

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Замятин А.В., Марков Н.Г. Анализ динамики земной поверхности с использованием данных дистанционного зондирования Земли. — М.: Физматлит, 2007. — 176 с.
2. Замятин А.В. Анализ динамики ландшафтного покрова на основе данных дистанционного зондирования Земли // Исследование Земли из космоса. — 2006. — № 6. — С. 50–64.
3. Тикунов В.С. Моделирование в картографии. — М.: Изд-во МГУ, 1997. — 405 с.
4. McGarigal K. Landscape pattern metric. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: — www.umass.edu/landeco/pubs/Fragmetrics_short.pdf, свободный.
5. Verburg P.H. et al. A method to analyse neighborhood characteristics of land use patterns // Computers, Environment and Urban Systems, 2003. — № 24. — P. 354–369.
6. Wu J.G. Can landscape indices predict ecological processes consistently? // Landscape Ecology. — 2000. — V. 16. — № 3. — P. 235–254.
7. Замятин А.В., Михайлов П.В., Cabral P. Современные средства для решения задач анализа динамики и прогнозирования изменений ландшафтного покрова // Известия Томского политехнического университета. — 2006. — Т. 309. — № 7. — С. 80–86.
8. Clark Labs — IDRISI GIS and Image Processing Software. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: — <http://www.clarklabs.org/>, свободный.
9. Westin L.K. Department of computer Science Umeå University. Receiver operating characteristic analysis. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: — <http://www.cs.umu.se/research/reports/2001/018/part1.pdf>, свободный.
10. Richards J.A., Xiuping Jia. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. — Berlin: Springer, 1999. — 400 p.

Поступила 24.10.2008 г.

УДК 004.627

СЖАТИЕ МНОГОЗОНАЛЬНЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И УЧЕТОМ МЕЖДИАПАЗОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ

А.В. Замятин, То Динь Чыонг

Томский политехнический университет

E-mail: zamyatin@tpu.ru

Предложен трехэтапный алгоритм сжатия многозональных аэрокосмических изображений, основанный на использовании вейвлет-преобразования и учете междиапазонной зависимости, позволяющий в большей мере учесть специфику и повысить степень сжатия данных дистанционного зондирования Земли. Проведены сравнительные исследования эффективности предложенного алгоритма и универсальных алгоритмов сжатия, подтвердившие его работоспособность и позволившие определить оптимальную глубину вейвлет-преобразования. Результаты исследований показали превосходство предложенного алгоритма в различной степени над аналогами в сжатии при более существенных вычислительных затратах.

Ключевые слова:

Аэрокосмические изображения, вейвлет-преобразование, сжатие изображений, междиапазонная корреляция.

Введение

В связи с постоянно растущими техническими возможностями систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), их более широким использованием потребителями при решении различных задач, объем данных, которыми оперируют эти системы, исчисляется терабайтами и продолжает неуклонно увеличиваться. Поэтому решение задачи сжатия таких данных с использованием различных подходов и программно-аппаратных средств с целью существенного повышения эффективности обработки, хранения, и передачи аэрокосмической информации по каналам связи становится все более актуальным как в России, так и за рубежом [1–5]. Учитывая необходимость предварительной обработки и автоматизированной классификации таких данных, наибольшую ценность представляют алгоритмы сжатия без потерь, не допускающие искажения статистических яркостных характери-

стик восстановленного аэрокосмического изображения (АИ).

Выделяют два принципиально различных подхода к сжатию данных ДЗЗ. Один подход предполагает использование универсальных и широко известных алгоритмов сжатия, не учитывающих их специфику, и представленных в универсальных архиваторах *WinRar* или *WinZip* [3]. Другой подход предполагает разработку новых алгоритмов сжатия, учитывающих при обработке не только данные каналов (диапазонов) как совокупность обычных черно-белых изображений или как неструктурированный массив информации, но и существующую зависимость (корреляцию) между диапазонами АИ. Несмотря на то, что такой подход является более сложным с вычислительной точки зрения, именно при его использовании можно добиться существенно более высоких показателей степени сжатия за счет учета специфики данных ДЗЗ.

