

УДК 515.18 + 621.372.542

В.М. КОРЧИНСКИЙ, Д.Н. СВИНАРЕНКО
Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Предложен метод увеличения максимальной скорости передачи (пропускной способности) распределений яркости сканерных многоспектральных цифровых изображений дистанционного зондирования, сформированных в произвольном количестве спектральных каналов изучения – носителя видовой информации. Метод базируется на компрессии непосредственно зафиксированных распределений яркости, оптимизированной по критериям максимизации сохраняемой энергии и энергетической информационной энтропии. Компрессия осуществляется на основе разложения распределений яркости по полным функциональным базисам, обнулением части коэффициентов разложения и последующем восстановлении распределений яркости. Определение порогов обнуления коэффициентов разложения распределений яркости различных спектральных каналов сформулировано в виде двухкритериальной оптимизационной задачи максимизации отношения энергий компрессированного и исходного изображений и максимизации отношения их энергетических информационных энтропий.

Реализация предлагаемого метода включает следующие этапы: попарную ортогонализацию распределений яркости изображений спектральных каналов; компрессию ортогонализированных представлений по указанным критериям; реконструкцию распределений яркости компрессированных изображений спектральных каналов функциональным преобразованием, обратным к использованному на этапе разложения распределений яркости непосредственно зафиксированных многоспектральных изображений. Показано, что предлагаемый метод обеспечивает сужение частотного спектра компрессированных распределений яркости, повышая тем самым пропускную способность канала передачи многоспектральных цифровых изображений, и увеличение их устойчивости к помехам. Сравнение использования различных дискретизированных функциональных базисов, как основы для компрессии распределений яркости, показало наибольшую эффективность по указанным критериям дискретного функционального базиса Хартли.

Установлено, что предлагаемый метод обеспечивает высокий уровень сохранения структурной схожести функций распределения яркости исходных и компрессированных изображений спектральных каналов.

Ключевые слова: многоспектральное изображение, пропускная способность, энергетическая информационная энтропия ортогонализация, дискретное преобразование Хартли, индекс структурной схожести.

В.М. КОРЧИНСЬКИЙ, Д.М. СВИНАРЕНКО
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

ЗБІЛЬШЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

Запропоновано метод збільшення максимальної швидкості передачі (пропускної здатності) розподілів яскравості сканерних багатоспектральних зображень дистанційного зондування, отриманих у довільній кількості спектральних інтервалів випромінювання – носія видовой інформації. Метод базується на компресії безпосередньо зафіксованих розподілів яскравості, оптимізованої за критеріями максимізації енергії, що збережується у компресованих зображеннях та їхньої енергетичної інформаційної ентропії.

Компресія здійснюється на основі розкладів розподілів яскравості по повних функціональних базисах, обнулінням частини коефіцієнтів розкладів та наступною реконструкцією розподілів яскравості. Визначення порогів обнуління коефіцієнтів розкладів розподілів яскравості різних спектральних каналів сформульовано у вигляді двокритеріальної оптимізаційної задачі максимізації відношення енергій компресованого та вихідного зображень та максимізації відношення їхніх енергетичних інформаційних ентропій.

Реалізація запропонованого методу включає наступні етапи: попарну ортогоналізацію розподілів яскравості зображень спектральних каналів; компресію ортогоналізованих представлень за зазначеними критеріями; реконструкцію розподілів яскравості компресованих зображень спектральних каналів функціональним перетворенням, оберненим стосовно використаного на етапі розкладу розподілів яскравості безпосередньо зафіксованих багатоспектральних зображень. Показано, що запропонований метод забезпечує звуження частотного спектру компресованих розподілів яскравості, збільшуючи внаслідок цього пропускну здатність каналу передачі багатоспектральних цифрових зображень, та збільшення їхньої стійкості до завад передачі. Зіставлення різних дискретизованих функціональних базисів як основи для компресії розподілів яскравості показало найбільше ефективність за зазначеними критеріями дискретного функціонального базису Хартлі

Показано, що запропонований метод забезпечує високий рівень збереження структурної схожості функцій розподілу яскравості вихідних та компресованих зображень спектральних каналів.

