

УДК 515.18 + 621.372.542

В.М. КОРЧИНСЬКИЙ, Д.М. СВИНАРЕНКО
Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара**ІНФОРМАЦІЙНІ ОЗНАКИ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ РАСТРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ
ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ, ІНВАРІАНТНІ ДО ГЕОМЕТРИЧНИХ
ПЕРЕТВОРЕНЬ ТА ПРОСТОРОВОЇ РОЗРІЗНЕНОСТІ**

Запропоновано метод ідентифікації просторових розподілів яскравості багатоспектральних цифрових зображень, отриманих з аерокосмічних носіїв, інваріантної до геометричних спотворень зображень, зумовлених позиційними нестабільностями їх формоутворення та просторової розрізненості.

Ключові слова: семіінваріант, спектральний канал, растрове зображення, яскравість, радіометричне перетворення, інформаційна ознака, просторове розрізнення.

В.М.КОРЧИНСКИЙ, Д.Н.СВИНАРЕНКО
Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРИЗНАКИ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ РАСТРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ, ИНВАРИАНТНЫЕ К ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ
ПРЕОБРАЗОВАНИЯМ И ПРОСТРАНСТВЕННОМУ РАЗРЕШЕНИЮ**

Предложен метод идентификации пространственных распределений яркости многоспектральных цифровых изображений, полученных с аэрокосмических носителей, инвариантной к геометрическим искажениям изображений, вследствие позиционных нестабильностей их формообразования и пространственного разрешения.

Ключевые слова: семиинвариант, спектральный канал, растровое изображение, яркость, информационный признак, пространственное разрешение.

V.M. KORCHYNSKYI, D.M. SVYNARENKO

**INFORMATION FEATURES OF MULTISPECTRAL RASTER IMAGES OF REMOTE SENSING
INVARIANT TO GEOMETRICAL TRANSFORMATIONS AND THE SPACE RESOLUTION**

The method is offered for identification the spatial brightness distributions of the multispectral digital remote sensing images, invariant to geometrical distortions of images, owing to position instabilities of their registration.

Keywords: cumulant, the spectral channel, a half-tone image, brightness, the informational feature, space resolution.

Постановка проблеми

Сучасні апаратні засоби дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з аерокосмічних носіїв забезпечують отримання видових даних (зображень) у цифровому форматі, що фіксуються у значній кількості спектральних інтервалів електромагнітного проміння – носія видової інформації. У сукупності множина зображень, одержаних у різних спектральних каналах фіксації, утворює єдиний геометричний об'єкт – багатоспектральне зображення (БСЗ). Реєстрація БСЗ супроводжується спотвореннями, зумовленими неминучими у реальних умовах зйомки нестабільностями позиційних умов формоутворення зображень і реалізується у вигляді геометричних, яскравісних спотворень та розмиття розподілів яскравості отриманих зображень. Зазначимо, що просторова роздільна здатність (просторове розрізнення) у залежності від довжини хвилі проміння – носія видової інформації також може бути подана як масштабне перетворення зображення.

Одна з основних проблем, пов'язаних з тематичною інтерпретацією видових даних ДЗЗ, полягає у їх ідентифікації (розпізнаванні) – віднесенні зображення, що аналізується, до класу еквівалентності, який включає усі можливі просторові розподіли яскравості зображень фіксованого матеріального об'єкту (сцени), незалежно від їх спотворень, зумовлених зазначеними факторами.

На даний час основою математичних моделей розпізнавання зображень є аналіз їхніх інформаційних ознак (ІО) – інтегральних характеристик розподілів яскравості, які у сукупності утворюють інформаційне подання об'єкту ідентифікації, і цій підставі віднесення його до відповідного класу еквівалентності (за термінологією теорії розпізнавання – "образу").

