## Метод сжатия многоразрядных спутниковых снимков без потерь

## Е.П. Петров, Н.Л. Харина, П.Н. Сухих

### Вятский государственный университет, Киров, 610000, Россия E-mail: natal res@mail.ru

Работа посвящена описанию метода сжатия многоразрядных цифровых изображений без потерь на основе представления их марковскими случайными полями, что позволяет эффективно использовать статистическую (информационную) избыточность, присущую цифровым изображениям. Метод основан на разделении цифрового изображения на разрядные двоичные изображения и представлении их двумерными марковскими цепями с двумя состояниями. Идея метода сжатия заключается в предсказании каждого элемента разрядных двоичных изображений и удалении из передаваемого на наземную станцию потока правильно предсказанных пикселей. Восстановление непереданных пикселей осуществляется на приемной стороне с точностью 100%. После процедуры предсказания применяются алгоритмы кодирования RLE и Хаффмана. Предложенный метод сжатия многоразрядных цифровых изображений не требует спектральных преобразований и арифметических операций, для предсказания используются только операции логического сравнения. Для повышения разрешающей способности метод позволяет увеличивать разрядных двоичных изображений (8 и более бит на пиксел) за счет возможности параллельной обработки разрядных двоичных изображений. Проведенные исследования показали, что алгоритм по своей эффективности не уступает известным аналогам и значительно превосходит их по скорости обработки изображения.

Ключевые слова: цифровое изображение, космические снимки, сжатие изображений, марковское случайное поле, цепь Маркова, матрица вероятностей переходов, предсказание элементов изображения, скорость обработки, статистическая избыточность

Одобрена к печати: 19.01.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-203-210

### Введение

Современные системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) формируют на борту космического аппарата (КА) огромные объемы информационных потоков, значительная часть которых связана с передачей цифровых изображений (ЦИ). Необходимость применения компрессии видеоинформации 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: ВТС (усеченное блочное кодирование), ДИКМ (дифференциальная импульсно-кодовая модуляция), DCT (дискретное косинусное преобразование), DWT (дискретное вейвлет-преобразование) (Яне, 2007; Гонсалес, Вудс, 2005). Большинство современных КА обладают энергетическими возможностями для обеспечения непрерывного режима передачи информации, которого требуют больших вычислительных ресурсов на борту КА. Однако в последнее время наблюдаются тенденции на «миниатюризацию» космических средств наблюдения (малые спутники) и увеличение разрядности ЦИ, что ведет к ужесточению требований к эффективности использования энергетических ресурсов и не всегда позволяет реализовать вышеперечисленные методы сжатия ЦИ. Таким образом, для малых КА необходимы новые методы сжатия ЦИ, не уступающие по своей эффективности известным методам, но требующие меньших вычислительных ресурсов.

В данной работе предлагается метод сжатия ЦИ без потерь, удовлетворяющий указанным требованиям. Метод основан на использовании теории условных марковских процессов, что позволяет эффективно использовать статистическую избыточность, присущую ЦИ, и не содержит арифметических операций.

### Постановка задачи

Будем полагать, что g-разрядное ЦИ является двумерным дискретнозначным марковским процессом с несколькими состояниями  $N = 2^g$  с вектором вероятностей начальных состояний  $P = ||p_1, p_2, ..., p_N||^T$  и матрицами вероятностей переходов (МВП) <sup>1</sup>П и <sup>2</sup>П из состояния  $M_i$  в соседнее состояние  $M_j$  ( $i, j \in N$ ) по горизонтали и вертикали соответственно:

$${}^{1}\Pi = \begin{vmatrix} {}^{1}\pi_{11} & {}^{1}\pi_{12} & \dots & {}^{1}\pi_{1N} \\ {}^{1}\pi_{21} & {}^{1}\pi_{22} & \dots & {}^{1}\pi_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ {}^{1}\pi_{N1} & {}^{1}\pi_{N2} & \dots & {}^{1}\pi_{NN} \end{vmatrix}, {}^{2}\Pi = \begin{vmatrix} {}^{2}\pi_{11} & {}^{2}\pi_{12} & \dots & {}^{2}\pi_{1N} \\ {}^{2}\pi_{21} & {}^{2}\pi_{22} & \dots & {}^{2}\pi_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ {}^{2}\pi_{N1} & {}^{2}\pi_{N2} & \dots & {}^{2}\pi_{NN} \end{vmatrix}$$
(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 8-разрядное ЦИ после разделения на РДИ.



