

**ТРАНСФОРМУВАННЯ ТА СУМІСНА ОБРОБКА
ФОТОГРАММЕТРИЧНИХ СКАНЕРНИХ ЗОБРАЖЕНЬ**

*Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара,
кафедра автоматизованих систем обробки інформації,
Дніпропетровськ, Україна*

У роботі запропоновано технологію підвищення інформативності фотографічних сканерних зображень, одержаних у різних спектральних діапазонах та дана порівняльна оцінка алгоритмів, що ґрунтуються на обчисленні кореляційних і спектральних характеристик.

Постановка проблеми. Основними факторами, які зумовлюють інформаційну значущість сканерних багатоспектральних зображень з позицій їхнього подальшого аналізу та інтерпретації, є просторова та радіометрична розрізненість — відповідно мінімальні розміри матеріального об'єкту, які можуть бути розрізнені на зображенні (має пріоритетну значущість), та максимальна кількість градацій його яскравості. Зображення, які фіксуються у достатньо широкому спектральному діапазоні інтенсивності проміння (панхромні зображення), мають суттєво вищу лінійну розрізненість, ніж зображення, отримані у вузьких спектральних інтервалах, сукупність яких утворює багатоспектральне зображення. З іншого боку, останні містять спектральну інформацію, відсутню у панхромних знімків. Сучасний рівень вимог до достовірності інтерпретації зображень, одержаних дистанційними засобами, зумовлює необхідність використання методів збільшення їх інформативності, зокрема, шляхом суміщення (об'єднання) в одному графічному об'єкті високих показників просторової (геометричної) та спектральної розрізненості [1]. З іншого боку, багато задач тематичного дешифрування даних дистанційного зондування зводяться до зіставлення знімків однієї і тієї ж території, отриманих у різний час чи у різних спектральних діапазонах. Спільне використання зазначених зображень вимагає їхньої попередньої обробки. Звідси впливає ряд важливих задач прив'язки, а також точної взаємної геометричної й амплітудної корекції для наступного спільного аналізу. У будь-якому випадку це вимагає встановлення відповідності між елементами вихідних зображень, що зводиться до виділення на зображеннях так званих опорних точок, по яких можна здійснити координатну прив'язку знімків, та оцінювання параметрів «розбіжності» відповідних точок.

Аналіз останніх досліджень. Відомі на даний час алгоритми пошуку опорних точок [2, 3] пов'язані з великим обсягом необхідних

обчислювальних ресурсів. Алгоритми встановлення подібності у своїх основних варіантах так чи інакше пов'язані з одержанням характеристик стохастичного взаємозв'язку порівнюваних фрагментів зображень [4]. Усі вони ґрунтуються на ідеях кореляційної й спектральної теорії сигналів. Ще в роботі [5] було продемонстровано, що серйозним недоліком кореляційної міри подібності є її чутливість до геометричних спотворень видимих розмірів сполучених фрагментів при зміні ракурсу зйомки. Звичайно, у якості критерію ефективності процедур ідентифікації подібності приймається точність суміщення фрагментів і ймовірність помилкової прив'язки, коли екстремум функціонала подібності значною мірою зміщений щодо істинного положення. При наявності геометричних перекручувань існує оптимальний розмір фрагмента еталонного зображення, який пропорційний ефективному радіусу кореляції і зменшується зі збільшенням геометричних спотворень.

Формулювання цілей статті. Ціль дослідження полягає у розробці нової технології підвищення інформативності багатоспектральних сканерних зображень, визначенні та порівнянні експериментальних характеристик відомих процедур прив'язки, а також з'ясуванні можливостей існуючих методів встановлення подібності зображень.

Основна частина та результати дослідження. Класичний кореляційний алгоритм встановлення подібності полягає у наступному. Нехай на знімку I_1 обрано еталонний фрагмент, зображення якого подається матрицею F_1 розміром $N \times N$. Це зображення порівнюється із зображеннями фрагментів знімка I_2 у зоні пошуку Ψ розміром $M \times M$. Перекриття між фрагментами визначається кроком a дискретної решітки, на якій спостерігаються задані змінні $\{f_1(\mathbf{x}), \mathbf{x} = (x, y)\}$ на I_1 чи $\{f_2(\mathbf{x})\}$ на I_2 . У процесі ковзного пошуку (коли кожен черговий фрагмент виходить із попереднього простим зсувом на один дискрет) обчислюється максимум коефіцієнта кореляції поточного фрагмента з еталонем [3]:

$$cor(k, l) = \frac{\sum_x \sum_y \bar{f}_1(x, y) \bar{f}_2(x, y)}{\sqrt{\sum_x \sum_y [\bar{f}_2(x, y)]^2 \sum_x \sum_y [\bar{f}_1(x, y)]^2}}, \quad (1)$$

$$\text{де } \bar{f}_1(x, y) = f_1(x, y) - \frac{1}{N^2} \sum_{x, y=1}^N f_1(x, y); \quad \bar{f}_2(x, y) = f_2(x, y) - \frac{1}{L^2} \sum_{(x, y) \in \Psi} f_2(x, y).$$

Дотримання умов вірогідності виявлення приводить до необхідності встановлення порога для величини взаємної кореляції $\max cor(k, l)$: якщо $\max cor(k, l) \geq cor_{nop}$, то з заданою імовірністю гарантується подібність знайденої пари фрагментів. Величина порога визначається функцією розподілу коефіцієнта кореляції (при випадкових вибірках) і заданою

надійною ймовірністю ухвалення рішення про подібність фрагментів. Виходячи з дослідження узагальненої крос-спектральної міри подібності [3], перейдемо від центрованих змінних $\bar{f}_1(x, y), \bar{f}_2(x, y)$ до спектральних компонент зображень \bar{F}_1, \bar{F}_2 :

$$S_{pq}(\bar{F}_2) = \{F(\bar{F}_2)\}_{pq} = |S_{pq}(\bar{F}_2)| \exp(i\varphi_{pq}(\bar{F}_2)), \quad p, q = 0, 1, \dots, L-1; \quad (2)$$

$$|S_{pq}(\bar{F}_2)| = \sqrt{\operatorname{Re}^2 S_{pq}(\bar{F}_2) + \operatorname{Im}^2 S_{pq}(\bar{F}_2)}, \quad \varphi_{pq} = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im} S_{pq}(\bar{F}_2)}{\operatorname{Re} S_{pq}(\bar{F}_2)}.$$

Оскільки при зсуві «зразка» $\{\bar{f}_1(x, y), x \leq N, y \leq N\}$ в області пошуку Ψ змінюється тільки його фазовий спектр

$$\{F(\bar{F}_1(x+k, y+l))\}_{pq} = S_{pq}(\bar{F}_1) \exp(i \frac{2\pi}{L}(pk+ql)), \quad (3)$$

то будемо мінімізувати функціонал

$$F_{kl} = \sum_{p=0}^{L-1} \sum_{q=0}^{L-1} a_{pq} \left(S_{pq}(\bar{F}_2) - e^{\frac{2\pi i}{L}(pk+ql)} S_{pq}(\bar{F}_1) \right)^* \left(S_{pq}(\bar{F}_2) - e^{\frac{2\pi i}{L}(pk+ql)} S_{pq}(\bar{F}_1) \right) \quad (4)$$

по параметрах зсуву k, l , де $*$ позначена операція комплексного спряження. «Енергія» зображень фрагментів $|S_{pq}(\bar{F}_1)|^2, |S_{pq}(\bar{F}_2)|^2$ не залежить від параметрів k, l , тому положення мінімуму функціонала F_{kl} відповідає точці екстремуму перехресного члена при розкритті дужок у (4):

$$C_{kl}(\bar{F}_1, \bar{F}_2) = \sum_{p=0}^{L-1} \sum_{q=0}^{L-1} a_{pq} e^{\frac{2\pi i}{L}(pk+ql)} S_{pq}^*(\bar{F}_1) S_{pq}(\bar{F}_2). \quad (5)$$

Точність локалізації визначається крутістю даної крос-спектральної функції поблизу екстремуму, який характеризує положення образу еталонного фрагмента. З цього погляду найкращою моделлю для $C_{kl}(\bar{F}_1, \bar{F}_2)$ є дискретний варіант дельта функції $\delta(k-\hat{k}, l-\hat{l})$. Неважко переконатися, що останній умові задовольняє вагова функція a_{pq} виду

$$\hat{a}_{pq} = |S_{pq}^*(\bar{F}_1) S_{pq}(\bar{F}_2)|^{-1}. \quad (6)$$

Унаслідок цього зворотне дискретне Фур'є-перетворення

$$F^{-1} \exp[i(\varphi_{pq}(F_2(x+k, y+l)) - \varphi_{pq}(F_1(x, y)))] = \delta(k-\hat{k}, l-\hat{l}) = \begin{cases} 1, & k = \hat{k}, l = \hat{l} \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}. \quad (7)$$