Данная работа направлена на разработку и исследование алгоритма сжатия многозональных космических снимков без потерь, основанного как на независимой обработке данных в различных каналах, так и учитывающего их междиапазонную корреляцию с целью повышения степени сжатия в сравнении с широко известными универсальными алгоритмами.

Трехэтапный алгоритм сжатия

Одним из наиболее эффективных подходов к сжатию изображений без потерь является использование вейвлет-преобразования, при котором полученные коэффициенты преобразования сжимаются значительно лучше данных исходного изображения [3].

Многозональное АИ представляет собой значения яркостей, полученные в различных спектральных диапазонах, и, как правило, имеющие значительную междиапазонную зависимость [5]. Если такая функциональная зависимость известна, то оперируя значениями отклонений (разницы) между ней и фактическими исходными значениями, можно существенно уменьшить диапазон изменения данных. Это позволит задействовать для хранения этих отклонений меньшее число разрядов, чем необходимо для хранения исходных данных, что в конечном итоге способствует увеличению степени сжатия.

Применение указанных выше преобразований совместно при решении задачи сжатия позволит использовать как преимущества аппарата вейвлет-преобразования обычных изображений, так и существующую зависимость между каналами многозонального АИ. Учитывая это, алгоритм сжатия предлагается реализовать в три этапа:

- выполнить вейвлет-преобразование исходных данных, получив соответствующие коэффициенты преобразования;
- осуществить учет функциональной зависимости значений яркости между различными каналами АИ и сформировать массивы отклонений (разностей) исходных данных от значений найденной функциональной зависимости;
- выполнить сжатие полученных после преобразований данных одним из традиционных алгоритмов.

Рассмотрим подробнее этапы предлагаемого трехэтапного алгоритма сжатия многозонального АИ.

Как отмечено выше, на первом этапе над исходными данными осуществляется вейвлет-преобразование, суть которого заключается в том, что к k -му каналу исходного АИ (данных матрицы $I_l[m,n,k]$) по строкам и по столбцам применяется преобразование с заданным числом уровней, при котором выделяется высокочастотная (В) и низкочастотная (Н) составляющие (рис. 1).

Для пошагового описания первого этапа в алгоритме сжатия необходимо ввести некоторые условные обозначения: M – количество строк, N – количество столбцов, K – количество каналов исходного многозонального АИ, l – индекс текущего уровня преобразования, L – число уровней преобразования, знак « $\lfloor$ » – округление до целого.

Шаг 1. Задать $m=0$, $n=0$, $k=1$, $l=1$.

Шаг 2. Выделить из исходного изображения матрицу $I_l[m,n,k]$ четную $I_l[m,2j,k]$ и нечетную $I_l[m,2j+1,k]$ составляющие при $j = 0, 1, \dots, \lfloor N/2^{l-1} \rfloor$.

Шаг 3. Рассчитать низкочастотную $Y[m,2j]$ и высокочастотную $Y[m,2j+1]$ составляющие путем использования, соответственно, 5-ти и 3-х слагаемых компонентов исходного изображения I_l , при $j=0, 1, \dots, \lfloor N/2^{l-1} \rfloor$:

$$Y[m,2j] = (-I_l[m,2j-1,k] + 2 \cdot I_l[m,2j,k] +$$

$$+ 6 \cdot I_l[m,2j+1,k] + 2 \cdot I_l[m,2j+2,k] - I_l[m,2j+3,k]) / 8,$$

$Y[m,2j+1] = (-I_l[m,2j,k] + 2 \cdot I_l[m,2j+1,k] - I_l[m,2j+2,k]) / 2$, или после упрощения и применения операции округления

$$Y[m,2j] = \lfloor I_l[m,2j,k] + (Y[m,2j-1] + Y[m,2j+1] + 2) / 4 \rfloor,$$

$$Y[m,2j+1] = \lfloor I_l[m,2j+1,k] - (I_l[m,2j,k] + I_l[m,2j+2,k]) / 2 \rfloor.$$

Шаг 4. Если $m < M$, то $m = m + 1$, шаг 2, иначе шаг 5.