Тому актуальна проблема побудови систем ІО, інваріантних до спотворень, які супроводжують формування багатоспектральних видових даних ДЗЗ.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

На даний час найбільш поширені системи ПО растрових зображень базуються на моментах розподілів яскравості $f(\mathbf{r})$ (тут і далі \mathbf{r} – радіус-вектор поля зображення). У загальному випадку такі моменти є коефіцієнтами узагальненого ряду Фур'є $f(\mathbf{r}) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n u_n(\mathbf{r})$, де $u_n(\mathbf{r})$ – повна поліноміальна система функцій [1–2]. Безпосередньо множина моментів $\{c_n : n \in \mathbb{Z}\}$ не є інваріантною до будь-яких перетворень розподілу яскравості $f(\mathbf{r})$. Відома певна кількість ПО на основі моментів, інваріантних до деяких точкових геометричних перетворень зображень та їх комбінацій (паралельні перенесення, поворот, гомотетія) при збереженні рівня яскравості $f(\mathbf{r})$ [1, 3] та неточкових геометричних перетворень зображень [2], однак відсутня загальна методика отримання інваріантних ПО навіть для такого обмеженого кола спотворень зображень.

Можливості способу інформаційного подання розподілів яскравості множинами відомих ПО обмежені, у першу чергу тим, що ПО визначені лише стосовно зображень фіксованого спектрального каналу БСЗ, що виключає можливість аналізу БЗС як єдиного геометричного об'єкту.

Мета дослідження

Мета даної статті полягає у розробці методу ідентифікації багатоспектральних зображень ДЗЗ на основі їхнього подання множинами інтегральних інформаційних ознак, інваріантних щодо просторових (афінних), радіометричних та яскравісних перетворень, зумовлених неминучими у процесі реальної зйомки нестабільностями позиційних параметрів формування зображень.

Викладення основного матеріалу дослідження

Визначення пропонованих інваріантних ІО базується на способі багатовимірному векторного представлення БСЗ, запропонованому у роботі [4], за якого БСЗ подається двовимірним масивом даних Ω у вигляді матриці $\mathbf{M}_{nm \times k}$ з ортогоналізованими стовпцями, кожний з яких відповідає зображенню окремого спектрального каналу k ; рядки – пікселю відповідного растрового зображення, заданого на растрі $\mathbf{M}_{nm \times k}$ пікселів та упорядкованого за стовпцями / рядками растру; елементи $\mathbf{M}_{nm \times k}$ подають рівні яскравості відповідних комірок растру. Суттєвою особливістю цього методу є ортогональність стовпців матриці $\mathbf{M}_{nm \times k}$, що забезпечує ліквідацію статистичного зв'язку між зображеннями окремих спектральних складових БСЗ і тим самим – їх незалежне оброблення.

Далі використовуємо координатний опис елементів масиву Ω у вигляді контраваріантних векторів $\omega = (\omega^1, \omega^2, \omega^3)^T$, де верхні індекси 1 – 3 позначають номер спектрального каналу, номер пікселю упорядкованого описаним способом МСИ, рівню яскравості цього пікселю відповідно.

На відміну від традиційного опису зображень множиною ПО у вигляді моментів, використаємо подання БСЗ множинами двовимірних семіінваріантів (кумулянтів) усієї множини розподілів його яскравості, поданої масивом $\mathbf{M}_{nm \times k}$. Узагальнюючи означення семіінваріантів (див., наприклад, [5]) на випадок функціонального розподілу, який залежить від двох параметрів (у розглядуваному випадку – рядки та стовпці масиву $\mathbf{M}_{nm \times k}$) отримаємо

$$S_{pq} = \frac{1}{j^{p+q}} \frac{\partial^{p+q}}{\partial u_1^p \partial u_2^q} \ln F(\mathbf{u}) \Big|_{\mathbf{u}=\mathbf{0}}, \quad (1)$$

де p, q – цілі невід'ємні числа ($p+q$ – порядок семіінваріанта); $j = \sqrt{-1}$; $F(\mathbf{u})$ – інтегральне перетворення Фур'є; $\mathbf{u} = (u_1, u_2)$. У роботі [6] показано, що між декартовими моментами:

$$D_{pq} = \frac{1}{j^{p+q}} \frac{\partial^{p+q}}{\partial u_1^p \partial u_2^q} [F(\mathbf{u})] \Big|_{\mathbf{u}=\mathbf{0}} \quad (2)$$

та семіінваріантами існує зв'язок, який подається співвідношенням

$$D_{p,q} = \sum_{s=0}^{p-1} \sum_{k=0}^q C_{p-1}^s C_q^k D_{s,k} S_{p-s,q-k}, \quad (3)$$

де C_{p-1}^s , C_q^k – біноміальні коефіцієнти.

