

УДК 515.18 + 621.372.542

В.М. КОРЧИНСКИЙ

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ ПО МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫМ ЦИФРОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Предложен метод определения отражательной способности (собственной яркости) материальных объектов по их изопланатическим многоспектральным изображениям, зафиксированным в коротковолновых диапазонах излучения – носителя видовой информации. Распределения яркости таких изображений представлены в виде свертки собственной яркости отображаемого объекта и аппаратной функции датчика изображения. Предлагаемый метод базируется на анализе спектральных представлений распределений яркости изображений в области пространственных частот, преобразование в которую осуществляется двумерным преобразованием Фурье указанной свертки. В качестве модели передаточных характеристик датчиков изображений рассматриваются низкочастотные пространственные фильтры, характерные для датчиков в виде фокусирующих систем, с частотами среза, обратно пропорциональными длине волны излучения – носителя видовой информации.

В качестве информационного носителя представлений цифровых многоспектральных изображений в области пространственных частот использован двумерный массив в виде конкатенации векторов, представляющих распределения спектров Фурье функций яркости отдельных спектральных каналов. Восстановление собственной яркости изображенных объектов произведено в терминах общей теории линейных измерений и выполнено посредством построения линейного оператора, реализующего концепцию «идеального прибора», компенсирующего влияние аппаратной функции датчика изображений.

Собственно реконструкция пространственных распределений собственной яркости объектов выполнена обратным двумерным преобразованием Фурье в области пространственных частот.

Предложена энтропийная интерпретация предложенного метода как способа фильтрации информационных компонент цифровых многоспектральных изображений, несущественных для их тематического анализа, при условии статистической независимости пространственных спектров зафиксированных изображений и частотных передаточных характеристик датчика видовой информации и приведены соответствующие количественные оценки.

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

Ключевые слова: многоспектральное изображение, собственная яркость, гомоморфное преобразование, ортогонализация, редукция размерности, идеальный прибор, энергетическая информационная энтропия, индекс структурной схожести.

В.М. КОРЧИНСЬКИЙ

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

ВІДНОВЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄКТІВ ЗА БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИМИ ЦИФРОВИМИ ЗОБРАЖЕННЯМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

Запропоновано новий метод визначення відбивальної спроможності (власної яскравості) матеріальних об'єктів за їх ізопланатичними багатоспектральними зображеннями, зафіксованими в оптичному, інфрачервоному та мікрохвильовому діапазонах електромагнітного проміння – носія видової інформації. Розподіли яскравості таких зображень подані у вигляді згортки власної яскравості поданих на них об'єктів та апаратної функції датчика зображення. Пропонований метод базується на аналізі спектральних представлень розподілів яскравості зображень в області просторових частот, перетворення у яку реалізовано двовимірним дискретним перетворенням Фур'є зазначеної згортки. В якості моделі передатних характеристик датчиків зображень прийняті низькочастотні просторові фільтри, які моделюють датчики зображень у вигляді фокусуємих систем, з частотами зрізу, обернено пропорційними довжині хвилі проміння – носія видової інформації.

За інформаційний носій представлень цифрових багатоспектральних зображень в області просторових частот прийнятий двовимірний масив у вигляді конкатенації векторів, які подають розподіли просторових спектрів Фур'є функцій яскравості окремих спектральних каналів. Відновлення власної яскравості відображених об'єктів здійснено в термінах загальної теорії лінійних вимірювань і виконане шляхом побудови лінійного оператора, який реалізує концепцію «ідеального приладу», який компенсує вплив апаратної функції датчика зображень. Власне реконструкція просторових розподілів яскравості здійснена оберненим двовимірним дискретним перетворенням Фур'є в області просторових частот.

Дано ентропійну інтерпретацію запропонованого методу як способу фільтрації інформаційних складових багатоспектральних цифрових зображень, несуттєвих для їхнього тематичного аналізу, за умови статистичної незалежності просторових спектрів зафіксованих зображень та частотної передатної характеристики датчика видової інформації і наведені відповідні кількісні оцінки.

Показано, що запропонований метод забезпечує високий рівень структурної схожості функцій розподілу яскравості первинних (безпосередньо зафіксованих) та реконструйованих зображень власної яскравості спектральних каналів.

