

УДК 528.8

© А.В. Кузьмін¹, канд. фіз.-мат. наук, доцент;
Л.Д. Греков², д-р техн. наук, виконуючий обов'язки директора;
В.В. Оноцький¹, асистент

¹Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, м. Київ

²ДНВЦ «Природа», м. Київ

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕДУРИ УСУНЕННЯ МІЖКАНАЛЬНИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ЗОБРАЖЕНЬ, ОТРИМАНИХ ЗНІМАЛЬНОЮ АПАРАТУРОЮ СУПУТНИКА «СІЧ-2»

Розглядається алгоритм, призначений для усунення взаємних міжканальних зміщень знімків земної поверхні, отриманих знімальною апаратурою космічного супутника «Січ-2», які мають місце між трьома окремими мультиспектральними каналами та панхроматичним каналом. З використанням запропонованого алгоритму пошук та усунення міжканальних зміщень може здійснюватися оператором в повністю автоматичному потоковому режимі обробки космічних знімків. Космічні знімки зі значною долею однорідних областей алгоритм дозволяє обробляти з використанням індивідуальних параметрів налаштування. Пошук та усунення міжканальних зміщень для сильно деформованих каналів здійснюється поетапно (грубе, середнє, піксельне та субпіксельне) суміщення. За наявності апріорної інформації про ступінь міжканальних зміщень етапи грубого та середнього суміщення можуть не виконуватись.

Ключові слова: космічні знімки, обробка інформації, просторові міжканальні зміщення

Малогабаритний космічний супутник «Січ-2» масою 176 кг, виведений на орбіту Землі 17 серпня 2011 року, оснащено оптико - електронним сканером з трьома спектральними та одним панхроматичним діапазоном, сканером середнього інфрачервоного діапазону та комплексом наукової апаратури для вивчення заряджених та нейтральних частинок електричного та магнітного полів у верхніх шарах атмосфери Землі (табл. 1).

Тематична обробка супутникових даних дистанційного зондування передбачає комплексування інформації, отриманої в різних спектральних діапазонах. Зокрема, для дослідження рослинного покриву використовуються численні вегетаційні індекси, які базуються на комбінації даних червоного та ближнього інфрачервоного діапазонів. Отримання адекватних характеристик земної поверхні, використовуючи комбінації різних спектральних каналів знімальної апаратури, потребує виконання цілого ряду корекцій вихідних даних, що фіксують сенсори; крім радіометричної та атмосферної корекції, необхідно проведення гео-

метричної корекції, яка виконується з метою усунення міжканальних зміщень.

Аналіз вихідних даних мультиспектральних та панхроматичного каналів «Січ-2» демонструє суттєві взаємні просторові міжканальні зміщення, які викликані рядом різноманітних факторів: конструкцією знімальної апаратури, механічними і температурними впливами, режимом роботи скануючого пристрою.

Таблиця 1 - Основні характеристики супутника «Січ-2»

Висота орбіти	700 км
Нахил орбіти в градусах	98.24
Максимальний кут відхилення від надиру в градусах	30
Багатозональний скануючий пристрій	
Панхроматичний спектральний діапазон	0.51 – 0.9 mkm
Мультиспектральні діапазони	0.51-0.59; 0.61-0.68; 0.8-0.9 mkm
Проекція кроку пікселів у надирі	7.75 м
Ширина смуги огляду	48.8 км
Максимальна довжина смуги огляду	300 км
Сканер середнього інфрачервоного діапазону	
Середній інфрачервоний діапазон	1.51 – 1.7 mkm
Проекція кроку пікселів у надирі	41.4 м
Ширина смуги огляду	58.1 км

Геометрична корекція відеоінформації, отриманої космічним апаратом «Січ-2», має бути направлена на компенсацію міжканальних геометричних деформацій та просторове суміщення зображень різних каналів.

Алгоритм геометричної корекції мультиспектральних та панхроматичного каналів космічного апарату «Січ-2» використовує канал *green* як базовий і поетапно здійснює поліноміальне перетворення координат для каналів *read*, *nir*, *pan*, що забезпечує мінімум середньоквадратичного відхилення між знайденою множиною точок ототожнення на базовому та зміщеному каналах з використанням процедури інтерполяції спектральних яскравостей для зміщеного каналу.