Ключові слова: багатоспектральне зображення, пропускну здатність, енергетична інформаційна ентропія, ортогоналізація, дискретне перетворення Хартлі, індекс структурної схожості.

V.M. KORCHYNSKYI, D.M. SVYNARENKO
Oles Honchar Dnipro National University

INCREASING THE CAPACITY OF INFORMATION CHANNELS FOR TRANSMITTING MULTISPECTRAL DIGITAL IMAGES OF REMOTE SENSING

A method is proposed for increasing the maximum transmission rate (throughput) of the brightness distributions of scanner multispectral digital images of remote sensing, formed in an arbitrary number of spectral channels of study - a carrier of species information. The method is based on the compression of directly recorded brightness distributions, optimized according to the criteria for maximizing the stored energy and energy information entropy. Compression is carried out on the basis of expansions of the brightness distributions in full functional bases, zeroing out a part of the expansion coefficients and subsequent restoration of the brightness distributions. The determination of the thresholds for zeroing the expansion coefficients of the brightness distributions of various spectral channels is formulated in the form of a two-criterion optimization problem of maximizing the energy ratio of the compressed and original images and maximizing the ratio of their energy information entropies.

The implementation of the proposed method includes the following stages: pairwise orthogonalization of the brightness distributions of images of spectral channels; compression of orthogonalized representations according to the specified criteria, reconstruction of the brightness distributions of compressed images of spectral channels by functional transformation inverse to that used at the stage of decomposition of brightness distributions of directly recorded multispectral images. It is shown that the proposed method provides a narrowing of the frequency spectrum of compressed brightness distributions, thereby increasing the throughput of the transmission channel of multispectral digital images, and increasing their resistance to interference. Comparison of the use of different discretized functional bases as a basis for compression of brightness distributions showed the highest efficiency according to the specified criteria of the discrete functional Hartley basis.

It was found that the proposed method provides a high level of preservation of the structural similarity of the brightness distribution functions of the original and compressed images of spectral channels.

Keywords: multispectral image, bandwidth, energy information entropy orthogonalization, discrete Hartley transform, structural similarity index.

Постановка проблемы

Передача видовых данных (цифровых изображений) дистанционного зондирования, полученных с аэрокосмических носителей, осуществляется по каналам связи, которые характеризуются частотной полосой пропускания и пропускной способностью (наиболее возможной в данном канале скоростью передачи информации). Наиболее распространенным в настоящее время является сканерный способ формирования таких изображений, при котором строки растра формируются при движении носителя сенсора излучения – носителях видовой информации в направлении, перпендикулярном полосе обзора сканера.

Рассматриваются цифровые многоспектральные изображения (МСИ), зафиксированные в k спектральных каналах излучения – носителя видовой информации и заданные на растре размерности $n \times m$.

Вопросам анализа и обработки цифровых изображений посвящено значительное количество работ как теоретического, так и прикладного характера. Соответствующие результаты ориентированы главным образом на повышение визуального качества таких изображений, их компрессии, и опосредовано связаны с повышением пропускной способности информационных каналов их передачи.

В связи с этим актуальна проблема предварительной обработки первичных (непосредственно полученных) цифровых изображений, обеспечивающей повышение скорости их передачи и тем самым – пропускной способности канала передачи при максимальном сохранении информативности

Анализ последних исследований и публикаций

Значительное количество исследований посвящено методам компрессии (сжатия) цифровых сигналов, как способу устранения информационной избыточности. Применительно к растровым изображениям такая избыточность, как правило, связана с наличием корреляции между близкими пикселями и (или) представлением информации, несущественной для однозначной тематической интерпретации видовых данных. Наиболее существенные результаты получены на основе дискретных ортогональных преобразований распределений яркости первичных цифровых изображений [1, 2], разверток Пеано-Гильберта их растра [2, 3] и вейвлет-технологий обработки двумерных цифровых сигналов [4, 5]. Основные результаты указанных работ связаны с предварительной обработкой цифровых изображений, ориентированной на повышение визуального качества компрессированных изображений, их радиометрического и пространственного разрешения. Вопросы, связанные с оптимизацией пропускной способности каналов передачи цифровых изображений дистанционного зондирования в этих исследованиях не рассматривались.