Ключові слова: багатоспектральне зображення, власна яскравість, гомоморфне перетворення, ортогоналізація, редукція розмірності, ідеальний прилад, енергетичні інформаційна ентропія, індекс структурної схожості.

V.M. KORCHYNSKYI
Oles Honchar Dnipro National University

RESTORING THE INFORMATION CHARACTERISTICS OF OBJECTS ON MULTISPECTRAL DIGITAL REMOTE SENSING IMAGES

The method of determining the reflectivity (own brightness) of material objects by their isplanatical multispectral images, recorded in short-wave radiation ranges - the carrier of species information - is proposed. The brightness distributions of these images are presented in the form of a roll-up of the object's own brightness and the hardware function of the image sensor. The proposed method is based on the analysis of spectral representations of the brightness of images in the area of spatial frequencies, the transformation into which is carried out by a two-dimensional transformation of Fourier's pronounced bundle. As a model of transmission characteristics of image sensors are considered low-frequency spatial filters, characteristic of sensors in the form of focusing systems, with cut-off frequencies, inversely proportional to the wavelength of radiation - the carrier of species information.

A two-dimensional array in the form of a concatenation of vectors representing the distributions of the Fourier spectra of the brightness functions of individual spectral channels is used as an information carrier for representations of digital multispectral images in the region of spatial frequencies. The restoration of the intrinsic brightness of the depicted objects was carried out in terms of the general theory of linear measurements and carried out by constructing a linear operator that implements the concept of an "ideal device" compensating for the influence of the hardware function of the image sensor.

The actual reconstruction of the spatial distributions of the intrinsic brightness of objects is performed by the inverse two-dimensional Fourier transform in the region of spatial frequencies.

An entropic interpretation of the proposed method is proposed as a method for filtering information components of digital multispectral images that are insignificant for their thematic analysis, provided that the spatial spectra of the recorded images and frequency transfer characteristics of the sensor of the view information are statistically independent, and the corresponding quantitative estimates are given.

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 reconstructed images of spectral channels.

Key words: multispectral image, intrinsic brightness, homoform transformation, orthogonalization, dimension reduction, ideal device, energy information entropy, structural similarity index.

Постановка проблемы

Формирование видовых данных (изображений) дистанционного зондирования Земли с аэрокосмических носителей осуществляется посредством фиксации отраженного материальными объектами излучения оптического, инфракрасного и микроволнового электромагнитного излучения датчиками, которые неизбежно вносят погрешность в формируемые изображения. Наиболее распространенными в настоящее время являются датчики на основе сенсоров в виде ячеек с зарядовой связью, каждый

из которых фиксирует излучение определенного спектрального интервала. Концентрация излучения – носителя видовой информации реализуется фокусирующей системой [1].

В данной работе рассматриваются цифровые многоспектральные изображения (МСИ), зафиксированные в k спектральных каналах излучения – носителя видовой информации, заданные на растре размерности $n \times m$ и зафиксированные в спектральных диапазонах с длинами волн, намного меньшими геометрических параметров формирования изображений.

Целью тематического анализа МСИ является определение физического состояния визуализированных объектов, представленное распределениями их собственной яркости. Между тем, такие изображения содержат неустраняемые искажения, обусловленные передаточными характеристиками датчиков.

В связи с этим актуальна проблема реконструкции собственных отражательных характеристик объектов, визуализированных на МСИ и тем самым – повышения информативности тематического анализа данных дистанционного зондирования.

Анализ последних исследований и публикаций

Значительное количество исследований посвящено цифровой обработке МСИ, ориентированной на повышение пространственного и радиометрического разрешения таких изображений [1, 2]. Соответствующие результаты при всей их значимости для увеличения информационной значимости МСИ для их тематического анализа весьма опосредовано связаны с фильтрацией искажений распределений их яркости вследствие влияния аппаратной функции датчика изображения (для изображений, зафиксированных в коротковолновых диапазонах излучения – оптической фокусирующей системы). Наиболее распространенным способом частичной нейтрализации таких искажений является гомоморфная фильтрация (кепстральный анализ) цифровых сигналов и их минимальной фазовой реконструкцией, которая используется, в основном, для выравнивания освещенности цифровых изображений [3,4]. Значительными потенциальными возможностями в контексте проблематики данной статьи обладают методы редукции измерений в экспериментальных исследованиях [5], которые в настоящее время применяются, в основном, для компенсации погрешностей измерений.