Зауважимо, що міжканальні зміщення характерні практично для сенсорів усіх космічних апаратів дистанційного зондування, оснащених електронно-оптичними мультиспектральними сканерами, сконструйованими на лінійках із зарядним зв'язком.

У той же час модель геометричної корекції міжканальних зміщень для більшості з них формується в результаті наземного геометричного калібрування у вигляді базових функцій трансформації (предикторної моделі геометричної корекції), які надалі корегуються безпосередньо за космічними знімками. Такий підхід дозволяє забезпечити високу (субпіксельну) точність суміщення каналів для більшої частини знімків [1].

На жаль, для космічного апарату «Січ-2» інформація про наявність базових функцій трансформацій міжканальних деформацій відсутня, що вимагає проведення досліджень з візуального вивчення міжканальних деформацій з використанням комплексу ENVI на множині наявних знімків з рівнем обробки 1A.

Результати візуального дослідження міжканальних деформацій, отримані по п'яти точ-

ках кожного знімку, можна охарактеризувати значними міжканальними деформаціями між панхроматичним та мультиспектральними каналами сенсору «Січ-2», що практично унеможливує автоматизований пошук міжканальних просторових деформацій без застосування предикторної моделі трансформації для панхроматичного каналу по відношенню до базового (зеленого) каналу. Використання предикторної моделі надає можливість виявити та компенсувати грубі міжканальні деформації з подальшим уточненням за допомогою автоматичного алгоритму просторового суміщення (модель коректор).

За результатами статистичної обробки даних міжканальних зміщень для панхроматичного каналу не виявлено зв'язку між зміщеннями по рядку та стовпцю знімку, що дозволило обрати найпростішу предикторну модель усунення грубих деформацій у вигляді незалежного паралельного зміщення панхроматичного каналу відносно базового по рядках і стовпцях. Застосування цієї моделі не вимагає використання процедури інтерполяції спектральної яскравості, а для збереження всієї наявної інформації та забезпечення однакового розміру зображень для базового та панхроматичного каналу здійснюється доповнення зображення вертикальною смугою для зміщення стовпців, або горизонтальною - для зміщення рядків з нульовим значенням спектральної яскравості.

Конкретні значення зміщення предикторної моделі по стовпцю - l_0 та рядку - k_0 обчислюються з використанням лінійної регресії на базі інформації файлу орбітальних даних file.anf, що супроводжує кожний знімок.

$$k_0 = 14766.9(S_G - S_P) + 1999.2(D_G - D_P) + 30.03 \quad (1),$$

$$l_0 = -15.98 \gamma - 58.89 \quad (2),$$

де S_G, S_P - значення широти лівого верхнього кута знімка для зеленого та панхроматичного каналів, D_G, D_P - значення довготи лівого верхнього кута знімка для зеленого та панхроматичного каналів, γ - кут крену орієнтації космічного апарата.

Методи порівняння зображень

Алгоритми автоматичної корекції міжканальних зміщень космічних знімків базуються на пошуку тотожних фрагментів зображення для різних спектральних діапазонів, для чого використовуються різноманітні міри близькості (подібності) зображень, які дозволяють максимально точно ототожнювати фрагменти зображення однієї й тієї ж частини земної поверхні, отриманої різними сенсорами, та встановлювати відповідність між точками на зображеннях у різних спектральних діапазонах, що відповідають одній точці земної поверхні.

У подальшому точки земної поверхні, для яких встановлена відповідність координат цих точок у локальних системах координат різних зображень, будемо називати точками ототожнення відповідних зображень, а фрагменти, які ототожнюються, – реперними фрагментами.

Для пошуку міжканальних деформацій між собою порівнюються фрагменти зображення $\bar{A} = A_{i,j}$, $\bar{B}^{(k,l)} = B_{i+k,j+l}$, $n_1 \leq i \leq n_2$, $m_1 \leq j \leq m_2$ відносно невеликих однакових розмірів, для яких встановлюється величина локального зміщення фрагмента $\bar{B}^{(k,l)}$ відносно фрагмента \bar{A} за правилом: $(k_0, l_0) = \text{Arg max}_{(k,l)} \rho(\bar{A}, \bar{B}^{(k,l)})$, де $\rho(\bar{A}, \bar{B})$ - деяка обрана міра близькості двох зображень.

