

УДК 515.18 + 621.372.542

В.М. КОРЧИНСКИЙ, Д.Н. СВИНАРЕНКО  
Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара**ПРОСТРАНСТВЕННО-ИНВАРИАНТНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ  
МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ВИДОВЫХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ**

*Предложен метод представления распределений яркости цифровых изображений дистанционного зондирования, зафиксированных в различных спектральных интервалах излучения – носителя видовой информации. Метод обеспечивает инвариантность принятия решений относительно распознавания пространственных форм таких изображений, независимо от его искажений, обусловленных нестабильностями позиционных параметров формообразования изображений, характеристик трассы передачи данных, их пространственного и спектрального разрешения.*

*Ключевые слова: цифровое изображение, радиометрическое преобразование, преобразование Хартли, интегральный информационный признак, информационная энтропия.*

В.М. КОРЧИНСЬКИЙ, Д.М. СВИНАРЕНКО  
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара**ПРОСТОРОВО-ИНВАРИАНТНЕ ПОДАННЯ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ ВИДОВИХ ДАНИХ  
ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ**

*Запропоновано метод інформаційного подання розподілів яскравості багатоспектральних цифрових зображень дистанційного зондування, зафіксованих у доволій кількості спектральних інтервалів проміння – носія видової інформації. Метод забезпечує інваріантність прийняття рішень щодо розпізнавання просторових форм таких зображень незалежно від їхніх спотворень, спричинених нестабільністю позиційних умов формоутворення, характеристик траси передачі даних, їхнього просторового та спектрального розрізнення.*

*Ключові слова: цифрове зображення, радіометричне перетворення, перетворення Хартлі, інтегральна інформаційна ознака, інформаційна ентропія.*

V.M. KORCHYNSKYI, D.M. SVYNARENKO  
Oles Honchar Dnipro National University**SPATIALLY-INVARIANT REPRESENTATION OF THE MULTISPECTRAL SPECIFIC DATA  
OF REMOTE SENSING**

*The paper is devoted to formulation of a new method of informational representation of the brightness of digital images of the remote sensing fixed in various spectral intervals of radiation – the carrier of the specific information. The method ensures invariance for solutions concerning the recognition of geometrical forms of such images rather from the distortions caused by the instabilities of positional parameters of fixing the images, their space and radiometric resolving power. In this aspect definition of cumulants for brightness distributions of multispectral images at their Hartley transformations are generalized. Invariant informational features are defined on set of the dimensionless cumulants received on the basis of Hartley integral transformation in a dimensionless form for security of invariancy concerning the geometrical distortions of images.*

*Directly invariant informational features are presented in the form of the quadrics of a various order depending on dimensionless cumulants in corresponding metric space. It is shown that space distortions of multispectral images of remote sensing fixed from space carriers with sufficient accuracy are described by affinities on a plane of images and consequently can be effectively presented by the set of the offered informational indications.*

*The potency of set of invariant features, sufficient for authentic informational representation of multispectral images of sensing by criterion of maximization of their joint entropy is defined.*

*It is shown that association of informational entropy of the offered informational indications on their order is approximated by normal distribution.*

*Estimations of the informational importance of the images restored on final set of cumulants are reduced. Efficiency of the offered method for recognition is justified for a recognition of 2D and 3D objects extracted from binary/graylevel/color images.*

*The results of work can be used at the thematic analysis of multispectral images of remote sensing and pattern recognition.*

*Keywords: digital image, remote sensing, affine space transformation, radiometric resolution, Hartley transform, integral informational features, informational entropy.*

### Постановка проблемы

Одной из основных задач тематического анализа видовых (сопровождающихся изображениями) данных дистанционного зондирования является распознавание геометрических форм визуализированных объектов. Современные аппаратные средства дистанционного зондирования (в частности, Земли с аэрокосмических аппаратов) обеспечивают фиксацию таких данных непосредственно в цифровом формате в значительном количестве спектральных интервалов электромагнитного излучения – носителя видовой информации. Множество изображений различных спектральных каналов образует единый геометрический объект – многоспектральное изображение (МСИ). Аппаратная фиксация МСИ сопровождается помехами вследствие временной нестабильности позиционных условий съемки и состояния трассы распространения информационного сигнала.

