

ИНФОРМАТИКА
INFORMATICS

УДК 519.725;007.001.362;528.85/87(15)

Поступила в редакцию 23.01.2017

Received 23.01.2017

А. А. Дудкин¹, Д. Ю. Перцев²

¹*Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

²*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь*

**АЛГОРИТМ СЖАТИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Представлены результаты оценки корреляции гиперспектральных данных в пространственной и спектральной областях на примере гиперкуба AVIRIS Moffett Field. На их основе сформулированы ключевые особенности гиперспектральных данных. Приведены основные подходы к сжатию без потерь, выделены алгоритмы, относящиеся к тому или иному классу и применяемые в области дистанционного зондирования, показаны достоинства и недостатки конкретных реализаций на основе предсказания (linear prediction, fast lossless, spectral oriented least squares, correlation-based conditional average prediction, M-CALIC), поиска по таблице (lookup table, locally averaged interband scaling lookup tables) и вейвлет-преобразования (3D-SPECK). С учетом выявленных недостатков разработан алгоритм сжатия гиперспектральных данных, включающий следующие этапы обработки: предобработка (для каждого спектрального канала выполняется независимо), понижение степени корреляции в спектральной области и энтропийный кодер. Приведены результаты тестирования предложенного алгоритма в сравнении с альтернативными кодеками. В качестве тестовых данных использовались гиперкубы, входящие в тестовый набор AVIRIS (Cuprite, Jasper Ridge, Low Altitude, Moffett Field), который является общепризнанным стандартом при исследовании гиперспектральных данных. Полученные результаты свидетельствуют о соответствии разработанного алгоритма альтернативным подходам к сжатию без потерь, применяемым в дистанционном зондировании Земли. Достоинствами указанного алгоритма являются обеспечение параллельной обработки, вычислительная простота (отсутствие операций с высокой латентностью, например, умножения и деления), минимальные требования к объему оперативной памяти (память используется только для хранения гиперкуба и соответствует его объему). С учетом всего вышесказанного допускается схемотехническая реализация алгоритма на борту летательного аппарата.

Ключевые слова: гиперспектральные данные, AVIRIS, сжатие без потерь, спектральная корреляция, пространственная корреляция.

A. A. Doudkin¹, D. Yu. Pertsau²

¹*United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

²*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus*

COMPRESSION ALGORITHM OF THE HYPERSPECTRAL DATA OF EARTH REMOTE SENSING

The evaluation results of hyperspectral data correlation in spatial and spectral domains are presented by the example of the hypercube AVIRIS Moffett Field, and the key features of hyperspectral data are formulated. The basic approaches to lossless compression and the algorithms, which can be applied in Earth remote sensing, are considered. They are the prediction (linear prediction, fast lossless, spectral oriented least squares, correlation-based conditional average prediction, M-CALIC), the lookup tables (lookup table, locally averaged interband scaling lookup tables), the 3D wavelets (3D-SPECK). A compression algorithm of hyperspectral data is proposed with regard to the advantages and disadvantages of specific implementations of the analyzed algorithms in remote sensing. The main algorithm stages are the preprocessing (for each spectral channel, it is executed independently), the reduction of a correlation level in the spectral area and the entropy coder. The test results of the developed algorithm are given in comparison to the alternative codecs on the AVIRIS test set (Cuprite, Jasper Ridge, Low Altitude, Moffett Field) that prove the efficiency of the proposed algorithm: parallel processing, low computing cost (low latency instructions are used, no division and multiplication), small random access memory requirements (the memory is used only for storage of the hypercube). In the context of the above advantages, the hardware implementation of the algorithm is allowed for on board the aircraft.

Keywords: hyperspectral compression, AVIRIS, spectral correlation, spatial correlation.

Введение. Дистанционное зондирование Земли – это способ получения информации об объекте без непосредственного физического контакта с ним. На борту летательного аппарата (например, спутника либо самолета) устанавливается спектрометр, задачей которого является фиксация излучения с поверхности, затем бортовая система осуществляет предобработку полученных данных и передает их в центр приема информации. При этом в зависимости от типа спектрометра рабочий диапазон длин волн, фиксируемый аппаратурой, может составлять от долей микрометра (видимое оптическое излучение) до метров (радиоволны).