Шаг 5. Сформировать изображение I'_l , содержащее высокочастотную и низкочастотную области (по столбцам):

Для $p=0, 1, \dots, \lfloor M/2^{l-1} \rfloor$, $q=0, 1, \dots, \lfloor N/2^l \rfloor$, $I'_l[p,q,k] = Y[m,2j]$,

Для $p=0, 1, \dots, \lfloor M/2^{l-1} \rfloor$, $q = \lfloor N/2^l \rfloor + 1, \lfloor N/2^l \rfloor + 2, \dots, \lfloor N/2^{l-1} \rfloor$, $I'_l[p,q,k] = Y[m,2j+1]$.

Шаг 6. Рассчитать низкочастотную $Y[m,2j]$ и высокочастотную $Y[m,2j+1]$ составляющие на основе изображения I'_l :

$$Y[2j,n] = \lfloor I'_l[2j,n,k] + (Y[2j-1,n] + Y[2j+1,n] + 2) / 4 \rfloor,$$

$$Y[2j+1,n] = \lfloor I'_l[2j+1,n,k] - (I'_l[m,2j,k] + I'_l[m,2j+2,k]) / 2 \rfloor.$$

Шаг 7. Если $n < N$, то $n = n + 1$, шаг 6, иначе шаг 8.

Шаг 8. Сформировать изображение, содержащее высокочастотную и низкочастотную области (по строкам):

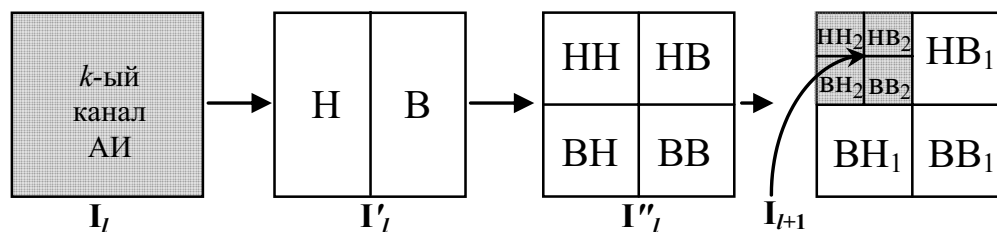


Рис. 1. Обобщенная схема выделения из данных k -го канала АИ низкочастотных и высокочастотных составляющих при вейвлет-преобразовании

$I_l^*[p,q,k] = Y[2j,q]$
 при $p=0,1,\dots,\lfloor M/2^{l-1} \rfloor, q=0,1,\dots,\lfloor N/2^{l-1} \rfloor$,
 $I_l^*[p,q,k] = Y[2j+1,q]$
 при $p=\lfloor M/2^{l-1} \rfloor+1, \lfloor M/2^{l-1} \rfloor+2, \dots, \lfloor M/2^l \rfloor, q=0,1,\dots,\lfloor N/2^{l-1} \rfloor$.
 Шаг 9. Для $p=0,1,\dots,\lfloor M/2^{l-1} \rfloor$ и $q=0,1,\dots,\lfloor N/2^{l-1} \rfloor$ сформировать $I_l^*[p,q,k] = I_l^*[p,q,k]$, если $k < L$, то $l=l+1$, шаг 2, иначе шаг 10.

Шаг 10. Если $k < K$, то $k=k+1$, шаг 2, иначе шаг 11.

Шаг 11. Конец.

Результатом этого этапа является изображение $I_l^*[m,n,k]$, содержащее выделенные низкочастотную и высокочастотную составляющие, сформированное на основе исходного изображения $I[m,n,k]$ с использованием вейвлет-преобразования глубины L .

Суть второго этапа – учет межканальной корреляции путем определения отклонений между найденной зависимостью (в данном случае 2-го порядка) и фактическими значениями в соответствующих каналах, полученными после вейвлет-преобразования данных (рис. 2). Сохранение и последующая обработка отклонений (а не исходных данных) характеризуются существенно меньшим диапазоном изменения значений, что позволит сжать такие данные с более высоким коэффициентом.