Проблема автоматизированного анализа ДЗЗ имеет два аспекта: 1) обеспечение инвариантности принятия решений относительно достоверного распознавания геометрических форм объектов; 2) представление распределений яркости анализируемых изображений набором информационных признаков, достаточным для однозначной идентификации объекта распознавания. Отметим, что второй аспект данной проблемы связан с компрессией первичных (непосредственно полученных) данных ДЗЗ – уменьшением их объема при сохранении информационной значимости, существенной для последующего тематического анализа.

В настоящее время основным способом решения указанных проблем является представление распределений яркости множеством их интегральных информационных признаков (ИИП), достаточным как для достоверной интерпретации изображения, так и для восстановления распределений их яркости по конечному набору ИИП.

Поэтому актуальна проблема построения систем ИИП, инвариантных относительно искажений, сопровождающих формирование многоспектральных видовых данных ДЗЗ независимо от физической природы их образования.

### Анализ последних исследований и публикаций

В настоящее время наибольшее распространение имеют системы ИИП растровых изображений в виде коэффициентов разложения функции распределения яркости  $f(\mathbf{r})$  ( $\mathbf{r}$  – радиус-вектор точки поля изображения) в виде отрезка обобщенного ряда Фурье по какой-либо функционально полной системе базисных функций (как правило, полиномиальных): 
$$f(\mathbf{r}) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n \cdot u(\mathbf{r}) \quad [1, 2].$$
 Непосредственно

множество ИИП образует совокупность коэффициентов разложения  $\{c_n : n = \overline{0, N-1}\}$ , которые не инвариантны относительно произвольных преобразований распределений яркости  $f(\mathbf{r})$ , хотя известно определенное количество ИИП в виде комбинаций коэффициентов  $\{c_n : n = \overline{0, N-1}\}$ , инвариантных к некоторым точечным геометрическим преобразованиям изображений и их комбинаций (параллельные переносы, повороты, гомотетия) при сохранении уровня яркости  $f(\mathbf{r})$  [3] и неточечных геометрических преобразованиях изображений [1]. Однако, отсутствует общая методика получения инвариантных ИИП даже для такого ограниченного круга искажений изображений.

Возможности информационного представления распределений яркости конечными наборами ИИП ограничены еще и тем, что известные ИИП определены лишь для изображений какого-либо фиксированного спектрального канала, а не всей их совокупности как единого геометрического объекта – МСИ.

### Цель исследования

Цель данной статьи заключается в разработке альтернативного метода пространственно-инвариантного представления конечным множеством ИИП распределений яркости цифровых изображений дистанционного зондирования, зафиксированных в произвольном количестве спектральных каналов. Метод обеспечивает инвариантность принятия решений относительно распознавания пространственных форм таких изображений с контролируемым уровнем достоверности независимо от их искажений, обусловленных нестабильностями позиционных параметров формообразования изображений, характеристик трассы передачи данных, их пространственного и спектрального разрешения.

### Изложение основного материала исследования

Далее предполагается, что анализируемый цифровой МСИ задан на растровой сетке размерностью  $n \times m$  пикселей и включает  $k$  спектральных каналов. В соответствии с методикой, предложенной в [4], представим МСИ двумерным массивом данных  $\mathbf{D}$  в виде матрицы  $\mathbf{M}_{nm \times k}$  с ортогонализированными

столбцами, каждый из которых представляет изображение отдельного спектрального канала, строки – значениям уровней яркости пикселей соответствующего спектрального канала, упорядоченных по столбцам либо строкам растра. Принципиально важным моментом является обеспечение ортогональности столбцов матрицы  $\mathbf{M}_{nm \times k}$ , что обеспечивает декорреляцию распределений изображений разных спектральных каналов и тем самым – возможность их независимой обработки [4]. В данной работе ортогонализация осуществлялась на основе QR-разложения массива  $\mathbf{D}$ , поскольку этот метод обеспечивает, как показали многочисленные вычислительные эксперименты применительно к многоспектральным изображениям, наименьшие значения попарных скалярных произведений столбцов матрицы  $\mathbf{M}_{nm \times k}$  в евклидовом пространстве в сравнении с другими вычислительными алгоритмами ортогонализации [5].