В зависимости от типа спектрометра различают мультиспектральные (например, IKONOS, Rapid Eye и т. д.) и гиперспектральные (например, AVIRIS). Основное отличие заключается в том, что гиперспектральные спектрометры фиксируют данные в виде непрерывного диапазона спектра с определенным шагом (например, диапазон от 500 до 700 нм с шагом 10 нм, всего 20 спектральных каналов), в то время как мультиспектральные данные могут иметь те же 20 спектральных каналов, но распределенных в спектральном диапазоне неравномерно (например, 5 каналов в диапазоне от 500 до 600 нм и 15 – в диапазоне от 600 до 700 нм).

Проблемы развития систем дистанционного зондирования Земли. Тенденции развития дистанционного зондирования показывают, что акцент в исследованиях смещается в область гиперспектральной съемки. Однако широкому практическому применению для аэрокосмического мониторинга препятствует отсутствие достаточного количества спутников и воздушных судов, оборудованных соответствующими спектрометрами; сложности, связанные с обработкой и интерпретацией больших потоков информации, формируемой этими приборами. В связи с этим одним из актуальных направлений в развитии систем дистанционного зондирования Земли является создание спутниковой гиперспектральной аппаратуры и технологий обработки получаемой с помощью нее информации на борту летательного аппарата.

Данные, которые передаются в центр приема, представляют собой трехмерный куб (рис. 1), характеризующийся следующими разрешениями: пространственным (определяет площадь поверхности); спектральным (определяет охватываемый спектральный диапазон); радиометрическим (определяет число уровней сигнала, которые сенсор может зарегистрировать).

Подобная структура, с учетом непрерывности спектрального диапазона, приводит к формированию существенного объема передаваемых на Землю данных и актуализации задачи сжатия. Например, данные спектрометра AVIRIS [1], которые используются для разработки алгоритмов и программного обеспечения для обработки гиперспектральных снимков, имеют следующие характеристики: ширина изображения 677 пикселей, 224 спектральных канала, 12 бит на канал, что в общем случае приводит к 222,1 Кб данных на одну строку. С учетом характеристик современных радиоканалов связи и того, что съемка объекта осуществляется непрерывно, важнейшими требованиями к алгоритмам сжатия данных являются высокий коэффициент сжатия и низкая вычислительная сложность алгоритма, что связано с ограниченными схмотехническими возможностями летательного аппарата.

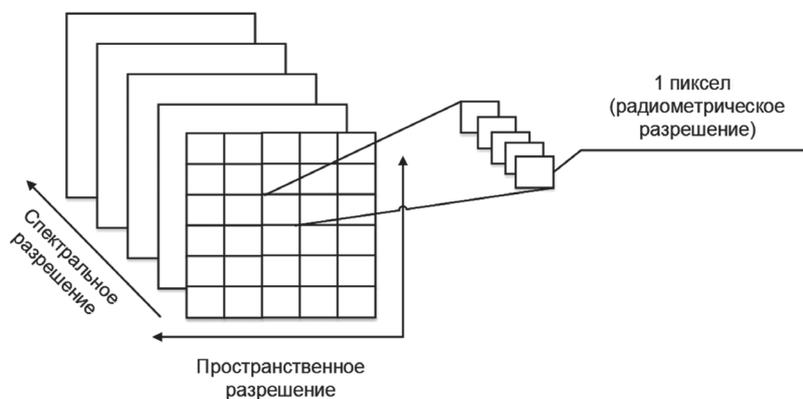


Рис. 1. Структура данных дистанционного зондирования Земли

Fig. 1. Structure of the Earth remote sensing data

Корреляция гиперспектральных данных. При разработке алгоритма сжатия было проведено исследование корреляции гиперспектральных данных, позволяющей оценить степень сходства между ними. Спектральная корреляция между каналами u и v определяется по формуле (1), пространственная корреляция для канала k в некоторой точке (i, j) на изображении определяется по формуле (2). Обе формулы были представлены в [2]:

$$c_{u,v} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \tilde{x}_{i,j,u} \cdot \tilde{x}_{i,j,v}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \tilde{x}_{i,j,u}^2 \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \tilde{x}_{i,j,v}^2}}, \quad (1)$$

$$c_k(i, j) = \frac{C_k(i, j)}{\sqrt{C_k(i, i) \cdot C_k(j, j)}}, \quad (2)$$

где u, v, k – номер спектрального канала, $\tilde{x}_{i,j,k} = x_{i,j,k} - \bar{x}_k$, $x_{i,j,k}$ – значение пиксела с координатами (i, j) на изображении в спектральном канале k , \bar{x}_k – математическое ожидание в канале k , M и N – ширина и высота канала в пространственной области, $C_k = \text{cov}(\text{img}_k)$ – матрица ковариаций, полученная при обработке изображения img_k спектрального канала k , $C_k(i, j)$, $C_k(i, i)$ и $C_k(j, j)$ – значения в матрице ковариаций C_k с координатами (i, j) , (i, i) и (j, j) соответственно.

Результат вычисления спектральной корреляции между каналами для гиперкуба Moffett Field представлен на рис. 2, *a*. Пространственная корреляция между двумя произвольными точками (i, j) изображения проиллюстрирована на рис. 2, *b* (для примера выбран канал 43 этого гиперкуба). Изменение значений корреляции представлено визуально полутонным изображением (справа приведена легенда). Можно сделать следующие выводы об особенностях гиперспектральных данных:

- спектральная корреляция между двумя соседними каналами стремится к единице;
- несмотря на сильную спектральную корреляцию между близкими каналами, в наборе возможно наличие каналов, корреляция между которыми небольшая, что объясняется погодными условиями (например, часть дальнего инфракрасного излучения поглощается парами воды и углекислым газом, поэтому если спектрометр охватывает данный диапазон длин волн, могут фиксироваться «впадины»).

Обзор алгоритмов сжатия. На основе проведенного анализа литературы были выделены два подхода к сжатию гиперспектральных данных: с применением общеизвестных методик сжатия и с адаптацией алгоритма под заданные условия.

В рамках *первого подхода* чаще всего используются алгоритмы сжатия без потерь и почти без потерь (когда потери информации не превышают уровень шума, вносимого используемым спектрометром). Они разделяются на следующие основные классы, главное различие между которыми сводится к имеющимся аппаратным ресурсам: на основе предсказания (linear prediction (LP) [3],

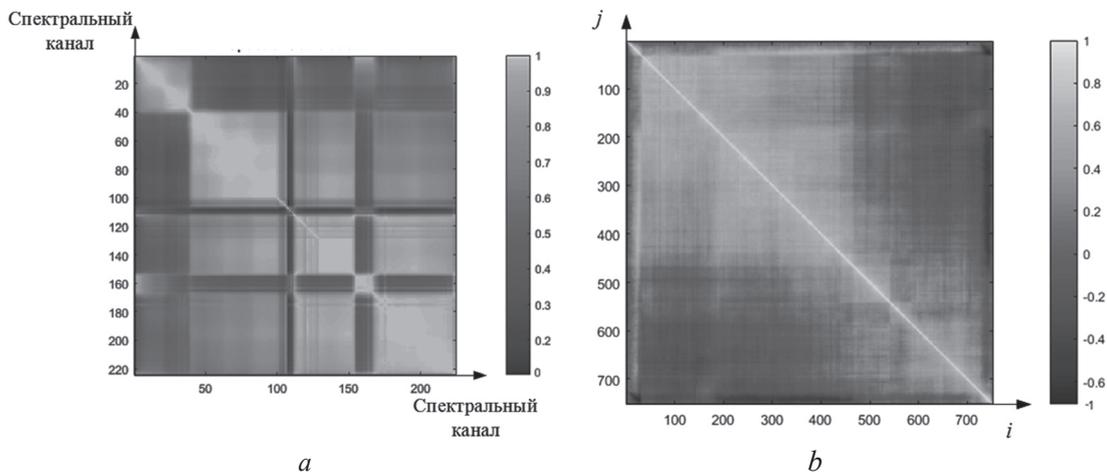


Рис. 2. Матрица корреляции для гиперкуба Moffett Field: *a* – спектральная; *b* – пространственная
Fig. 2. Correlation matrix for the hypercube Moffett Field: *a* – spectral; *b* – spatial