При условии, что $I_l^{KB}[m,n,k]$ – матрица значений квадранта изображения $I_l^*[m,n,k]$ с индексом KB , $KB = \{HH, HV, VH, VB\}$, $e_l[m,n,k]$ – матрица отклонений, пошаговое описание второго этапа алгоритма сжатия можно представить следующим образом:

Шаг 1. Для $m=0,1,\dots,M, n=0,1,\dots,N, KB = \{HH, \dots, VB\}$,

$$e_l^{KB}[m,n,1] = I_l^{KB}[m,n,1],$$

$$e_l^{HH}[m,n,2] = I_l^{HH}[m,n,2] - I_l^{HH}[m,n,1].$$

Шаг 2. Для $m=0,1,\dots,\lfloor M/2^l \rfloor, n=0,1,\dots,\lfloor N/2^l \rfloor, k=3,4,\dots,K$,
 $e_l^{HH}[m,n,k] = I_l^{HH}[m,n,k] - 2 \cdot I_l^{HH}[m,n,k-1] + I_l^{HH}[m,n,k-2]$.

Шаг 3. Рассчитать коэффициенты для уровня L :

$$w_l^{HB}[k] = (J_L^{HH}[k]^T J_L^{HH}[k])^{-1} J_L^{HH}[k]^T J_L^{HB}[k],$$

J_L – матрица размерности $Z(\lfloor M/2^{L-1} \rfloor + 1) \cdot (\lfloor N/2^{L-1} \rfloor + 1)$, причем $Z=1$ при $k=2$, иначе $Z=2$.

$$J_L^{HH}[k] = [I_L^{HH}[0,0,k-1], I_L^{HH}[0,1,k-1], \dots,$$

$$I_L^{HH}[\lfloor M/2^{L-1} \rfloor, \lfloor N/2^{L-1} \rfloor, k-1], I_L^{HH}[0,0,k-2],$$

$$I_L^{HH}[0,1,k-2], \dots, I_L^{HH}[\lfloor M/2^{L-1} \rfloor, \lfloor N/2^{L-1} \rfloor, k-2]],$$

$J_L^{HB}[k]$ – вектор размерности $(\lfloor M/2^L \rfloor + 1) \cdot (\lfloor N/2^L \rfloor + 1)$,

$J_L^{HB}[k] = [I_L^{HB}[0,0,k], I_L^{HB}[0,1,k], \dots, I_L^{HB}[\lfloor M/2^{L-1} \rfloor, \lfloor N/2^{L-1} \rfloor, k]]$, где «Т» – знак транспонирования, «-1» – знак обратной матрицы.

Шаг 4. Для $l=L-1, L-2, \dots, 1$ рассчитать векторы коэффициентов w_l^{HB} , для $l=L, L-1, L-2, \dots, 1$ – векторы коэффициентов w_l^{BH} и w_l^{BB} :