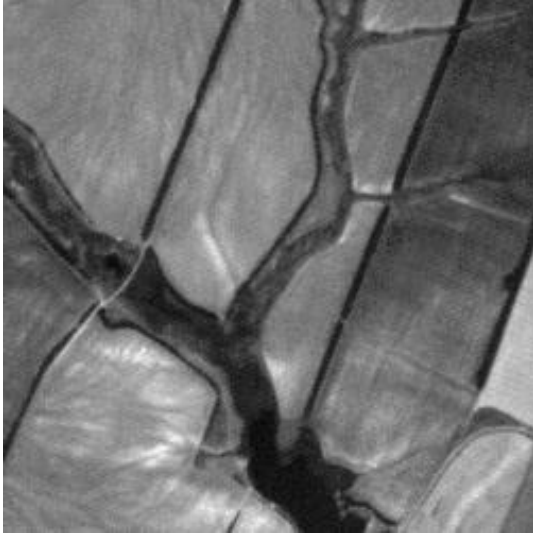


Рис. 1 - Фрагмент знімка Січ-2 у зеленому діапазоні спектру

Від вдалого вибору конкретної міри подібності значним чином залежить якість алгоритму корекції міжканальних зміщень, зокрема, міри подібності повинні задовольняти таким природним властивостям [2]:

- міра подібності дорівнює 1 для двох тотожних зображень;
- міра рефлексивна для нормалізованих зображень;
- міра симетрична;
- міра повинна бути стійкою до шумів.

Наведені нижче міри близькості задовольняють усім переліченим властивостям:

$$\rho_1(A, B) = 1 - \left(\frac{1}{nm} \sum_{i,j} |A_{i,j} - B_{i,j}|^r \right)^{\frac{1}{r}} \quad (3),$$

$$\rho_2(A, B) = \frac{\sum_{i,j} A_{i,j} B_{i,j}}{\max \left(\sum_{i,j} A_{i,j}^2, \sum_{i,j} B_{i,j}^2 \right)} \quad (4),$$

$$\rho_3(A, B) = \frac{\sum_{i,j} \min(A_{i,j}, B_{i,j})}{\sum_{i,j} \max(A_{i,j}, B_{i,j})} \quad (5),$$

$$\rho_4(A, B) = 1 - \frac{\sum_{i,j} |A_{i,j} - B_{i,j}|}{\sum_{i,j} (A_{i,j} + B_{i,j})} \quad (6),$$

$$\rho_5(A, B) = \frac{\sum_{i,j} \min(1 - A_{i,j}, 1 - B_{i,j})}{\sum_{i,j} \max(1 - A_{i,j}, 1 - B_{i,j})} \quad (7),$$

$$\rho_6(A, B) = 0.5 \left(1 + \frac{\sum_{i,j} (A_{i,j} - M_A)(B_{i,j} - M_B)}{\left(\sum_{i,j} (A_{i,j} - M_A)^2 \sum_{i,j} (B_{i,j} - M_B)^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (8),$$

де M_A , M_B - середні значення яскравості зображень A , B .

Міра близькості $\rho_6(A, B)$, яка найбільш часто використовується для оцінки близькості зображень, носить назву приведеної взаємно-кореляційної функції.

Порівняння зображень Z_1 та Z_2 однієї й тієї частини земної поверхні, отриманої знімальною апаратурою для різних спектральних діапазонів з використанням наведених мір, часто характеризується відносно низькими значеннями величини міри, не чітко вираженим екстремальними значенням міри, що веде до появи хибних екстремумів функції $\rho_i(\bar{Z}_1, \bar{Z}_2^{(k,l)}), i = \overline{1,6}$ та хибних точок ототожнення зображень.

Найбільш часто такі ефекти спостерігаються при порівнянні зображень видимого спектру (зеленого, блакитного, червоного) та зображень, отриманих для інфрачервоного діапазону (ближнього, середнього), або панхроматичних зображень, які інтегрують інфрачервоний діапазон спектру. Окремі частини земної поверхні на таких зображеннях мають інверсні значення яскравості, що є основною причиною низької ефективності безпосереднього порівняння таких зображень за допомогою наведених мір близькості.