Как известно, при малости длины волны излучения – носителя видовой информации в сравнении с расстоянием, с которого осуществляется съемка, и характерными размерами датчика изображений пространственные распределения их яркости представляют собой свертку передаточной характеристики трассы распространения излучения с собственной яркостью объекта фиксации [6, 7].

В качестве основы формирования пространственно-инвариантных ИИП (в отличие от работы [4], где для этой цели использовалось интегральное преобразование Фурье) примем двумерное интегральное преобразование Хартли, определяемое соотношениями [8]:

$$\begin{aligned} H(\mathbf{u}) &= \int_{(S)} f(\mathbf{x}) \operatorname{cas}(2\pi \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{x}) d\mathbf{x}, \\ f(\mathbf{x}) &= \int_{-\infty}^{\infty} H(\mathbf{u}) \operatorname{cas}(2\pi \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{x}) d\mathbf{u}, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\operatorname{cas}(\cdot) = \cos(\cdot) + \sin(\cdot)$ ,  $f(\mathbf{x})$  – функция распределения яркости цифрового изображения; интегрирование в первом соотношении (1) выполняется по полю изображения.

Выбор преобразования Хартли для построения ИИП обусловлен его свойством фильтрации аддитивных гауссовых помех информационного сигнала (в контексте данной работы – распределениями яркости цифровых изображений МСИ) на трассе распространения излучения – носителя видовой информации [8]. Как показано в работе [7], такой характер имеют помехи, возникающие вследствие флуктуаций физических характеристик атмосферы.

Исходя из общего определения семиинвариантов независимо от интегрального преобразования первичного распределения  $f(\mathbf{x})$  (см., напр. [7]), получим

$$Q_P \equiv Q_{pq} = \frac{\partial^{p+q}}{\partial u_1^p \partial u_2^q} \ln H(\mathbf{u}) \Big|_{\mathbf{u}=0}, \tag{2}$$

де  $H(\mathbf{u})$  – интегральное преобразование Хартли;  $\mathbf{u} = (u_1, u_2)$ ;  $p$  и  $q$  – целые положительные числа, начиная с нуля;  $P = p + q$  – порядок семиинварианта.

Отметим, что преимущество преобразования Хартли с позиций формирования ИИП в сравнении с преобразованием Фурье, использованном в работах [4, 9], состоит в вещественности его значений.

Обобщая результаты работы [5], инвариантные информационные признаки определим на множестве безразмерных семиинвариантов:

$$z_i = Q_{i-1, N+1-i} \exp\left(-\frac{N \cdot Q_{0,0}}{2}\right), \quad i = \overline{1, N+1}, \tag{3}$$

где  $N = p + q$ .

Нетрудно видеть, что величины  $z_i$ ,  $i = \overline{1, N+1}$  не зависят от изменений яркости всех спектральных каналов МСИ, представляемых элементами матрицы  $\mathbf{M}_{nm \times k}$ .

Пространственные и радиометрические искажения распределений яркости изображений с достаточной точностью аппроксимируются аффинными преобразованиями в трехмерном декартовом пространстве  $\mathbf{E}^3$  ("координатная плоскость изображения – уровень яркости") [7] и поэтому могут быть

представлены в виде  $\bar{e}_i = \sum_{k=1}^3 a_{i,k} \cdot e_k$ , где тильдой отмечены преобразованные компоненты векторов

$e \in E^3$ ,  $a_{i,k}$  – элементы матрицы аффинного преобразования, причем  $a_{i,k} > 0$ .

Поскольку двумерный массив данных  $D$ , определенный выше, является проекцией пространства  $E^3$ , для анализа данных, представленных в нем, можно использовать результаты работы [4] в части аналитического представления ИИП, инвариантных по отношению к геометрическим, яркостным и радиометрическим преобразованиям МСИ при обобщении на преобразование Хартли в форме:

$$I_N = z_{N-1}^2 - 2 \sum_{k=0}^{N-1} (-1)^k \frac{N!!}{(N-k-1)!(N+k+1)!} \cdot z_{N-k} \cdot z_{N+k+2}, \tag{6}$$

где нижний индекс  $N$  обозначает порядок информационного признака.