Цель исследования

Цель работы – разработка метода увеличения пропускной способности каналов передачи цифровых изображений дистанционного зондирования, сформированных в произвольном количестве спектральных диапазонов электромагнитного излучения – носителя видовой информации.

Изложение основного материала исследования

Как известно, пропускная способность C произвольного цифрового канала передачи данных определяется соотношением (формула Шеннона-Хартли [6, 7])

$$C = W \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N_0 \cdot W} \right), \quad (1)$$

где W – ширина частотной полосы пропускания канала, S – средняя мощность информативного сигнала, N_0 – спектральная плотность шума (его мощность в единичной полосе частот), неизбежно присутствующего в канале передачи. В контексте данной работы S представляет собой среднее значение функций распределения яркости всех спектральных каналов. Из приведенного соотношения следует, что уменьшение полосы частотного спектра сигнала приводит к увеличению пропускной способности канала и тем самым – к повышению скорости передачи данных [7].

Все существующие методы компрессии цифровых сигналов с частичной утратой информативности основаны на их разложениях по полным функциональным базисам с последующим обнулением части коэффициентов разложения. Отметим, что процедура сжатия данных, кроме собственно их компрессии, обеспечивает определенное снижение уровня помех, неизбежных в реальных условиях формирования цифровых сигналов. В данной работе в качестве критериев обнуления приняты заданное отношение энергий компрессированного и первичного сигналов и заданное отношение энергетических информационных энтропий этих сигналов.

Используем предложенный в [8] способ представления уровней яркости МСИ в виде двумерного массива $\mathbf{G}_{n \times m \times k}$, где n, m – размерности раstra многоспектрального изображения, k – количество его спектральных каналов; каждый столбец $\mathbf{G}_{n \times m \times k}$ сформирован посредством упорядочения кодов яркости изображения k -го спектрального канала по строкам/столбцам. Далее рассматриваем массив $\mathbf{G}_{n \times m \times k}$ как конкатенацию по столбцам k векторов: $\mathbf{G}_{n \times m \times k} = [\mathbf{X}_{n \times m \times 1}^{(1)}, \mathbf{X}_{n \times m \times 1}^{(2)}, \dots, \mathbf{X}_{n \times m \times 1}^{(r)}, \dots, \mathbf{X}_{n \times m \times 1}^{(k)}]$. Следующий этап предлагаемого метода заключается в ортогонализации функций распределений яркости изображений спектральных каналов цифрового МСИ с целью их декорреляции и реализуется посредством QR–декомпозиции массива $\mathbf{G}_{n \times m \times k}$,

$$\mathbf{G}_{n \times m \times k} = \mathbf{Q}_{n \times m \times k} \cdot \mathbf{R}_{k \times k}, \quad (2)$$

где $\mathbf{Q}_{n \times m \times k}$ – матрица с ортогональными столбцами, $\mathbf{R}_{k \times k}$ – верхнетреугольная матрица.

Далее выполняется разложение столбцов матрицы $\mathbf{Q}_{n \times m \times k}$ по заданному дискретному ортонормированному базису в соответствии с общим выражением

$$\mathbf{C}^{(k)} = \sum_{\alpha} c_{\alpha}^{(k)} \cdot \mathbf{u}_{\alpha}, \quad (3)$$

где $\alpha = (i, j)$ – мультииндекс, суммирование по индексам i, j производится по размерностям раstra; верхним индексом k обозначен номер спектрального канала.