Отриманий результат можна інтерпретувати в такий спосіб. Процес виявлення з передатною функцією (6) являє собою «фазову» фільтрацію, яка фазову частину комплексного спектра зображень залишає без змін, а амплітудний спектр нормалізує. Зрозуміло, що в даному варіанті крос-спектральна міра $C_{kl}(\bar{F}_1, \bar{F}_2)$ — це Фур'є-образ функції когерентності

$$\xi_{pq} = \frac{S_{pq}^*(\bar{F}_1)S_{pq}(\bar{F}_2)}{|S_{pq}^*(\bar{F}_1)S_{pq}(\bar{F}_2)|}. \quad (8)$$

Тим самим можна віднести всі ознаки оптимальності когерентного функціонала [6] і до крос-спектральної міри подібності, що допускає до того ж ефективну реалізацію на основі швидкого перетворення Фур'є. Слід зазначити, що співвідношення (5) при $a_{pq} = 1$ відповідає класичному кореляційному алгоритму, реалізованому в спектральній області.

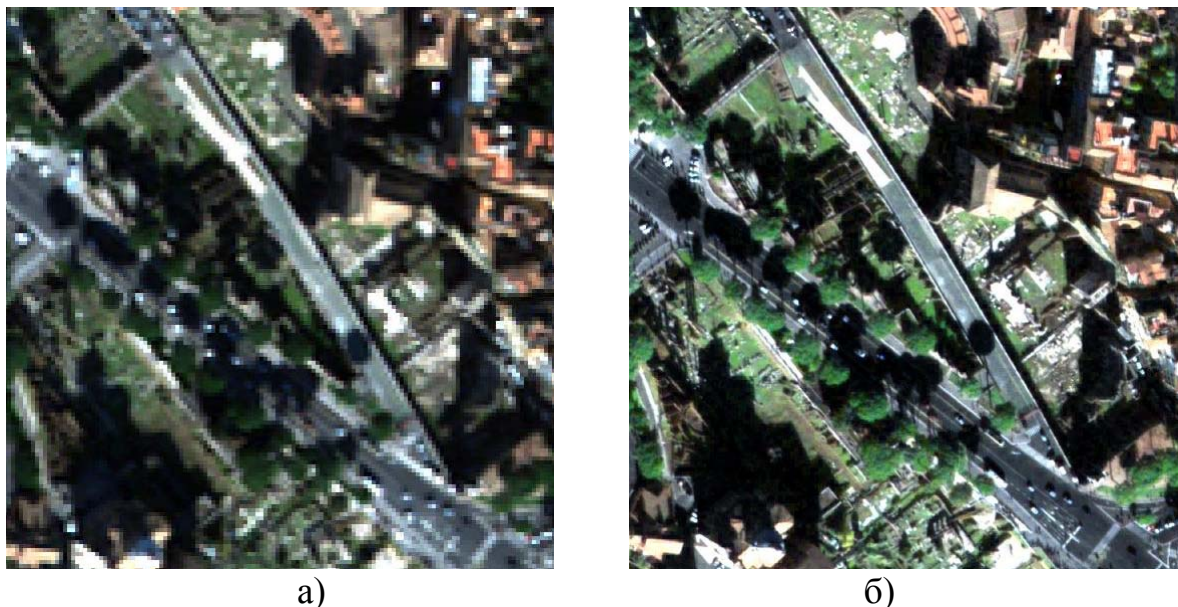
Наступним етапом обробки є визначення параметрів взаємного зсуву вихідного фрагмента і його образу та відносне зміщення растрових сіток відповідних зображень. Яскравість кожного пікселю зображення після такого зсуву, обчислюється як середньо-зважена сума яскравостей чотирьох пікселів вихідного зображення (до зсуву), які він перетинає:

$$\begin{aligned} D(x, y) = & D[x + N, y + M](1 - |\Delta x|)(1 - |\Delta y|) + \\ & + D[x + N + 1, y + M + \text{sgn}(\Delta y)](1 - |\Delta x|)|\Delta y| + \\ & + D[x + N + \text{sgn}(\Delta x), y + M]|\Delta x|(1 - |\Delta y|) + \\ & + D[x + N + \text{sgn}(\Delta x), y + M + \text{sgn}(\Delta y)]|\Delta x||\Delta y|, \end{aligned} \quad (9)$$