fast lossless (FL) [4], spectral oriented least squares (SLSQ) [5], correlation-based conditional average prediction (CCAP) [6], M-CALIC [7]); поиск по таблице (lookup table (LUT) [8], locally averaged interband scaling lookup tables (LAIS-LUT) [9]); вейвлеты (3D-SPECK [10]).

В алгоритмах сжатия на основе предсказания выделяется некоторая окрестность, над которой выполняется математическое действие (предсказание). Результат предсказания вычитается из оригинального значения и формируется ошибка предсказания, которая передается на блок энтропийного кодирования, результатом которого является сжатый поток данных. Восстановление осуществляется в обратной последовательности. В качестве алгоритма кодирования могут использоваться, например, коды Голомба – Райса или любой арифметический кодек, допускающий аппаратную реализацию.

Основным недостатком многих алгоритмов предсказания является высокая вычислительная нагрузка при небольшом использовании оперативной памяти.

Алгоритмы на основе поиска по таблице обеспечивают ускорение процесса вычисления, основанное на том, что корреляция между спектральными каналами существенна. Для этих целей вводится таблица, по которой выполняется предсказание. Размерность таблицы – число спектральных каналов, умноженное на максимально допустимое значение при данном радиометрическом разрешении. По текущему значению пиксела делается запрос в таблицу, и возвращаемое значение считается предсказанным. Дальнейшая обработка эквивалентна алгоритмам предсказания.

Алгоритмы на основе дискретного вейвлет-преобразования являются наиболее требовательными ко всем вычислительным ресурсам. Данный класс предполагает предварительный перевод спектральной плоскости в частотную область. После этого возможно организовать обработку таким образом, чтобы система кодировала в первую очередь наиболее значимые вейвлет-коэффициенты, постепенно смещаясь в область с наименее значимыми коэффициентами. Такой подход позволяет реализовать как сжатие без потерь (при обработке всех вейвлет-коэффициентов), так и управляемое сжатие с потерями. Главный недостаток алгоритмов этого класса – вычислительная сложность, связанная с преобразованием в частотную область куба данных, и требования к пропускной способности памяти из-за случайных переходов в памяти от высокочастотных к низкочастотным вейвлет-коэффициентам.

Второй подход основан на существенной избыточности получаемых данных и связан с большим спектральным разрешением. Алгоритмы данного класса основываются на следующих упрощениях: 1) условия съемки заведомо известны; при таком подходе появляется возможность на борту летательного аппарата удалить неинформативные каналы (например, учесть влияние атмосферы) либо, наоборот, выделить наиболее информативные, т. е. в любом случае получить мультиспектральные данные;

2) выполнение полного либо частичного анализа полученных данных и передача результата, а не самих данных.

Достоинством алгоритмов, реализующих данный подход, является передача только необходимых данных и существенное понижение объема передаваемых данных. Тем не менее алгоритмы практически не реализуемы на борту летательного аппарата из-за их вычислительной сложности.

Разработанный алгоритм сжатия. С учетом представленных выше особенностей гиперспектральных данных разработан алгоритм сжатия, основными компонентами которого являются: предобработка (для каждого спектрального канала), понижение степени корреляции в спектральной области и энтропийный кодер (арифметический кодек). На рис. 3 приведен пример для трех каналов.

Общее число спектральных каналов N делится на подмножества фиксированного размера n , которые передаются на вход алгоритма сжатия. При этом на n накладывается следующее ограничение: $1 < n \leq N$. Рекомендуемое значение n – 20–25 каналов. Это связано со следующими утверждениями: маленькое значение n приводит к формированию большого числа опорных кадров (первый канал из подмножества), что в дальнейшем ухудшает декорреляцию в спектральной области; предлагаемый алгоритм допускает параллельную обработку нескольких подмножеств, однако при большом значении n общее число подмножеств снижается, что может привести к неэффективному использованию вычислительных ресурсов.