Определение количества информационных признаков вида (6), необходимых для достоверной идентификации распределений яркости МСИ, инвариантной относительно пространственных и яркостных искажений, обусловленных указанными выше факторами, производилось по критерию максимизации информационной энтропии изображений всех спектральных каналов (использовалось многомерное определение информационной энтропии, приведенное в [5]).

Ниже приведен пример использования предложенного метода пространственно-инвариантного представления многоспектральных изображений дистанционного зондирования.

На рис. 1–4 представлены первичные 2D изображения фиксированной сцены, сформированные одновременно в четырех спектральных каналах излучения – носителя видовой информации. Пространственное и спектральное разрешения изображений существенно различны (убывают с увеличением длины волны излучения).

На рисунке 5 приведена зависимость информационной энтропии ИПП (в битах) от их порядка при варьировании параметров аффинных искажений МСИ в широких пределах.

Нетрудно видеть, что максимизация информационной энтропии достигается при количестве ИИП около 80, причем характер приведенной зависимости практически совпадает с гауссовским статистическим распределением. Приведенный результат получен для МСИ, представленных на рис. 1-4. С большой точностью он подтвердился результатами многочисленных вычислительных экспериментов с изображениями, зафиксированными в спектральных интервалах от 0.52 мкм до 2.43 мкм (сканер ASTER) и с той же разрядностью раstra .



Рис. 1. Изображение спектрального канала 0,52 мкм – 0,60 мкм (пространственное разрешение 15 м).

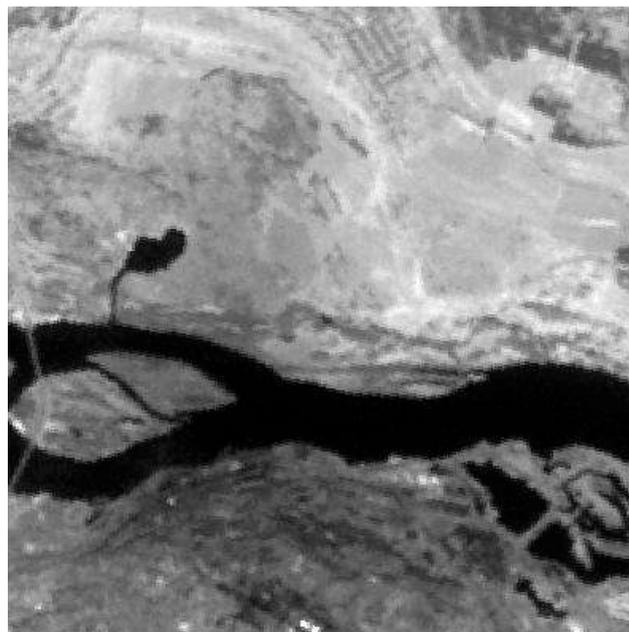


Рис. 2. Изображение спектрального канала 1,60 мкм – 1,70 мкм (пространственное разрешение 30 м).



Рис. 3 Изображение спектрального канала  
2,185 мкм – 2,225 мкм  
(пространственное разрешение 30 м)

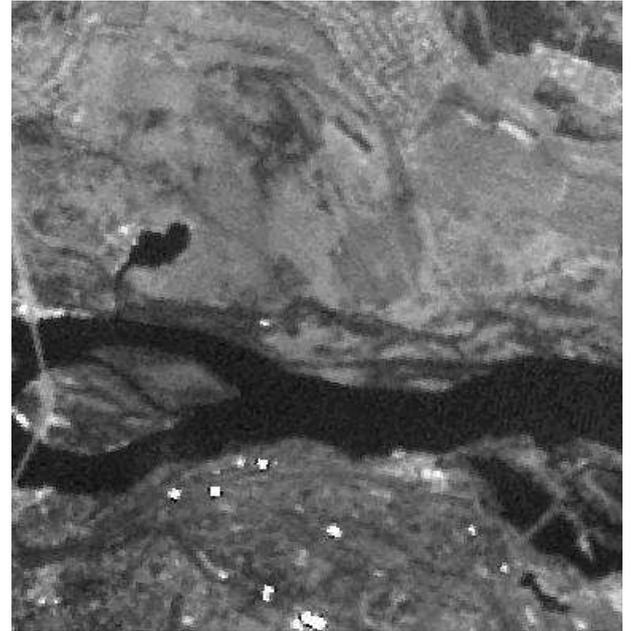


Рис. 4 Изображение спектрального канала  
2,360 мкм – 2,430 мкм  
(пространственное разрешение 30 м)