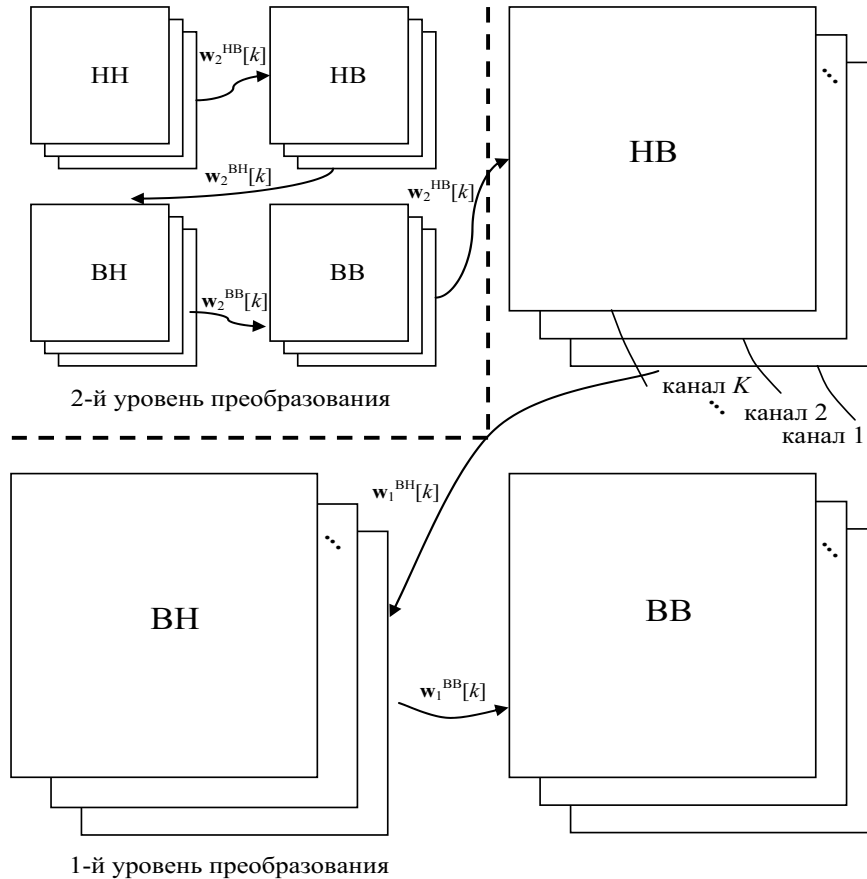


Рис. 2. Обобщенная схема учета междиапазонной зависимости для уровней преобразования 1 и 2

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_l^{\text{HB}}[k] &= (\mathbf{J}_{l-1}^{\text{BB}}[k]^T \mathbf{J}_{l-1}^{\text{BB}}[k])^{-1} \mathbf{J}_{l-1}^{\text{BB}}[k]^T \mathbf{J}'_{l-1}^{\text{BB}}[k], \\ \mathbf{w}_l^{\text{BH}}[k] &= (\mathbf{J}_l^{\text{HB}}[k]^T \mathbf{J}_l^{\text{HB}}[k])^{-1} \mathbf{J}_l^{\text{HB}}[k]^T \mathbf{J}'_l^{\text{HB}}[k], \\ \mathbf{w}_l^{\text{BB}}[k] &= (\mathbf{J}_l^{\text{BH}}[k]^T \mathbf{J}_l^{\text{BH}}[k])^{-1} \mathbf{J}_l^{\text{BH}}[k]^T \mathbf{J}'_l^{\text{BH}}[k]. \end{aligned}$$

Шаг 5. Для $l = 1, 2, \dots, L$ и $KB = \{\text{HB}, \text{BH}, \text{BB}\}$ найти

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_l^{\text{KB}}[m, n, k] &= \mathbf{I}_l^{\text{KB}}[m, n, k] - \\ &- \left[(\mathbf{w}_l^{\text{KB}}[k])^T \times \begin{pmatrix} \mathbf{I}_l^{\text{KB}}[m, n, k-1] \\ \mathbf{I}_l^{\text{KB}}[m, n, k-2] \end{pmatrix} \right]. \end{aligned}$$

Шаг 6. Если $k < K$, то $k = k + 1$, шаг 4, иначе шаг 7.

Шаг 7. Конец.

Результатом работы второго этапа является матрица отклонений $\mathbf{e}_l[m, n, k]$, которая на заключительном третьем этапе может быть сжата каким-либо алгоритмом. В данном случае для сжатия полученных данных предлагается применить широко известный арифметический алгоритм [3].

Для формирования исходного многоканального изображения $\mathbf{I}[m, n, k]$ из $\mathbf{e}_l[m, n, k]$ необходимо выполнить ряд преобразований, обратных вышеизложенным.

Эксперименты

Для определения эффективности предлагаемого трехэтапного алгоритма с точки зрения степени сжатия и вычислительных затрат, а также пределов его применимости проведен ряд экспериментов с использованием многозональных АИ различных систем ДЗЗ (таблица) в формате данных растровой геоинформационной системы *Idrisi Kilimanjaro*, а также выполнено их сравнение с результатами экспериментов, полученных для универсальных алгоритмов сжатия, реализованных в известных архиваторах *WinRar* и *WinZip* [3, 4]. Эксперименты выполнены на ПЭВМ с процессором *Intel Pentium IV* 2,8 ГГц и объемом оперативной памяти 1 Гб под управлением операционной системы *Windows XP (SP 3)*.