Значения мультииндекса, начиная с которого будет производиться обнуление коэффициентов разложения $c_{\alpha}^{(k)}$, определены как решения оптимизационной задачи минимизации отношений энергии и энергетической информационной компрессированного изображения к соответствующим значениям исходного изображения при максимальном значении индекса структурной схожести этих изображений в соответствии с его определением в работе [9]. В результате формируется множество коэффициентов разложения $\zeta_{\alpha}^{(k)}$, по которым восстанавливаются компрессированные векторы $\mathbf{V}^{(k)}$:

$$\mathbf{V}^{(k)} = \sum_{\alpha} \zeta_{\alpha}^{(k)} \cdot \mathbf{u}_{\alpha}. \quad (4)$$

Собственно реконструкция компрессированных распределений яркости выполняется последовательным применением преобразований, обратных к преобразованиям (4) и (2).

Предложенный метод реализован на основе ряда дискретных функциональных базисов: Уолша, Хаара, Хартли, дискретного косинусного преобразования [10]. Наибольшей эффективностью по указанным критериям обладает преобразование Хартли.

Ниже приведены результаты тестирования предлагаемого метода применительно к многоспектральным изображениям земной поверхности, сформированным сканером Aster с космического аппарата Terra.

На рисунках 1-3 представлены первичные растровые изображения трех спектральных каналов многоспектрального цифрового изображения с существенно различными пространственными и радиометрическими разрешениями.

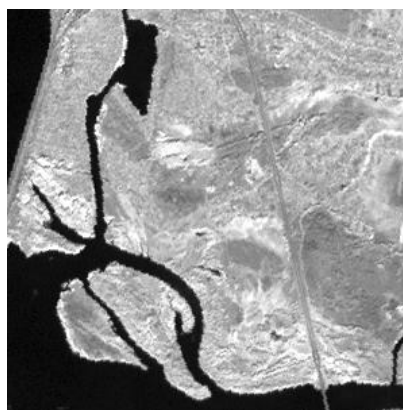


Рис. 1. Изображение спектрального канала 0.52 мкм – 0.60 мкм.

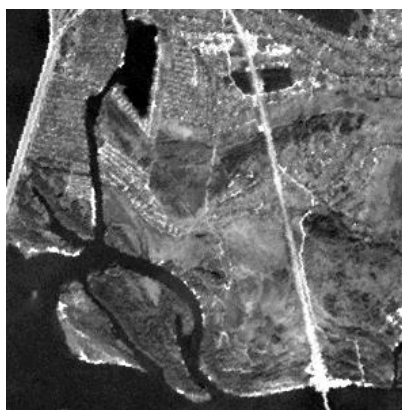


Рис. 2. Изображение спектрального канала 1.60 мкм – 1.70 мкм.

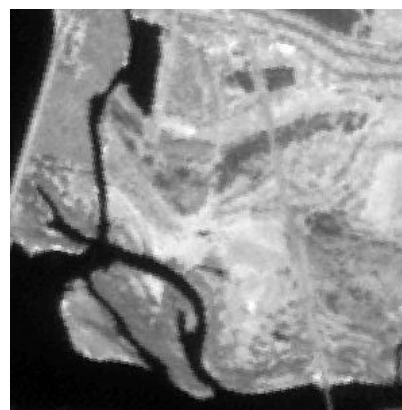


Рис. 3. Изображение спектрального канала 2.235 мкм – 2.285 мкм.

На рисунках 4 – 6 приведены компрессированные изображения этих спектральных каналов с использованием преобразования Хартли при уровнях сохраняемой энергии 90 % и энергетической информационной энтропии 94.3 %. Объем передаваемой видовой информации при этом уменьшился в 4.2 раза, а пропускная способность возросла на 27.8 %.