Рис. 3. Алгоритм сжатия гиперспектральных данных

Fig. 3. Compression algorithm of hyperspectral data

В качестве этапа предварительной обработки используется разработанная авторами данной статьи версия вейвлет-разложения. В кадре вычитается по два соседних столбца. Полученная дельта сохраняется в первой половине столбцов кадра в качестве результата. Во второй половине кадра сохраняются опорные значения (в качестве опорных выбран первый столбец из каждой дельты). После получения промежуточного результата аналогичное действие применяется к строкам. В результате формируется кадр, по структуре схожий с вейвлет-разложением Хаара, однако допускающий возможность полного восстановления. Если число уровней разложения больше единицы, описанные выше действия повторяются для нижней правой четверти кадра.

В общем случае применение вейвлет-разложения позволяет понизить избыточность данных в пространственной области и добавляет возможность управления процессом сжатия (адаптация модели для сжатия с потерями).

Для понижения степени спектральной корреляции может применяться один из следующих подходов: использование алгоритмов предсказания, работающих в спектральной области, и вычитание соседних каналов. Изучение алгоритмов предсказания не выявило каких-либо преимуществ по сравнению с вычитанием соседних каналов. При этом аппаратная реализация последнего подхода оказывается существенно проще. В качестве алгоритмов предсказания использовались среднее арифметическое и медиана области 2×2 пиксела.

Финальным этапом предлагаемого алгоритма служит энтропийное кодирование, задачей которого является формирование результирующего сжатого потока.

Тестирование алгоритма сжатия. Для тестирования алгоритма сжатия использовался тестовый набор AVIRIS [1] (Cuprite, Jasper Ridge, Lunar Lake, Moffer Field), который считается общепризнанным стандартом при проведении исследований в области дистанционного зондирования. Данный сенсор позволяет фиксировать изображения с пространственным разрешением 20×20 метров на один пиксел в спектральной области от 400 до 2500 нм с шагом 10 нм (при этом обеспечивается 224 спектральных канала). Тестовые данные имеют следующие характеристики:

- радиометрическое разрешение – 16-битное целое число;
- число спектральных каналов – 224;
- пространственное разрешение изображения:
 - Cuprite – 614 строк, 512 столбцов (суммарный объем – 134,3 МБ);
 - Jasper Ridge – 614 строк, 2586 столбцов (суммарный объем – 678,4 МБ);
 - Low Altitude – 614 строк, 1087 столбцов (суммарный объем – 285,2 МБ);
 - Moffet Field – 753 строк, 1924 столбцов (суммарный объем – 619,0 МБ).

Тестирование проводилось на оригинальных тестовых наборах без предварительной обработки. При тестировании разработанного алгоритма сжатия использовались следующие параметры:

в качестве алгоритма понижения степени спектральной корреляции использовалось вычитание соседних каналов; в качестве энтропийного кодека применялся оптимизированный для аппаратной реализации арифметический кодек, для чего было выполнено преобразование кода в целочисленную арифметику, а операции умножения и деления заменены на операции логического сдвига.

В проведенном эксперименте оценивался коэффициент сжатия разработанного алгоритма (таблица). Для сравнения в данной таблице показаны также результаты работы основных алгоритмов на основе предсказания, поиска по таблице и вейвлет-преобразования. Для этих алгоритмов приведены коэффициенты сжатия, полученные авторами указанных алгоритмов.