Цель исследования

Цель статьи – разработка метода реконструкции собственной яркости объектов, визуализированных на цифровых изображениях дистанционного зондирования, сформированных в произвольном количестве спектральных диапазонов электромагнитного излучения – носителя видовой информации.

Изложение основного материала исследования

Как известно, пространственные распределения собственной яркости материального объекта $I_0(\mathbf{R})$ и его изопланатического изображения $I(\mathbf{r})$ в рамках коротковолнового приближения связаны соотношением (см., напр., [6])

$$I(\mathbf{r}) = \int_S P(\mathbf{r} - \mathbf{R}) \cdot I_0(\mathbf{R}) d\mathbf{R}, \quad (1)$$

где $P(\mathbf{r})$ – аппаратная функция датчика изображения; \mathbf{r} , \mathbf{R} – радиусы-векторы точек картинной и предметной плоскостей соответственно.

Соотношение (1) в спектральной области имеет вид

$$F(\mathbf{f}) = M(\mathbf{f}) \cdot F_0(\mathbf{f}), \quad (2)$$

где \mathbf{f} – вектор пространственных частот; $F(\mathbf{f})$, $F_0(\mathbf{f})$ – соответственно двумерные преобразования Фурье распределений яркости изображения и собственной яркости объекта. Посредством $M(\mathbf{f})$ обозначена передаточная функция датчика (двумерное преобразование Фурье его аппаратной функции), зависящая от длины волны излучения – носителя видовой информации.

Обобщая предложенный в [8] способ представления МСИ на спектральные представления собственной яркости $F_0(\mathbf{f})$, сформируем массив $\mathbf{G}_{n \cdot m \times k}$, где n , m – размерности раstra многоспектрального изображения, k – количество его спектральных каналов. Каждый столбец $\mathbf{G}_{n \cdot m \times k}$ сформирован посредством упорядочения спектральных представлений $F_0(\mathbf{f})$ в k -м спектральном канале по строкам/столбцам. Далее рассматриваем массив $\mathbf{G}_{n \cdot m \times k}$ как конкатенацию по столбцам k векторов: $\mathbf{G}_{n \cdot m \times k} = [\mathbf{X}_{n \cdot m \times 1}^{(1)}, \mathbf{X}_{n \cdot m \times 1}^{(2)}, \dots, \mathbf{X}_{n \cdot m \times 1}^{(r)}, \dots, \mathbf{X}_{n \cdot m \times 1}^{(k)}]$. Для обеспечения статистической независимости спектральных представлений различных каналов выполним QR-декомпозицию массива $\mathbf{G}_{n \cdot m \times k}$,

$$\mathbf{G}_{n \cdot m \times k} = \mathbf{Q}_{n \cdot m \times k} \cdot \mathbf{R}_{k \times k}, \quad (3)$$

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

С учетом указанного матричного представления распределений собственной яркости представим соотношение (2) в операторной форме:

$$\mathbf{F} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{F}_0, \quad (4)$$

где \mathbf{M} – матрица размерности $n \cdot m \times k$.

В качестве датчика изображений в современных системах дистанционного зондирования выступает оптическая фокусирующая система. Известно, что в этом случае передаточная характеристика датчика отлична от нуля в конечном диапазоне пространственных частот $[0, A]$. В частности, при круглой апертуре диаметром D фокусирующей системы и расстоянии между ее фокусом и плоскостью изображения d граничная пространственная частота равна $A = \frac{D}{2\pi^2 \lambda d}$, где λ – длина волны излучения – носителя видовой информации [6].

Вследствие этого матрица \mathbf{M} в выражении (3) является плохо обусловленной и непосредственная реконструкция распределений собственной яркости (носителем которой выступает массив \mathbf{Q}) по зафиксированному распределению \mathbf{F} в виде $\mathbf{Q} = \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{F}$ невозможна.