Вираз (3) забезпечує рекурентну процедуру визначення семіінваріантів у вигляді нелінійних комбінацій декартових моментів, яка має місце як для неперервних, так й для дискретизованих масивів даних, для яких визначаються семіінваріанти. В останньому випадку необхідно використовувати відоме дискретизоване подання декартових моментів [1], яке у даному випадку має вигляд

$$D_{pq} = \sum_{r=1}^{nm} \sum_{s=1}^k M_{r,s} \cdot r^p \cdot s^q \quad (4)$$

Узагальнюючи результати роботи [6], інваріантні ПО визначимо на множині безрозмірних семіінваріантів

$$z_i = S_{i-1, N+1-i} \exp\left(-\frac{NS_{0,0}}{2}\right), \quad i = \overline{1, N+1}, \quad (5)$$

де N – порядок семіінваріанту (обов'язково парне число).

З означення безрозмірних семіінваріантів безпосередньо випливає, що вони не залежать від змін яскравості усіх спектральних складових БСЗ (елементи матриці $\mathbf{M}_{nm \times k}$) для будь-якого парного порядку семіінваріантів.

З результатів робіт [7–9] випливає, що спотворення зображень ДЗЗ, поданих у тривимірному декартовому просторі \mathbf{E}^3 ("координатна площина зображення – рівень яскравості") можуть з достатньою точністю бути подані афінними геометричними перетвореннями у цьому просторі. У даній роботі обмежимося окремим випадком таких перетворень, які приймемо у вигляді $\omega^i = A_s^i \omega^s$, де тильдою позначені перетворені компоненти векторів ω ; A_s^i – елементи матриці перетворення, при чому $A_s^i > 0$ (за нижнім та верхнім індексами, що повторюються, виконується підсумовування).

Оскільки двовимірний простір, на якому визначений масив даних Ω , є проекцією простору \mathbf{E}^3 , для аналізу даних, поданих у ньому, можна використати результати роботи [4], а саме – аналітичний вираз для визначення ПО, інваріантних до геометричних, яскравісних та радіометричних перетворень БСЗ, поданих матрицею $\mathbf{M}_{nm \times k}$:

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

де нижній індекс N позначає порядок ПО.

Відмітимо принципово різну інтерпретацію співвідношень (6) у роботі, в якій вони були запропоновані, та у контексті даної роботи: у роботі [4] наведені співвідношення були обґрунтовані лише для афінних перетворень проекційних зображень фіксованого спектрального каналу. У даній роботі їхнє застосування обґрунтоване для визначення ПО усієї множини зображень спектральних каналів БСЗ.

Далі наведено приклад застосування пропонованого методу ідентифікації просторових розподілів яскравості БСЗ на основі інваріантних ПО.

На рис. 1, 2 подані первинні 2D – зображення БСЗ фіксованої сцени, отримані у двох спектральних каналах з суттєво різним просторовим розрізненням.

Рис. 3, 4 ілюструють наведені зображення у форматі 3D (горизонтальні осі орієнтовані у площині зображення, за вертикальною віссю – рівень яскравості), сформовані за DEM-моделлю подання зображень ДЗЗ [9].

Легко бачити суттєву різницю між розподілами яскравості зображень з різним просторовим розрізненням як з позицій візуального аналізу, так й за просторовими розподілами яскравості по площині знімку.



Рис. 1. Зображення спектрального каналу
0,52 мкм – 0,60 мкм
(просторове розрізнення 15 м)



Рис. 2. Зображення спектрального каналу
2,360 мкм – 2,430 мкм
(просторове розрізнення 30 м)



Рис. 3. 3D-зображення спектрального каналу
0,52 мкм – 0,60 мкм



Рис. 4. 3D-зображення спектрального каналу
2,360 мкм – 2,430 мкм

На рис. 5, 6 подано приклади афінно-перетворених зображень у комбінації із зміною яскравості та гауссівським розмиттям.