Рис. 1. Разложение ЦИ на РДИ

### Математическая модель изображения

Каждое РДИ представляет собой двумерный марковский процесс с двумя (N = 2) равновероятными состояниями ( $p_1 = p_2$ ) и МВП <sup>1</sup>П и <sup>2</sup>П из состояния  $M_i$  в соседнее состояние  $M_j$  ( $i, j \in N$ ) по горизонтали и вертикали соответственно (Петров, Медведева, Харина, 2011):

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

Элементы МВП (2) удовлетворяют условию нормировки

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

и стационарности

$$p_{i} = \sum_{j=1}^{N} p_{j} \pi_{ij}, i \in N.$$
 (4)

РДИ представляет марковское случайное поле размером  $m \times n$  на несимметричной полуплоскости, полученной классической разверткой с левого верхнего угла слева направо вниз (*puc. 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 (*puc. 3*)

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

Вероятности перехода от состояний элементов окрестности  $\Lambda_{i,j}$  к состоянию  $M_{i,j}$  образуют МВП вида (Петров, Медведева, Харина, 2011):

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

205

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

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

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

#### Описание метода сжатия

Основой алгоритма является процедура предсказания состояния каждого пиксела РДИ на основе известной окрестности  $\Lambda_{i,j}$  и МВП (6) (Петров, Медведева, Харина, 2011). 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*a*,*б*,*в*,*г* приведены результаты предсказания двух старших РДИ, белым показаны области, присутствующие в битовом потоке (*рис.* 4*б*,*г*). При восстановлении РДИ нулевые пикселы заменяются состояниями по результатам предсказания, а единичные – неправильно предсказанные – инверсией результата предсказания.

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

Все изображения, передаваемые с борта КА, можно классифицировать по статистическим характеристикам – МВП (2) и хранить на борту этот классификатор. При сжатии изображения из классификатора выбираются МВП вида (2) и (6), а номер класса передается в качестве служебной информации вместе с изображением. При использовании алгоритма в других приложениях МВП (2) могут быть вычислены для каждого изображения.

Формализованное описание алгоритма (Петров, Харина, Ржаникова, 2013):

- 1. ЦИ разбивается на д РДИ;
- 2. Для каждого РДИ из классификатора выбираются МВП вида (2) и (6);
- 3. Прогнозируется элемент  $\hat{M}_{ii}$  на основе МВП (6) и окрестности  $\Lambda_{i,i}$ .
- 4. Если  $M_{ij} = \hat{M}_{ij}$ , то элемент предсказан верно;
- 5. Если  $M_{ij} \neq \hat{M}_{ij}$ , элемент  $M_{ij}$  предсказан неверно;
- 6. Формирование РДИ после предсказания;
- 7. РДИ сжимается кодом RLE в одномерный поток;

- 8. Одномерный поток сжимается кодом Хаффмана;
- 9. Сжатые данные записываются в файл.



Рис. 4а. РДИ № 8



Рис. 4б. РДИ № 8 после процедуры предсказания



Рис. 4в. РДИ № 7



Рис. 4 г. РДИ № 7 после процедуры предсказания

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 эти РДИ кодируются без предсказания.

## Результаты экспериментов

Для исследования эффективности предложенного алгоритма (MRK) произведено сжатие 20 искусственных панхроматических изображений, полученных на основе описанной математической модели с статистическими характеристиками выбранных реальных снимков (*puc. 5*) и 20 снимков поверхности Земли со спутника (DigitalGlobe) разрешением 8192 х 8192 пикселей (*puc. 6*). Для эксперимента были выбраны реальные снимки со средним коэффициентом корреляции пикселей в изображении (большое количество мелких и средних объектов). Сжатие таких изображений известными способами малоэффективно, поэтому представляет наибольший интерес. В качестве аналогов взяты алгоритмы сжатия без потерь PNG, JPEG-LS, JPEG 2000.







Рис. 6. Пример снимка поверхности Земли

Результаты сжатия снимков предложенным методом и аналогами представлены в *табл.* 1. При исследовании предложенный метод применялся в режиме последовательной обработки РДИ из-за трудности реализации режима параллельной обработки. Для сравнения взяты усредненные по всем обработанным снимкам коэффициент сжатия и скорость обработки.

Алгоритм сэкатия	Коэффициент сжатия искусственных снимков	Коэффициент сжатия реальных снимков	Скорость обработки, Мб/с
PNG	2	1,58	3,65
JPEG-LS	1,37	1,63	15,95
JPEG 2000	1,07	1,6	3,97
MRK	2,35	1,42	45,4

Таблица	1. Pe	зультаты	исследований
		2	

Исследование проводилось на оборудовании с характеристиками: процессор Intel Celeron G1820 – 2,7 ГГц, 8 Гб оперативной памяти, SSD TOSHIBA 128 Гб, OC Windows 7.