Рассмотрим соотношение (4) с позиций общей теории линейных измерений (см., напр., [5]): \mathbf{Q} интерпретируем как сигнал, поступающий на вход прибора, который описывается матрицей \mathbf{M} . Выполним линейное преобразование соотношения (4):

$$\mathbf{P}\mathbf{F} = \mathbf{P}\mathbf{M} \cdot \mathbf{F}_0. \quad (5)$$

Значение $\mathbf{P}\mathbf{F}$ интерпретируем как сигнал на выходе прибора $\mathbf{P}\mathbf{M}$ при подаче на его вход сигнала \mathbf{F}_0 . Очевидно, что идеальный прибор, не вносящий искажений в измеряемый сигнал, описывается единичной матрицей \mathbf{E} . Вследствие этого матрица \mathbf{P} удовлетворяет уравнению

$$\mathbf{P}\mathbf{M} = \mathbf{E}. \quad (6)$$

Нетрудно показать, что решение данного уравнения имеет вид

$$\mathbf{P} = (\mathbf{M}^T \cdot \mathbf{M})^{-1} \cdot \mathbf{M}. \quad (7)$$

Собственно реконструкция распределения яркости отражательной способности объекта выполняется последовательным применением преобразований, обратных к преобразованиям (4) и (2).

Ниже приведены результаты тестирования предлагаемого метода применительно к многоспектральным изображениям земной поверхности, сформированные фокусирующей системой с диаметром апертуры 77.5 мм и расстоянием от плоскости изображения до фазового центра системы 850 мм.

На рисунках 1-3 представлены первичные растровые изображения трех спектральных каналов многоспектрального цифрового изображения.



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

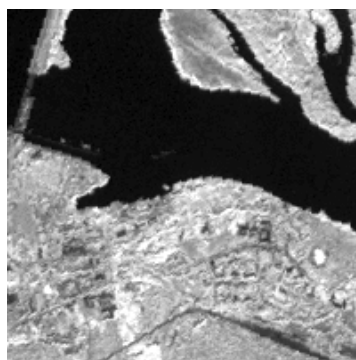


Рис. 2. Изображение спектрального канала 0.78 мкм – 0.86 мкм.

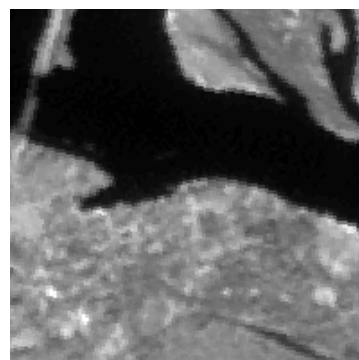


Рис. 3. Изображение спектрального канала 2.235 мкм – 2.285 мкм.

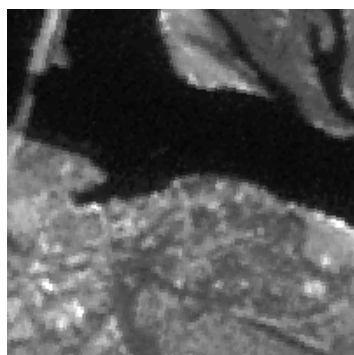


Рис. 4. Собственная яркость объектов спектрального канала 0.52 мкм – 0.60 мкм.

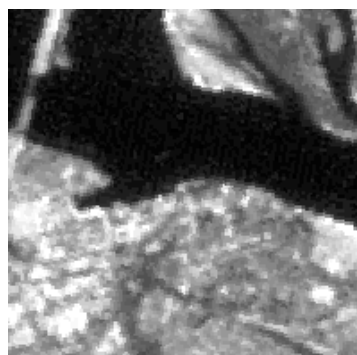


Рис. 5. Собственная яркость объектов спектрального канала 0.78 мкм – 0.86 мкм.

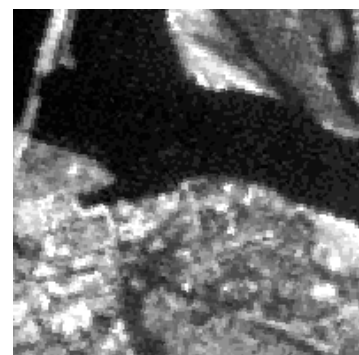


Рис. 6. Собственная яркость объектов спектрального канала 2.235 мкм – 2.285 мкм.

На рисунках 4 – 6 приведены пространственные распределения отражательной способности визуализированных объектов этих спектральных каналов.

Из сопоставления изображений, представленных на рисунках 1 – 6 хорошо видны артефакты, обусловленные влиянием формирующей изображения системы. Вместе с тем, индексы структурной схожести между первичными и синтезированными изображениями спектральных каналов, определенные по методике работы [8], весьма близки, что свидетельствует о сохранении геометрической структуры соответствующих изображений.