Таблица 1. Характеристики тестовых данных

№	Система ДЗЗ	Количество каналов	Размер изображения, пикс.	Размер файла, байт
1	SPOT	3	509×571	871917
2	SPOT	3	615×558	1029510
3	ADAR-5000	3	541×440	714120
4	Airphoto	3	652×694	1357464
5	Landsat-MSS	4	558×560	1249920
6	Landsat-MSS	4	480×480	921600
7	Landsat-TM	6	934×700	3922800
8	Landsat-TM	7	500×500	1750000
9	Landsat-TM	7	525×280	1029000
10	Flightline C1	12	949×220	2505360

Как отмечалось выше, одним из основных параметров вейвлет-преобразования является его глубина L , которая на практике может быть задана в широких пределах. Увеличение значения L должно приводить к увеличению степени сжатия за счет формирования высокочастотной области большего размера. Для определения в алгоритме

оптимальных значений параметра L с точки зрения компромисса между вычислительной сложностью и степенью сжатия был проведен ряд экспериментов, результаты которых представлены на рис. 3.

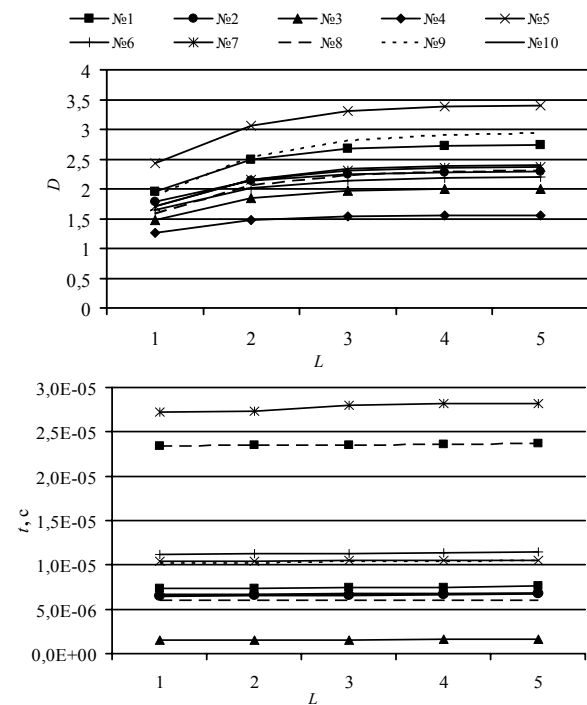


Рис. 3. Зависимость степени D и времени t_c сжатия от глубины вейвлет-преобразования L

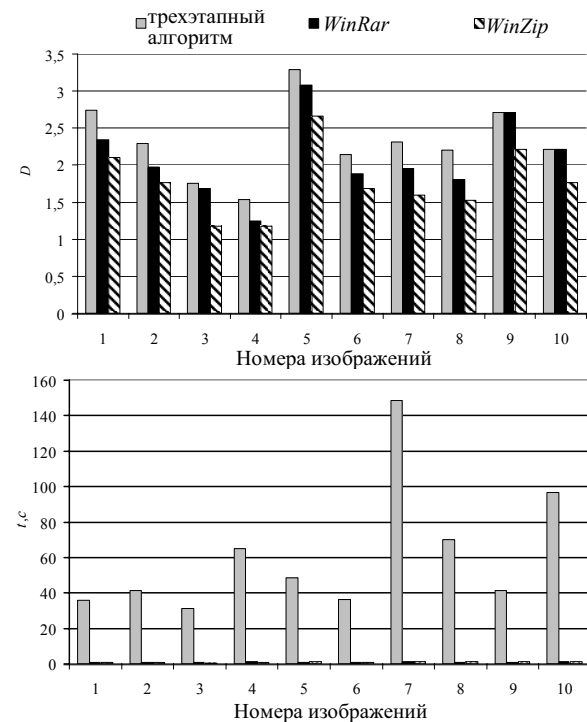


Рис. 4. Сравнительная эффективность алгоритмов сжатия

Анализ результатов экспериментов (рис. 3), показывает, что хотя вычислительные затраты алгоритма для $L \in [1; 5]$ от глубины преобразования существенно не зависят, степень сжатия D перестает

увеличиваться уже при $L \geq 3$, в связи с чем представляется целесообразным в алгоритме принять $L=3$.