Так, для істинного вектора зміщення між зображеннями рис. 1 та рис. 2 в пікселях, що становить (1,-1), своє максимальне значення усі міри подібності (3) - (8) сягають для різних значень вектора зміщення, відмінних від наведеного істинного значення.

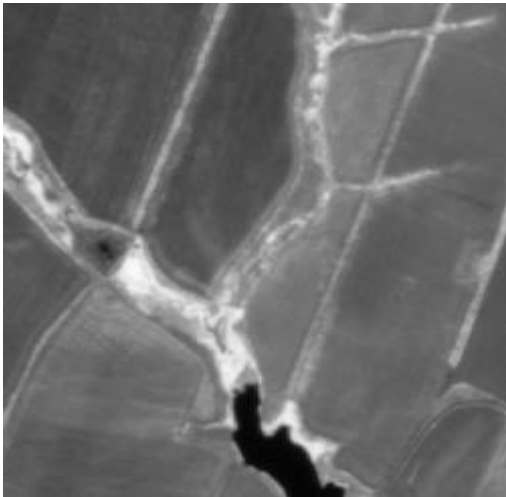


Рис. 2 - Фрагмент знімка «Січ – 2» у ближньому інфрачервоному спектрі апаратури космічного апарата «Січ-2».

Для порівняння фрагментів земної поверхні, з властивостями зображень (рис. 1, рис. 2), замість вихідних зображень будемо використовувати їх градієнтні зображення, обчислені за оператором Собеля [3].

$$\begin{aligned} S^x A_{i,j} &= 2(A_{i+1,j} - A_{i-1,j}) + A_{i+1,j+1} + A_{i+1,j-1} - A_{i-1,j-1} - A_{i-1,j+1} \\ S^y A_{i,j} &= 2(A_{i,j+1} - A_{i,j-1}) + A_{i+1,j+1} + A_{i-1,j+1} - A_{i+1,j-1} - A_{i-1,j-1} \\ S(A)_{i,j} &= (S^x A_{i,j}^2 + S^y A_{i,j}^2)^{0.5} \quad i = 2, N-1, j = 2, M-1 \quad (9) \end{aligned}$$

На рис. 3, 4 наведені градієнтні зображення фрагментів земної поверхні, обчислені для зеленого та ближнього інфрачервоного каналів знімальної

Встановлено, що екстремальне значення мір подібності (3) – (8) для градієнтних зображень зеленого та ближнього інфрачервоного каналів або зеленого та панхроматичного каналів досягаються саме на істинному значенні вектора зміщення, рівного (1,-1). Таким чином, для суміщення каналів, що містять інверсні області, в алгоритмі геометричної корекції міжканальних деформацій використовується обчислення мір подібності перетворень Собеля.