В табл. 1 приведены индексы структурной схожести между парами изображений, приведенных на рисунках 1 – 3 и соответствующими изображениями собственной яркости (рисунки 4 – 6).

Табл. 1

Индекс структурной схожести	Изображения					
	Рис. 1	Рис. 4	Рис. 2	Рис. 5	Рис. 3	Рис. 6
	0.8125		0.8719		0.9026	

С информационной точки зрения предложенный метод реализует исключение в синтезируемых изображениях информационных составляющих, привнесенных в анализируемые изображения аппаратной функцией датчика. Действительно, как известно, совместная информационная энтропия двух цифровых сигналов X и Y определяется соотношением [8]

$$H(X, Y) = H(X) + H(Y | X), \quad (8)$$

где $H(Y | X)$ – условная информационная энтропия сигнала Y при наличии сигнала X . Примем в качестве X и Y соответственно массивы P и F , определенные соотношениями (7), (4). В табл. 2 приведены значения совместной и условной информационной энтропий для изображений, представленных на рисунках 1 – 6.

Табл. 2

Информационная энтропия, бит	Изображения					
	Рис. 1	Рис. 4	Рис. 2	Рис. 5	Рис. 3	Рис. 6
$H(X, Y)$	9.8237		9.0124		8.3598	
$H(X)$	9.8198	9.0256	8.8231	8.1265	8.1797	8.0234
$H(Y X)$	0.1439		0.1328		0.1213	

Нетрудно видеть, что значения условной энтропии спектральных представлений синтезированного и первичного изображений по отношению к их совместной энтропии составляют не более 1.8 %, что свидетельствует о достаточно эффективной компенсации вклада передаточной характеристики датчика изображения в полученные распределения собственной яркости.

Выводы

Предложен новый метод реконструкции информационных характеристики (отражательных способностей) объектов дистанционного зондирования по их многоспектральным цифровым изображениям, зафиксированным в произвольном количестве спектральных каналов излучения – носителя видовой информации. Результаты работы могут быть использованы при разработке новых и совершенствовании существующих информационных технологий тематического анализа данных дистанционного зондирования.

Список использованной литературы

1. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. Москва: Техносфера, 2010. 560 с.
2. Sun W., Xu G., Gong P., Liang S. Fractal Analysis of Remotely Sensed Images: A Review of Methods and Applications. *International Journal of remote Sensing*. 2016. Vol. 47. № 2. P. 4963–4990.
3. Залманзон Л.А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. Москва: Наука, 2001. 496 с.
4. Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников. Москва: Додэка-XXI, 2021. 720 с.
5. Пытьев Ю.П. Задачи редукции в экспериментальных исследованиях. *Математический сборник*. 1993. Том 120. № 2. С. 145–158.
6. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Том 2. Многократное рассеяние / турбулентность / шероховатые поверхности и дистанционное зондирование. Москва: Наука, 1989. 318 с.
7. 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.
8. Кудряшов Б.Д. Теория информации. Санкт-Петербург: ПИТЕР, 2009. 320 с.

References

1. Shovengerdt, R.A. (2010). Distantionnoe zondirovanie. Modeli i metody obrabotki izobrazheniy. Moskva: Tehnosfera.
2. Sun, W., Xu, G., Gong, P., & Liang, S. (2016). Fractal Analysis of Remotely Sensed Images: A Review of Methods and Applications. *International Journal of remote Sensing*. **47**, 2, 4963–4990.
3. Zalmanzon, L.A. (2001). Preobrazovaniya Fure, Uolsha, Haara i ih primeneniye v upravlenii, svyazi i drugih oblastiakh: monografiya. Moskva: Nauka.
4. Smit, S. (2021). Tsifrovaya obrabotka signalov. Prakticheskoe rukovodstvo dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov. Moskva: Dodeka-HHI.
5. Pyitev, Yu.P. (1993). Zadachi reduksii v eksperimentalnykh issledovaniyakh. *Matematicheskii sbornik* **120**, 2, 145–158.
6. Isimaru, A. (1989). Rasprostraneniye i rasseyaniye voln v sluchayno-neodnorodnykh sredakh. Tom 2. Mnogokratnoye rasseyaniye / turbulentnost / sherohovatyie poverhnosti i distantionnoe zondirovanie. Moskva: Nauka.
7. 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.
8. Kudryashov, B.D. (2009). Teoriya informatsii. Sankt-Peterburg: PITER.

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.