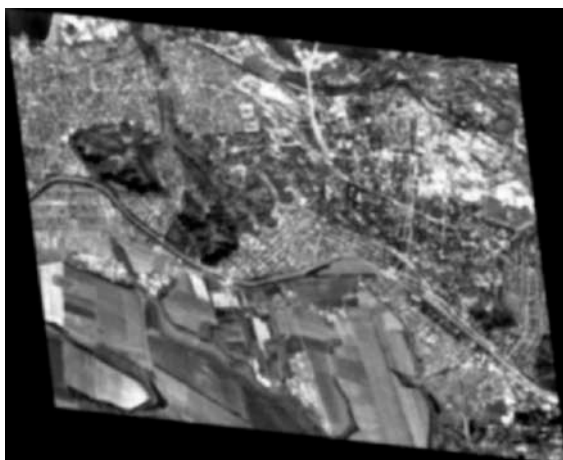


Рис. 5. Перетворене зображення спектрального каналу
0,52 мкм – 0,60 мкм

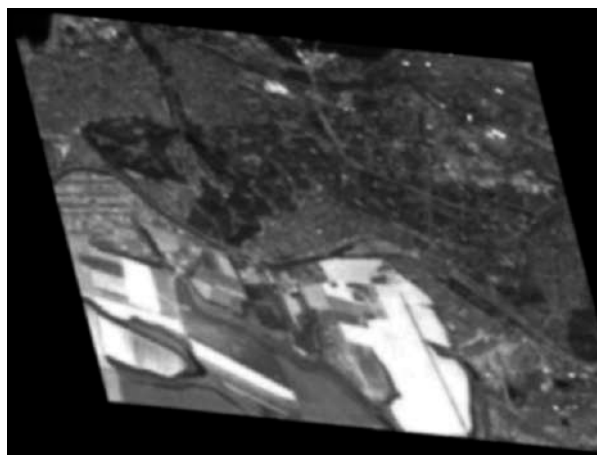


Рис. 6. Перетворене зображення спектрального каналу
2,360 мкм – 2,430 мкм

У табл. 1 представлена залежність ПО другого та четвертого порядків (за позначеннями виразу (6) – I_2 та I_4) від визначника матриці афінних перетворень $D = \|A_s^t\|$.

Таблиця 1

Визначник матриці афінних перетворень									
	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
I_2	1.4274	1.4273	1.4271	1.4276	1.4269	1.4270	1.4274	1.4272	1.4274
I_4	0.5672	0.5671	0.5672	0.5672	0.5673	0.5672	0.5672	0.5674	0.5672

Дані табл. 1 свідчать про вищий ступінь стабільності ПО до афінних перетворень БСЗ. Цей висновок підтверджується також численними обчислювальними експериментами стосовно зображень з різним просторовим розрізненням.

Висновки

У роботі запропоновано новий ефективний метод ідентифікації просторових розподілів яскравості багатоспектральних цифрових зображень, інваріантної до геометричних спотворень зображень, зумовлених позиційними нестабільностями їх формоутворення та просторової розрізненості. У порівнянні з існуючими методами ідентифікації зображень на основі їх інтегральних інформаційних ознак запропонований метод забезпечує аналіз усієї множини зображень спектральних каналів, яка утворює єдиний геометричний об'єкт – багато спектральне зображення.

Перспективи подальших досліджень за проблематикою даної роботи пов'язані з відновленням розподілів яскравості зображень за скінченною множиною запропонованих інформаційних ознак та оцінкою пов'язаних з такою відновленням інформаційних втрат.

Список використаної літератури

1. Визильтер Ю.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов, А.В. Бондаренко, М.В. Ососков, А.В. Моржин. – М.: Физматлит, 2010. – 672 с.
2. Flusser J. 2D and 3D image analysis by moments / J. Flusser, Suk T., Zitova B. – N.-Y., London: J.Wiley, 2017. – 530 p.
3. Moments and Moment Invariants – Theory and Applications / Ed. by A. Papakostas. – Chichester, U.K.:Wiley, 2014. – 288 p.
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. Малахов А.Н. Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований / А.Н. Малахов. – М.: Радио и связь, 1982. – 376 с.
6. Корчинский В.М. Обратная задача идентификации изопланатических изображений / В.М.Корчинский // Математические модели и современные информационные технологии. – К.: Ин-т математики НАН Украины, 1999. – С. 69-71.
7. Грузман И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах / И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых, Г.И. Перетягин, А.А. Спектор. – Новосибирск: НГТУ, 2010. – 168 с.
8. Иванов В.П. Трехмерная компьютерная графика / В.П. Иванов, А.С.Батраков. – М.: Радио и связь, 2005. – 224 с.
9. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений: Пер. с англ. / Р.А. Шовенгердт. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.