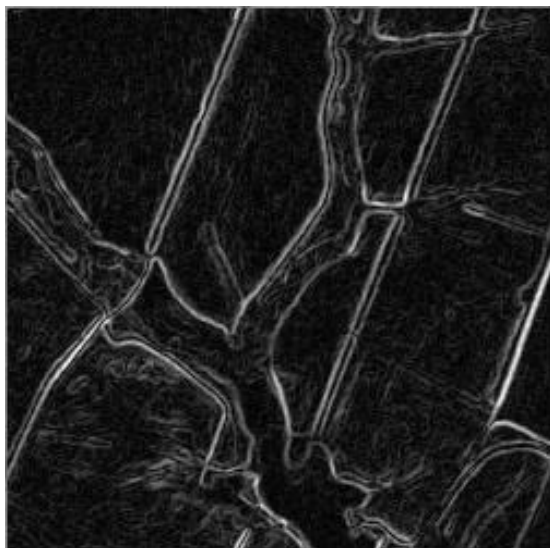


Рис. 3

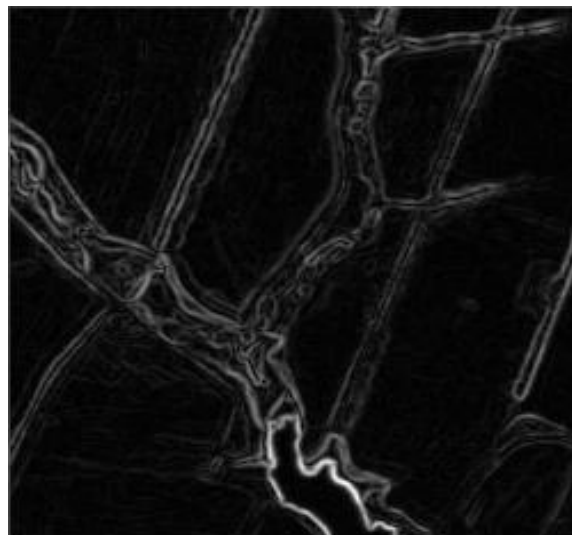


Рис. 4

Вибір фрагментів ототожнення

Знаходження просторових міжканальних деформацій космічних знімків вимагає знаходження значної кількості точок ототожнення для кожної пари каналів, які рівномірно розподіляються по полю зображення. Встановлено, що для космічних знімків з великими площами однорідних фрагментів процес пошуку точок ототожнення може призводити до появи хибних точок ототожнення фрагментів зображення, що, в свою чергу, знижує точність ототожнення самих зображень.

До таких однорідних фрагментів зображень, як правило, належать:

- області знімка, вкриті суцільною або розрідженою хмарністю;
- площі земної поверхні, вкриті щільним сніговим покривом;
- акваторії великих озер, водосховищ, морів;
- площі земної поверхні з однорідною рослинністю (степи, ліси, сільськогосподарські угіддя).

Для запобігання вибору таких фрагментів пропонується ввести критерій інформативності фрагмента знімка, який обирається на базовому зображенні.

Зокрема, в [4] пропонується обирати фрагменти, які містять точки з відносно великою спектральною яскравістю. Але на знімках зі значними областями хмарності та сніговим покривом такий підхід приводить до вибору точок ототожнення в цих областях та хибним їх ототожненням.

Більш ефективним видається підхід оцінки ступеня неоднорідності (інформативності) фрагмента $\bar{A}^{(s)}$, $s=1, S$ зображення \bar{A} з використанням мір подібності (3) – (7) як міри подібності зображення своєму середньому значенню. Будемо обирати найбільш інформативні фрагменти базового зображення, для яких виконується критерій однорідності

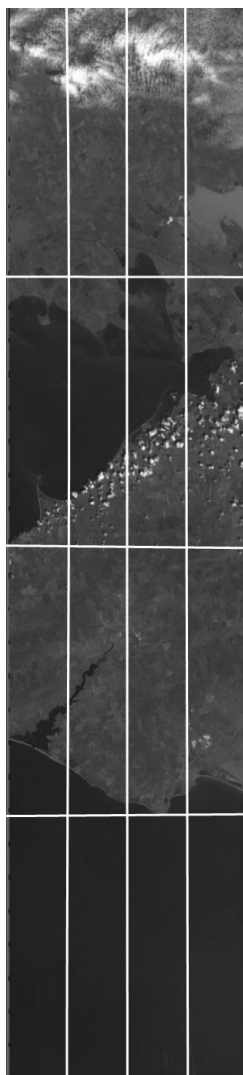


Рис. 5

$\gamma_i^{(s)} = \rho_i(\overline{A^{(s)}}, M_{A^{(s)}}) \leq \gamma_i$, $i = 1, 5$, де γ_i , $i = \overline{1, 5}$ - експериментально встановлений поріг допустимої однорідності фрагмента зображення. В якості орієнтовного значення порогу однорідності можна обирати величину $\gamma_i = \rho_i(\overline{A}, M_{\overline{A}})_i$, $i = \overline{1, 5}$, тобто ступінь однорідності всього базового зображення.

Враховуючи значні територіальні області, що охоплюються одним знімком знімальної апаратури космічного апарата «Січ-2» (середня площа одного знімка становить близько $10\,000\text{ км}^2$), та можливу статистичну неоднорідність зображення, для забезпечення рівномірності розташування точок ототожнення в інформативних зонах знімка раціонально провести зонування космічного знімка на прямокутні зони та обирати критерій однорідності фрагмента для кожної зони знімка (рис. 5). Деякі зони знімка з низьким значенням інформативності взагалі можуть бути виключені з процедури вибору точок ототожнення.