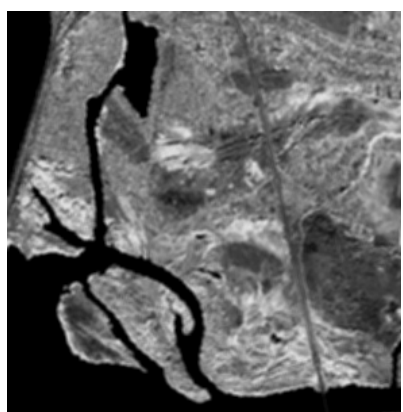


Рис. 4. Трансформированное изображение спектрального канала 0.52 мкм – 0.60 мкм.

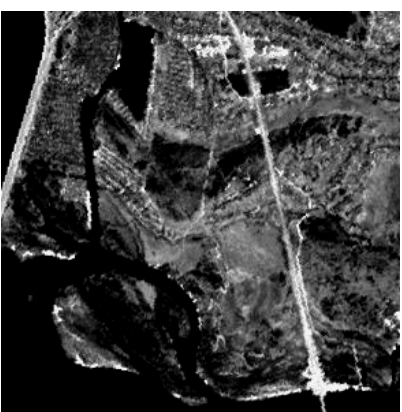


Рис. 5. Трансформированное изображение спектрального канала 1.60 мкм – 1.70 мкм.

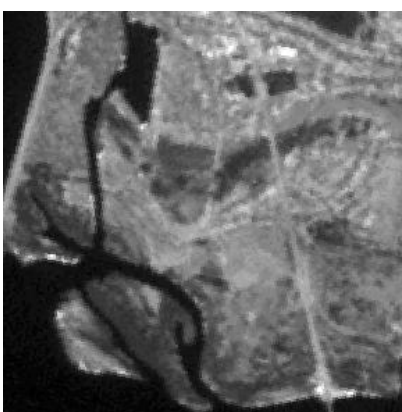


Рис. 6. Трансформированное изображение спектрального канала 2.235 мкм – 2.285 мкм.

Для анализа структурной схожести распределений яркости первичных многоспектральных изображений и изображений, синтезированных предложенным

методом, используем индексы структурной схожести, построенные по методике, предложенной в работе [9].

В таблице 1 приведены индексы структурной схожести между парами изображений, приведенных на рисунках 1 - 3 и соответствующими компрессированными изображениями (рисунки 4 - 6).

Табл. 1

Индекс структурной схожести	Изображения					
	Рис. 1	Рис. 4	Рис. 2	Рис. 5	Рис. 3	Рис. 6
	0.8527		0.8924		0.9137	

Данные таблицы свидетельствуют о высоком уровне схожести этих изображений, что подтверждается и на уровне визуального восприятия. Отметим возрастание индексов структурной схожести с уменьшением информативности (пространственной разрешающей способности).

Выводы

Предложен новый метод увеличения скорости передачи сканерных многоспектральных изображений дистанционного зондирования, зафиксированных в произвольном количестве спектральных каналов излучения – носителя видовой информации, с контролируемым уровнем их информативности. Результаты работы могут быть использованы при разработке новых информационных технологий помехоустойчивого кодирования видовых данных дистанционного зондирования.

Список использованной литературы

1. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука. Москва: Техносфера, 2004. 428 с.
2. Федосеев В.А. Компрессия изображений с помощью дискретных ортогональных преобразований, определенных на развертках двумерных областей. *Компьютерная оптика*. 2005. № 28. С. 132–135.
3. Султанов Н.Х., Багманов А.Х., Мешков И.К., Харитонов С.В. Мультимасштабная компрессия спутниковых сигналов в широкополосных системах связи. *Вестник УГАТУ*. 2007. Том 9. № 6(24). С. 213–216.
4. Voloshin V. I., Korchinsky V.M., Kharitonov M.M. A Novel Method For Correction Of Distortions And Improvement Of Information Content In Sattelite-Acquired Multispectral Images. *Advances and Challengers in Multisensor Data and Information Processing*. 2007. P. 315–323.
5. Султанов Н.Х., Багманов А.Х., Мешков И.К., Харитонов С.В. Сравнительный анализ типов вейвлет-преобразований в задаче сжатия спутниковых изображений. *Инфокоммуникационные технологии*. 2010. Том 8. № 1. – С. 46–50.
6. Крухмалев В.В., Гордиенко В.Н., Моченов А.Д. Цифровые системы передачи. Москва: Горячая линия – Телеком, 2007. 352 с.
7. Кудряшов Б.Д. Теория информации. Санкт-Петербург: ПИТЕР, 2009. 320 с.
8. Корчинский В.М., Свиначенко Д.Н. Повышение пространственного и радиометрического разрешения многоспектральных цифровых изображений дистанционного зондирования на основе их аналитических сигналов. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2020. Том 3. № 2.1. С.156–163.
9. Wang Z., Bovik A.K., Sheikh H.R., Simoncelli E.R. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity, *IEEE Transactions on Image Processing*. 2004. Vol. 13. № 4. P. 600–612.
10. Залманзон Л.А. Преобразования Фурье, Уодша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. Москва: Наука, 1989. 496 с.