де $D[x, y]$ — відкорегована яскравість; $\text{sgn}(x)$ — знакова функція ($\text{sgn}(0) = 0$; $\text{sgn}(x) = \pm 1$ при $x > 0$ та $x < 0$ відповідно); $N, \Delta x$ та $M, \Delta y$ — цілі та дробові частини горизонтальних та вертикальних зміщень. Можливість обчислень за виразом (9) підтверджується теоремою Блікфельда, яка встановлює існування у будь-якому геометричному об'єкті, заданому на цілочисельній решітці, двох точок, вектор різниці між якими має цілочисельні компоненти.

Наступним етапом запропонованої технології після суміщення двох зображень є їх злиття на основі ICA-HSV-перетворень. В алгоритмі нами пропонується заміна після перетворення ICA першої компоненти мультиспектрального зображення панхроматичним зображенням. Наступним етапом після заміни є зворотне перетворення ICA та перетворення отриманого зображення у кольорову модель HSV (позначимо HSV_{MOD}). Іншим кроком роботи алгоритму є також переведення вихідного мультиспектрального зображення у кольоровий простір HSV (позначимо HSV_{MUL}). Наступним кроком формування нового зображення з підвищеною інформативністю є заміна яскравісної

компоненти V зображення HSV_{MUL} яскравісною компонентою зображення HSV_{MOD} та перетворення результату з кольорової моделі HSV до кольорової моделі RGB . Відповідний алгоритм докладно описаний в роботі [7]. Після застосування запропонованої технології отримано зображення, яке навіть візуально у порівнянні з первинним знімком відрізняється більшою чіткістю (рис. 1).



а)
б)
Рис.1. Мультиспектральні зображення: а) первинне; б) зображення після обробки з використанням технології

Спробуємо кількісно оцінити різкості зображень. Найбільш придатними об'єктами, які можна взяти у якості характерних особливостей, є перетинання доріг, мости, елементи будинків і споруджень, елементи берегів з постійною геометрією, моли, причали, пристані, канали, дамби, інші інженерні спорудження, відбиті на зображеннях зі стабільними й контрастними стосовно фону радіометричними характеристиками. Нами була відібрана дорога та поперек неї були «втягнуті» сектори рівної довжини. Потім були розраховані середньоквадратичні відхилення відповідних пікселів. Щоб усунути вплив різних градацій сірого у різних зображеннях, була застосована нормалізація. На рис. 2 подано значення девіацій (α) для фрагменту первинного зображення (*ліворуч*) і покращеного зображення (*праворуч*). Зрозуміло, що покращення існує, якщо девіації секторів менше, тому що пряма особливість (дорога) представлена з меншим зсувом щодо піксельних координат.

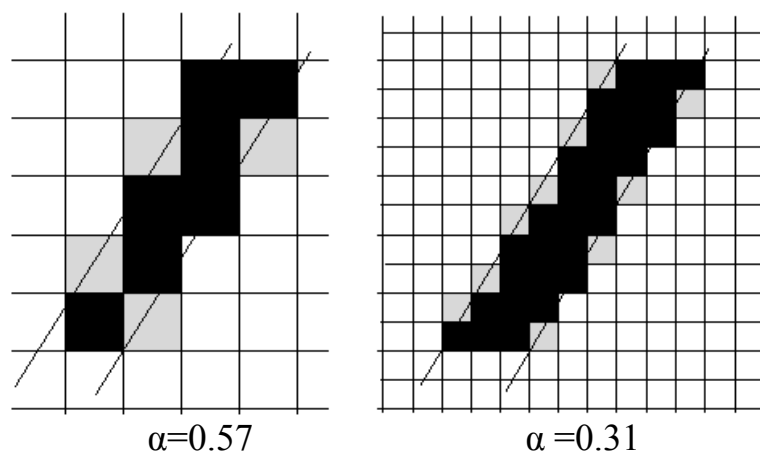


Рис. 2.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Очевидно, що у результаті обробки багатоспектральних знімків за допомогою запропонованої технології підвищення інформативності видових даних ДЗЗ на основі ICA-HSV-перетворень з попередньою геометричною трансформацією синтезовані зображення мають більш високу якість та збільшену інформативність у порівнянні з первинними знімками.