Коэффициент сжатия / Compression factor

Алгоритм сжатия Compression algorithm	Тестовое множество / Test set				Среднее значение Average value
	Cuprite	Jasper Ridge	Low Altitude	Moffet Field	
LP	3,03	2,94	2,76	2,88	2,90
FL	3,23	3,16	3,00	3,16	3,14
SLSQ	3,19	3,19	3,09	3,17	3,16
CCAP	3,16	3,15	2,94	–	3,08
M-CALIC	3,22	3,17	3,01	3,38	3,20
LUT	3,44	3,23	3,35	3,17	3,30
LAIS-LUT	3,58	3,42	3,50	3,36	3,47
3D-SPECK	–	2,39	–	2,33	2,36
Разработанный алгоритм / Developed algorithm	2,70	2,90	3,10	3,00	2,93

Преимуществами разработанного алгоритма по сравнению с рассматриваемыми являются:

- по сравнению с LP и 3D-SPECK – коэффициент сжатия;
- возможность применения к любому типу сенсора без предварительного анализа характеристик и условий съемки; алгоритмы SLSQ, CCAP и M-CALIC предполагают предварительную настройку статистических коэффициентов с учетом параметров сенсора либо решение системы уравнений при съемке, что существенно усложняет аппаратную реализацию;
- алгоритм FL предполагает выделение памяти для хранения трех предыдущих спектральных каналов для формирования вектора с весовыми коэффициентами;
- при тестировании алгоритмов LP, FL и SLSQ авторы выделяют множество спектральных каналов с низкой корреляцией между соседями и в дальнейшем либо не сжимают данные каналы (получают мультиспектральные данные) либо обрабатывают их отдельно; недостатком такого подхода является необходимость анализа коэффициента корреляции и принятия решения о выборе алгоритма, что существенно усложняет аппаратную реализацию, либо формирование данного множества заранее, что накладывает ограничения на условия съемки;
- алгоритмы на основе поиска по таблице требуют дополнительного объема оперативной памяти для хранения всей истории предсказаний и установки микросхем с низкой латентностью доступа; кроме того, алгоритм LAIS-LUT при расчете весового коэффициента предполагает применение операции умножения и трех операций деления, обладающих существенной латентностью по сравнению с остальными арифметическими операциями.

Заключение. В рамках статьи рассмотрены различные подходы к сжатию гиперспектральных данных, выявлены их достоинства и недостатки. Выполнен анализ недостатков конкретных реализаций. С учетом полученных данных представлен алгоритм сжатия без потерь, применимый к классическому гиперкубу. Достоинствами алгоритма сжатия являются: возможность параллельной обработки, так как множества n спектральных каналов могут обрабатываться независимо; вычислительная простота (отсутствие арифметических операций с высокой латентностью, например, умножение или деление); минимальные требования к объему ОЗУ – память используется только для хранения гиперкуба и соответствует его объему (например, для тестового набора Low Altitude – 285,2 Мб); универсальность подхода без зависимости по типу используемого сенсора; возможность реализации на борту летательного аппарата. В дальнейшем планируется тестирование предложенного алгоритма сжатия на гиперспектральных данных, полученных с применением Фурье-интерферометра, а также разработка 3D-версии контекстной модели для бинарной версии арифметического кодирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. AVIRIS Hyperspectral Images [Electronic resource] / Jet Propulsion Laboratory. – Mode of access: http://aviris.jpl.nasa.gov/data/free_data.html. – Date of access: 10.09.2016.
2. Low-complexity lossless compression of hyperspectral imagery via linear prediction / F. Rizzo [et al.] // *Signal Proc. Letters, IEEE*. – 2005. – Vol. 12, iss. 2. – P. 138–141.
3. Klimesh, M. Low-complexity lossless compression of hyperspectral imagery via adaptive filtering: Technical Report 42-163 / Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology. – California Institute of Technology, 2005.
4. Pizzolante, R. Lossless compression of hyperspectral imagery / R. Pizzolante // *Proc. of the First Int. Conf. on Data Compression, Communications and Processing (CCP'11)*. – 2011. – P. 157–162.
5. Wang, H. Lossless hyperspectral-image compression using context-based conditional average / H. Wang, S. D. Babacan, K. Sayood // *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*. – 2007. – Vol. 45, iss. 12. – P. 4187–4193.
6. Magli, E. Optimized onboard lossless and near-lossless compression of hyperspectral data using CALIC / Magli, E., Olmo, G., Quacchio, E. // *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*. – 2004. – Vol. 1, iss. 1. – P. 21–25.
7. Huang, B. Lossless compression of hyperspectral imagery via lookup tables with predictor selection / B. Huang, Y. Sri- raja // *Proc. Image and Signal Proc. for Remote Sensing XII*. – 2006. – Vol. 6365. – P. 131–139.
8. Mielikainen, J. Lossless compression of hyperspectral images using a quantized index to lookup tables / J. Mielikainen, P. Toivanen // *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*. – 2008. – Vol. 5, iss. 3. – P. 474–478.
9. Tang, X. Three-Dimensional Wavelet-Based Compression of Hyperspectral Images / X. Tang, W. A. Pearlman // *Hyperspectral Data Compression*. – Berlin: Springer, 2006. – P. 273–308.
10. Christophe, E. Hyperspectral Data Compression Tradeoff / E. Christophe // *Optical Remote Sensing*. – Berlin: Springer, 2011. – P. 9–29.

