатия (МБ/с) от размера изображения тестовых снимков

По результатам исследования видно, что предложенный алгоритм не уступает аналогам по степени сжатия и значительно превосходит по скорости обработки изображений.

Таким образом, предложенный алгоритм имеет ряд преимуществ:

- сжатие каждого РДИ происходит независимо от других, что даёт возможность увеличения быстродействия за счёт параллельной обработки РДИ;

- алгоритм позволяет обрабатывать изображения любой разрядности;

- эффективность алгоритма увеличивается с ростом размера изображений;

- алгоритм строится на простых вычислительных операциях, что снижает требования к элементной базе. Реализовав данный алгоритм в программируемой логической интегральной схеме, можно существенно сократить энергетические затраты, не теряя в быстродействии, что актуально для использования в системах ДЗЗ на борту КА.

Библиографический список

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
2. Яне Б. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2007. 584 с.
3. Петров Е.П., Медведева Е.В., Харина Н.Л. Математическая модель цифровых полутоновых изображений Земли из космоса // Материалы II Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (II Козловские чтения). Самара: Самарский научный центр РАН, 2011. С. 179-185.
4. Петров Е.П., Харина Н.Л., Ржаникова Е.Д. Метод сжатия цифровых полутоновых изображений на основе цепей Маркова с несколькими состояниями // Материалы III Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (III Козловские чтения). Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. С. 163-170.
5. Петров Е.П., Харина Н.Л., Ржаникова Е.Д. Метод сжатия цифровых изображений без потерь минимальными вычислительными ресурсами // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и её применение. Вып. XVII-2. М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2015. С. 544-548.

Информация об авторах

Петров Евгений Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектронных средств, Вятский государственный университет, г. Киров. E-mail: erpetrov@mail.ru. Область научных интересов: исследование алгоритмов и устройств цифровой фильтрации дискретных коррелированных сигналов, цифровая обработка изображений.

Харина Наталья Леонидовна, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектронных средств, Вятский государственный университет, г. Киров. E-mail: natal_res@mail.ru. Область научных интересов: многомерные марковские поля в обработке изображений.

Сухих Павел Николаевич, аспирант, Вятский государственный университет, г. Киров. E-mail: raznodel@yandex.ru. Область научных интересов: многомерные марковские поля в обработке изображений.

METHOD OF LOSSLESS IMAGE COMPRESSION IN THE EARTH REMOTE SENSING SYSTEMS

© 2016 E. P. Petrov, N. L. Kharina, P. N. Sukhikh

Vyatka State University, Kirov, Russian Federation

A method of lossless digital image compression is presented in the paper. Its implementation demands minimum computing resources and it can be efficiently used in Earth remote sensing systems. The method makes possible maximum removal of statistical redundancy of images without spectral transformations. A digital image is resolved into bit planes which are processed independently of one another. That allows their parallel processing without any restriction on the pixel length of the image. Each bit plane is approximated by a two-dimensional Markov random field with discrete values. Prediction of elements of the bit plane is accomplished on the basis of the theory of conventional Markov processes. Only operations of logical comparison are used for

the prediction, whereas computational operations such as multiplication and addition are not required, which makes it possible to increase the speed of image processing. The research conducted shows that the method is not inferior to known methods of lossless compression in its efficiency, while being considerably superior to them in the speed of processing. The method is applicable both to panchromatic and color images and can be used in any systems of digital image processing.

Mathematical model of digital images, Markov process, matrix of transition probabilities, prediction of image elements, lossless image compression.

References

1. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing. New Jersey: Prentice-Hall, 2002. 1072 p.
2. Jähne B. Digital Image Processing. Springer, 2005. 584 p.
3. Petrov E.P., Medvedeva E.V., Kharina N.L. Matematicheskaya model' tsifrovyykh polutonovykh izobrazheniy Zemli iz kosmosa. *Materialy II Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy raketno-kosmicheskoy tekhniki» (II Kozlovskie chteniya)*. Samara: Samarskiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2011. P. 179-185. (In Russ.)
4. Petrov E.P., Kharina N.L., Rzhanikova E.D. Metod szhatiya tsifrovyykh polutonovykh izobrazheniy na osnove tsepey Markova s neskol'kimi sostoyaniyami. *Materialy III Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy raketno-kosmicheskoy tekhniki» (III Kozlovskie chteniya)*. Samara: Samarskiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2013. P. 163-170. (In Russ.)
5. Petrov E.P., Kharina N.L., Rzhanikova E.D. Metod szhatiya tsifrovyykh izobrazheniy bez poter' minimal'nymi vychislitel'nymi resursami. *Trudy Rossiyskogo nauchno-tekhnicheskogo obshchestva radiotekhniki, elektroniki i svyazi imeni A.S. Popova. Seriya: Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primeneniye*. Moscow: RNTORES im. A.S. Popova Publ., 2015. P. 544-548. (In Russ.)

About the authors

Petrov Eugeny Petrovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Radio Electronic Devices, Vyatka State University, Kirov, Russian Federation. E-mail: eppetrov@mail.ru. Area of Research: algorithms and devices of digital filtration of discrete correlated signals, digital processing of images.

Kharina Natalya Leonidovna, Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor of the Department of Radio Electronic Devices, Vyatka State University, Kirov, Russian Federation. E-mail: natal_res@mail.ru. Area of Research: multidimensional Markov fields in digital image processing.

Sukhikh Pavel Nikolaevich, postgraduate student of the Department of Radio Electronic Devices, Vyatka State University, Kirov, Russian Federation. E-mail: raznodel@yandex.ru. Area of Research: multidimensional Markov fields in digital image processing.