### Заключение

По результатам исследования видно, что предложенный метод обладает высокой эффективностью, особенно при обработке искусственных изображений. Это объясняется отсутствием шумов канала связи при их обработке, в отличие от реальных изображений, прошедших по каналу связи. Метод обладает высоким быстродействием даже при последовательной обработке РДИ. Реализация режима параллельной обработки и переход на оборудование, оперирующее битами, обеспечит увеличение быстродействия в разы. Предложенный метод строится на простых логических операциях, позволяет обрабатывать изображения любой разрядности и не требователен к памяти (для работы алгоритму необходимо хранить только две очередные строки изображения). Метод может быть использован как в системах ДЗЗ, так и в любых других приложениях обработки изображений.

### Литература

- 1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка сигналов. Пер. с англ. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
- Петров Е.П., Медведева Е.В. Харина Н.Л. Математическая модель цифровых полутоновых изображений 2 Земли из космоса // Актуальные проблемы ракетно-космической техники. 2011. С. 179–185.
- 3. Петров Е.П., Харина Н.Л. Ржаникова Е.Д. Метод сжатия цифровых полутоновых изображений на основе Петров Е.П., Харина П.Л. Р жаникова Е.Д. Метод ежатия цифровых полутоповых пооражений на основе цепей Маркова с несколькими состояниями // Труды РНТОРЭС им. А. С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение. 2013. Т. XV–1. С. 132–135.
   Петров Е.П., Харина Н.Л. Ржаникова Е.Д. Метод сжатия цифровых полутоновых изображений на основе цепей Маркова с несколькими состояниями // Актуальные проблемы ракетно-космической техники.
- Самара. 2013. С. 163-170.
- 5. Яне Б. Цифровая обработка изображений. Пер. с англ. М.: Техносфера, 2007. 584 с.
- 6. Imagery Product Samples // DigitalGlobe. 2015. URL: https://www.digitalglobe.com/ resources/ imagery-product-samples (дата обращения: 10.07.2015).

# Lossless compression method for multidigital satellite images

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

### Vyatka State University, Kirov, 610000, Russia E-mail: natal res@mail.ru

The paper is devoted to lossless compression of multidigital images. The images are represented by Markov random fields, which enables efficient use of statistical (informative) redundancy of digital images. The method is based on division of a digital image into bit images that are represented by two-dimensional Markov chains with two states. The idea of the method of image compression consists in prediction of each pixel of a bit image and removal of correctly predicted pixels from the image transferred to a land station. Restitution of untransferred pixels is carried out by the receiving party with an accuracy of 100%. After the procedure of prediction the algorithms of RLE and Huffman coding are applied. The suggested method of multidigital image compression does not demand spectral transformations or arithmetic operations. Only logical comparison operations are used for the prediction. The method allows for increasing the bit depth of transferred images (8 and more bits per pixel) by applying bit image parallel processing. The conducted research shows that the algorithm does not concede to known counterparts in efficiency and considerably surpasses them in speed of image compression. The method can be used as in systems of Earth remote sensing as in any other image processing applications.

Keywords: digital image, satellite images, image compression, Markov random field, Markov chain, matrix of probabilities of one-step transition, element of image prediction, speed of image compression, statistical redundancy

> Accepted: 19.01.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-203-210

## References

- Gonzalez R.C., Woods R.E., Tsifrovaya obrabotka signalov (Digital image processing), Moscow: Tekhnosfera, 1. 2005, 1072 p.
- Petrov E.P., Medvedeva E.V., Kharina N.L. Matematicheskaya model' tsifrovykh polutonovykh izobrazhenii 2. Zemli iz kosmosa (Mathematical model of digital half-tone images of Earth from space), Aktual nye problemy raketno-kosmicheskoi tekhniki, 2011, pp. 179–185.
- Petrov E.P., Kharina N.L., Rzhanikova E.D. Metod szhatiya tsifrovykh polutonovykh izobrazhenii na osnove 3 tsepei Markova s neskol'kimi sostoyaniyami (Method of digital half-tone images compression on the basis of Markov chains with several states), Trudy RNTORES im. A. S. Popova. Seriya: Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primenenie, 2013, Vol. XV-1, pp. 132-135.
- 4. Petrov E.P., Kharina N.L., Rzhanikova E.D. Metod szhatiya tsifrovykh polutonovykh izobrazhenii na osnove tsepei Markova s neskol'kimi sostoyaniyami (Method of digital half-tone images compression on the basis of Markov chains with several states), *Aktual'nye problemy raketno-kosmicheskoi tekhniki*, 2013, pp. 163–170. Yane B., *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii*(Digital image processing), Moscow: Tekhnosfera, 2007, 584 p.
- 5.
- Imagery Product Samples, DigitalGlobe, 2015, URL: https://www.digitalglobe.com/ resources/ imagery-product-6 samples.