References

1. Selomon, D. (2004). Szhatiye dannykh. izobrazheniy i zvuka. Moskva: Tekhnosfera.
2. Fedoseyev, V.A. (2005). Kompresiya izobrazheniy s pomoshchyu diskretnykh ortogonalnykh preobrazovaniy. opredelennykh na razvertkakh dvumernykh oblastey. *Kompyuternaya optika*. **28**, 132–135.
3. Sultanov, N.Kh., Bagmanov, A.Kh., Meshkov, I.K., & Kharitonov, S.V. (2007). Multimasshtabnaya kompresiya sputnikovykh signalov v shirokopolosnykh sistemakh svyati. *Vestnik UGATU*. **9**, 6(24), 213–216.
4. Voloshin, V. I., Korchinsky, V.M., & Kharitonov, M.M. (2007). A Novel Method For Correction Of Distortions And Improvement Of Information Content In Sattelite-Acquired Multispectral Images. *Advances and Challengers in Multisensor Data and Information Processing*. 315–323.
5. Sultanov, N.Kh., Bagmanov, A.Kh., Meshkov, I.K., & Kharitonov, S.V. (2010). Sravnitelnyy analiz tipov veyvlet-preobrazovaniy v zadache szhatiya sputnikovykh izobrazheniy. *Infokommunikatsionnyye tekhnologi* **8**, 1, 46–50.
6. Krukhmalev, V.V., Gordiyenko, V.N., & Mochenov, A.D. (2007). Tsifrovyye sistemy predachi. Moskva: Goryachaya liniya – Telekom.
7. Kudryashov, B.D. (2009). Teoriya informatsii. Sankt-Peterburg: PITER.
8. Korchinskiy, V.M., & Svinarenko, D.N. (2020). Povysheniye prostranstvennogo i radiometricheskogo razresheniya mnogospektralnykh tsifrovyykh izobrazheniy distantsionnogo zondirovaniya na osnove ikh analiticheskikh signalov. *Prikladni pitannya matematichnogo modelyuvannya*. **3**, 2.1, 156–163.
9. Wang, Z., Bovik, A.K., Sheikh, H.R., & Simoncelli, E.R. (2004). Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*. **13**, 4, 600–612
10. Zalmanzon, L.A. (1989). Preobrazovaniya Furye. Uodsha. Khaara i ikh primeneniye v upravlenii. svyazi i drugikh oblastiakh. Moskva: Nauka.

Корчинский Владимир Михайлович - д.т.н., профессор, заведующий кафедрой телекоммуникационных систем и сетей Днепровского национального университета имени Олеся Гончара. E-mail: korchins50k@i.ua, ORCID: 0000-0001-6621-0631.

Свинаренко Дмитрий Николаевич - к.т.н., доцент, проректор по научно-педагогической работе Днепровского национального университета имени Олеся Гончара, профессор кафедры телекоммуникационных систем и сетей Днепровского национального университета имени Олеся Гончара. E-mail: svynarenko_dnu@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3179-9129.