На рис. 4 представлены некоторые результаты сравнительных экспериментов, демонстрирующие превосходство предлагаемого алгоритма над *WinRar* и *WinZip* в степени сжатия при более существенных вычислительных затратах.

Выводы

1. Разработан трехэтапный алгоритм сжатия многозональных аэрокосмических изображений, основанный на использовании вейвлет-преобразования и учете междиапазонной зависимости.
2. На тестовом наборе данных из 10-ти многозональных аэрокосмических изображений раз-

личных систем дистанционного зондирования Земли проведены исследования эффективности алгоритма, позволяющие подтвердить его работоспособность и определить оптимальную глубину вейвлет-преобразования $L=3$.

3. С учетом найденных значений оптимальной глубины преобразования на тестовом наборе данных проведены сравнительные исследования трехэтапного алгоритма сжатия с универсальными алгоритмами, позволяющие сделать вывод о его превосходстве в различной степени над *WinRar* и *WinZip* в эффективности сжатия, но и существенных временных затратах на обработку за счет более сложного алгоритмического обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cagnazzo M., Cicala L., Poggi G., Verdoliva L. Low-complexity compression of multispectral images based on classified transform coding // *Signal Processing: Image Communication*. – 2006. – № 10 (21). – P. 850–861.
2. Gueguen L., Trocan M., Pesquet-Popescu B., Giros A., Datcu M. A comparison of multispectral satellite sequence compression approaches // *Signals, Circuits and Systems*. – 2005. – №1. – P. 87–90.
3. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. – М.: Диалог-МИФИ, 2003. – 384 с.
4. Kiely A., Klimesh M., Xie H., Aranki N. ICER-3D: A Progressive Wavelet-Based Compressor for Hyperspectral Images // *The Interplanetary Network Progress Report*. – 2006. – P. 142–164.
5. Motta G., Rizzo F., Storer J.A. *Hyperspectral Data Compression*. – Berlin: Springer, 2006. – 415 p.

Поступила 27.10.2008 г.

УДК 004.627

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРЕХЭТАПНОГО АЛГОРИТМА СЖАТИЯ МНОГОЗОНАЛЬНЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.В. Замятин, То Динь Чыонг

Томский политехнический университет
E-mail: zamyatin@tpu.ru

Предложена и разработана модификация трехэтапного алгоритма, направленная на повышение степени сжатия аэрокосмических изображений путем использования подхода к поиску очередности обработки каналов, а также способы повышения вычислительной эффективности поиска очередности обработки, основанные на применении усеченного перебора и выборочного использования данных. Проведены комплексные исследования эффективности предложенного алгоритма в сравнении с универсальными алгоритмами сжатия на данных ряда систем дистанционного зондирования Земли, показавшие в различной степени превосходство в эффективности сжатия и некоторое отставание от них в вычислительной эффективности.

Ключевые слова:

Аэрокосмические изображения, вейвлет-преобразование, междиапазонная зависимость, сжатие изображений, повышение эффективности.

Введение

Более широкое использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) ведет к постоянному увеличению их объема, который исчисляется терабайтами и продолжает неуклонно расти. В связи с этим повышается актуальность решения задачи сжатия данных ДЗЗ с использованием различных подходов и программно-аппаратных

средств с целью существенного повышения эффективности обработки, хранения, и передачи таких данных по каналам связи [1–6]. Учитывая необходимость предварительной обработки и автоматизированной классификации таких данных, наибольшую ценность представляют алгоритмы сжатия без потерь, не допускающие искажения статистических яркостных характеристик восстановленного аэрокосмического изображения (АИ). Одним из