References

1. *AVIRIS Hyperspectral Images*. Available at: http://aviris.jpl.nasa.gov/data/free_data.html (accessed 10 September 2016).
2. Rizzo F., Carpentieri B., Motta G., Storer J.A. Low-complexity lossless compression of hyperspectral imagery via linear prediction. *IEEE Signal Processing Letters*, 2005, vol. 12, no. 2, pp. 138–141. Doi: 10.1109/LSP.2004.840907
3. Klimesh M. Low-complexity lossless compression of hyperspectral imagery via adaptive filtering. Technical Report 42-163. California Institute of Technology, 2005.
4. Pizzolante R. Lossless compression of hyperspectral imagery. *Proceedings of the First International Conference on Data Compression, Communications and Processing. CCP'11*, 2011, pp. 157–162. Doi: 10.1109/CCP.2011.31
5. Wang H. Babacan S.D., Sayood K. Lossless hyperspectral-image compression using context-based conditional average. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, vol. 45, no. 12, pp. 4187–4193. Doi: 10.1109/TGRS.2007.906085
6. Magli E., Olmo G., Quacchio E. Optimized onboard lossless and near-lossless compression of hyperspectral data using CALIC. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, vol. 1, no. 1, pp. 21–25. Doi: 10.1109/LGRS.2003.822312
7. Huang B. Lossless compression of hyperspectral imagery via lookup tables with predictor selection. *Proc. Image and Signal Processing for Remote Sensing XII*, 2006, vol. 6365, pp. 131–139. Doi: 10.1117/12.690659
8. Mielikainen J. Toivanen P. Lossless compression of hyperspectral images using a quantized index to lookup tables. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, vol. 5, no. 3, pp. 474–478. Doi: 10.1109/LGRS.2008.917598
9. Tang X., Pearlman W.A. Three-Dimensional Wavelet-Based Compression of Hyperspectral Images. *Hyperspectral Data Compression*. Berlin, Springer, 2006, pp. 273–308. Doi: 10.1007/0-387-28600-4_10
10. Christophe E. Hyperspectral Data Compression Tradeoff. *Optical Remote Sensing*. Berlin, Springer, 2011, pp. 9–29. Doi: 10.1007/978-3-642-14212-3_2

Информация об авторах

Дудкин Александр Арсентьевич – доктор технических наук, заведующий лабораторией, Объединенный институт проблем информатики, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: doudkin@newman.bas-net.by

Перцев Дмитрий Юрьевич – младший научный сотрудник, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220600, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: DmitryPertsev@gmail.com

Information about the authors

Doudkin Alexander Arsent'evich – D. Sc. (Engineering), Head of the Laboratory, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: doudkin@newman.bas-net.by

Pertsau Dmitry Yur'evich – Junior Researcher, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: DmitryPertsev@gmail.com

Для цитирования

Дудкин, А. А. Алгоритм сжатия гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли / А. А. Дудкин, Д. Ю. Перцев // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2017. – № 1. – С. 120–126.

For citation

Doudkin A.A., Pertsau D.Yu. Compression algorithm of the hyperspectral data of Earth remote sensing. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series], 2017, no. 1, pp. 120–126. (In Russian).