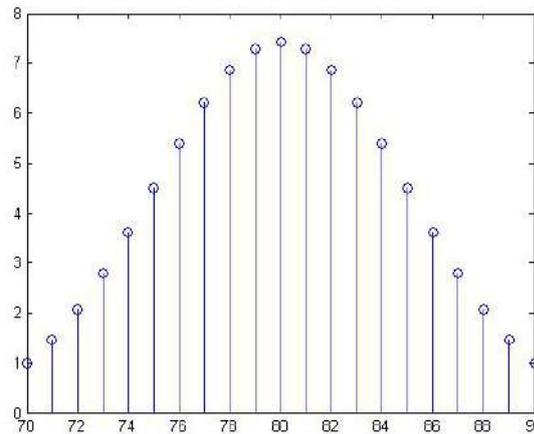


Рис. 5 Зависимость информационной энтропии ИИП от его порядка.

Дискретизированные распределения яркости любого спектрального канала МСИ, восстановленные по конечному множеству предложенных ИИП, исходя из выражений (1), (2), описываются соотношениями:

$$f_k(x) = \sum_{n=0}^{N-1} H(n) \cdot \exp\left[\sum_{i=1}^k \frac{Q_P^i}{i!}\right] \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot x \cdot n}{N}\right), \quad (7)$$

где  $K$  – количество спектральных каналов;  $P$  – порядок ИИП;  $k$  – номер спектрального канала;  $N = n \cdot m$ .

**Выводы**

В работе предложен новый эффективный метод пространственно-инвариантного представления многоспектральных изображений дистанционного зондирования, представленных в растровом формате. Метод обеспечивает инвариантность принятия решений относительно распознавания пространственных форм таких изображений, независимо от его искажений, обусловленных нестабильностями позиционных параметров формообразования изображений, характеристик трассы передачи данных, их пространственного и спектрального разрешения в сочетании с компрессией первичных (непосредственно полученных) видовых данных.

В отличие от существующих методов информационного представления изображений на основе их интегральных информационных признаков, предложенный метод позволяет анализировать все множество изображений, полученных в произвольном количестве спектральных каналов излучения – носителя видовой информации.

Перспективы дальнейших исследований, связанных с проблематикой данной работы, связаны с оценкой информационных потерь при восстановлении различных спектральных каналов по конечному набору интегральных информационных признаков.

#### Список использованной литературы

1. Flusser J. 2D and 3D image analysis by moments / J. Flusser, T. Suk, B. Zitova. – N.-Y., London: J.Wiley, 2017. – 530 p.
2. Moments and Moment Invariants – Theory and Applications / Ed. by A. Papakostas. – Chichester, U.K.: Wiley, 2014. – 288 p.
3. Куафе Ф. Взаимодействие робота с внешней средой / Ф. Куафе: Пер. с франц. – М.: Мир, 1985. – 286 с.
4. Корчинский В.М. Многомерное векторное представление распределений яркости многоспектральных растровых изображений дистанционного зондирования Земли / В.М.Корчинский // Вестник Херсонского национального технического университета. – Херсон, 2014. – № 3 (50). – С. 90-93.
5. Press W.H. Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing / W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P Flannery. – Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore: Cambridge University Press., 2007. –1962 p.
6. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Многократное рассеяние / турбулентность / шероховатые поверхности и дистанционное зондирование / А. Исимару: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 318 с.
7. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р.А. Шовенгердт: Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.
8. Брейсуэлл Р. Преобразование Хартли. Теория и приложения / Р. Брейсуэлл: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 176 с.
9. Корчинский В.М. Информационная технология повышения эффективности тематического анализа многоспектральных космических снимков / В.М. Корчинский, Д.В. Маслей, А.С. Бушанская, А.Е. Геленко, А.А. Галищук // Космическая техника. Ракетное вооружение. – Днепропетровск: EOS Data Analytics, 2015. – №1. – С. 17-21.