Крім того, аналіз результатів імітаційних експериментів показав, що робоча зона ідентифікації фазового фільтра (по величині припустимих геометричних перекручувань) менше аналогічної зони для кореляційного алгоритму. Це і зрозуміло, тому що чим менше ефективний радіус кроскореляційної функції подібності $C_{kl}(\bar{F}_1, \bar{F}_2)$, тим алгоритм більш чутливий до зміни геометрії фрагментів, що ідентифікуються. Зокрема, алгоритм нормованої кореляції веде задовільний пошук за зразком для знімків, повернутих на кут до 10° . Алгоритм фазової кореляції тут нормально функціонує, якщо кут повороту не перевищує 5° . Проведені дослідження показали, що фазовий фільтр у досить широкому діапазоні потужностей перешкод (приблизно до 50%) має меншу ймовірність помилкової прив'язки фрагментів, ніж класичний кореляційний алгоритм. Застосування запропонованого способу коригування зображень дозволило суттєво спростити процедуру їхньої інтерпретації.

Подальші дослідження будуть пов'язані з розглядом можливостей застосування вищенаведених алгоритмів при обробці гіперспектральних даних з урахуванням фізичних та геометричних закономірностей формоутворення таких зображень.

Література

1. Гнатушенко В.В. Комп'ютерні технології підвищення інформативності багатоспектральних зображень земної поверхні / В.В. Гнатушенко, О.О. Сафаров // Прикладна геометрія та інженерна графіка. - К.: КНУБА, 2012. - Вип. 89. – С. 140-144.

2. Popov S.A. Algorithm of Estimation of the Geometric Parameters of the System of Two Projection Cameras by the Method of the Least Squares (MLS) / S.A. Popov, V.S. Kirichuk // Pattern Recognition and Image Analysis, -1999, № 2, p.304.

3. Битюцкий О.И. Поиск и локализация реперных фрагментов при совмещении повторных снимков / О.И. Битюцкий, Г.И. Перетягин // Автометрия. 1988. № 3.

4. Прэйт У. Цифровая обработка изображений. / У. Прэйт // М.: Мир, 1982.

5. Mostafavi H. Image correlation with geometric distorsion. / H. Mostafavi, F.W. Smith // IEEE Transactions, 1978, v.AES-14, p.487-500.

6. Киричук В.С. Об установлении сходства фрагментов с эталоном / В.С. Киричук, Г.И. Перетягин // Автометрия. 1986. №4.

7. Гнатушенко В.В. Новий алгоритм підвищення інформативності фотограмметричних зображень / В.В. Гнатушенко, О.О. Кавац // Вісник ХНТУ. – Херсон, 2013. – № 2 (47). – С. 100-105.

ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ И СОВМЕСТНАЯ ОБРАБОТКА ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ СКАНЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В.В. Гнатушенко, Л.С. Загородняя

В работе предложена технология повышения визуального качества фотограмметрических сканерных изображений, полученных в различных спектральных диапазонах и дана сравнительная оценка алгоритмов, основанных на вычислении корреляционных и спектральных характеристик. В результате обработки многоспектральных снимков с помощью предложенной технологии повышения информативности видовых данных ДЗЗ на основе ICA-HSV-преобразований с предварительной геометрической трансформацией синтезированные изображения имеют более высокое пространственное разрешение по сравнению с первичными снимками.

TRANSFORMATION AND COMPATIBLE PROCESSING PHOTOGRAMMETRIC SCANNER IMAGES

V. Gnatushenko, L. Zagorodnja

The paper presents the technology of enhancing the visual quality photogrammetric scanner images obtained in different spectral ranges and the comparative evaluation of algorithms based on the calculation of correlation and spectral characteristics. The processing of multispectral images using the proposed technology increase the information content of species of remote sensing data based on ICA-HSV-transform from the previous geometric transformation of the synthesized images have higher spatial resolution than the primary images.