Використання пірамідальних представлень знімків

Як зазначалося вище, просторові деформації між мультиспектральними та панхроматичними каналами мають значні величини і навіть після застосування предикторної моделі (1) - (2) величина вектора просторового зміщення змінюється в широкому діапазоні. Пошук можливих зміщень для кожного фрагмента ототожнення при порівнянні сильно деформованих зображень вимагає значних обчислювальних витрат для знаходження величини $(k_0, l_0) = \text{Arg} \max_{-L \leq (k,l) \leq L} \rho(\overline{A}, \overline{B}^{(k,l)})$, де допустимі величини можливих зміщень (k, l) змінюються в широкому діапазоні значень $-L \leq k, l \leq L$, де L - може приймати великі значення в залежності від можливої величини зміщення.

Для виявлення та усунення грубих просторових міжканальних деформацій будемо використовувати технологію пірамідального представлення вихідних зображень, використовуючи зображення земної поверхні з просторовим розрізненням, нижчим, ніж вихідне зображення.

Введемо цілий коефіцієнт осереднення зображення L_p , який використовується для побудови зображення, зниженої в L_p разів роздільної здатності:

$$\mathbf{P}_{L_p}(A)_{i,j} = \frac{\sum_{\xi=1}^{L_p} \sum_{\eta=1}^{L_p} A_{(i-1)L_p+\xi, (j-1)L_p+\eta}}{(L_p)^2}, \quad i = 1..N_{L_p}, j = 1..M_{L_p} \quad N_{L_p} = \left\lfloor \frac{N}{L_p} \right\rfloor, M_{L_p} = \left\lfloor \frac{M}{L_p} \right\rfloor. \quad (10)$$

У результаті величина координатної неузгодженості між зображеннями в різних спектральних діапазонах зменшується в L_p разів, що дозволяє зменшити кількість обчислень мір подібності за рахунок зменшення діапазону пошуку L .

Моделі координатної трансформації зображень

Ототожнюючи локальні реперні фрагменти базового та зміщеного зображень та обчислюючи для них локальні зміщення (k_j, l_j) , $j = \overline{1, J}$, отримуємо множину точок ототоження $(x_j, y_j) \rightarrow (x_j + k_j, y_j + l_j)$, $j = \overline{1, J}$. Сукупність отриманих точок ототоження дозволяє побудувати поліноміальну модель координатного перетворення для всього зображення, що суміщається з базовим.

Будемо використовувати поліноміальну модель координатного перетворення не вище третього порядку:

$$\begin{aligned} x_1 = P_x^{(3)}(x, y) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 + a_7x^3 + a_8x^2y + a_9xy^2 + a_{10}y^3 \\ y_1 = P_y^{(3)}(x, y) &= b_1 + b_2x + b_3y + b_4x^2 + b_5xy + b_6y^2 + b_7x^3 + b_8x^2y + b_9xy^2 + b_{10}y^3 \end{aligned} \quad (11)$$

Введемо вектори:

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_J)^T, \quad \mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_J)^T, \quad \mathbf{x}_1 = (x_1 + k_1, x_2 + k_2, \dots, x_J + k_J)^T,$$

$\mathbf{y}_1 = (y_1 + l_1, y_2 + l_2, \dots, y_J + l_J)^T$, $J \geq 10$. $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_{10})^T$, $\mathbf{b} = (b_1, \dots, b_{10})^T$. Тоді невідомі коефіцієнти перетворення (11) знаходяться як розв'язок системи лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{aligned} H^T H_a &= H^T x_1 \\ H^T H_b &= H^T y_1 \end{aligned} \quad (12),$$

де H прямокутна матриця виду розмірності $(J \times 10)$:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1 y_1 & \dots & y_1^3 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^2 & x_2 y_2 & \dots & y_2^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_J & y_J & x_J^2 & x_J y_J & \dots & y_J^3 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Враховуючи, що матриця системи рівнянь $H^T H$ має велике число обумовленості, яке зростає зі збільшенням числа точок J та степені полінома, для знаходження розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь з необхідною точністю в алгоритмі використовується метод Гауса з вибором головного елемента по всій матриці, обчислення проводиться з подвійною точністю та ітераційним уточненням розв'язку.

Враховуючи, що матриця \mathbf{H} , вектори $\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_1$ мають цілочисельні значення, забезпечити необхідну точність обчислення коефіцієнтів координатного перетворення можна, здійснюючи обчислення в раціональних числах.

Поновлення зображень у перетворених координатах

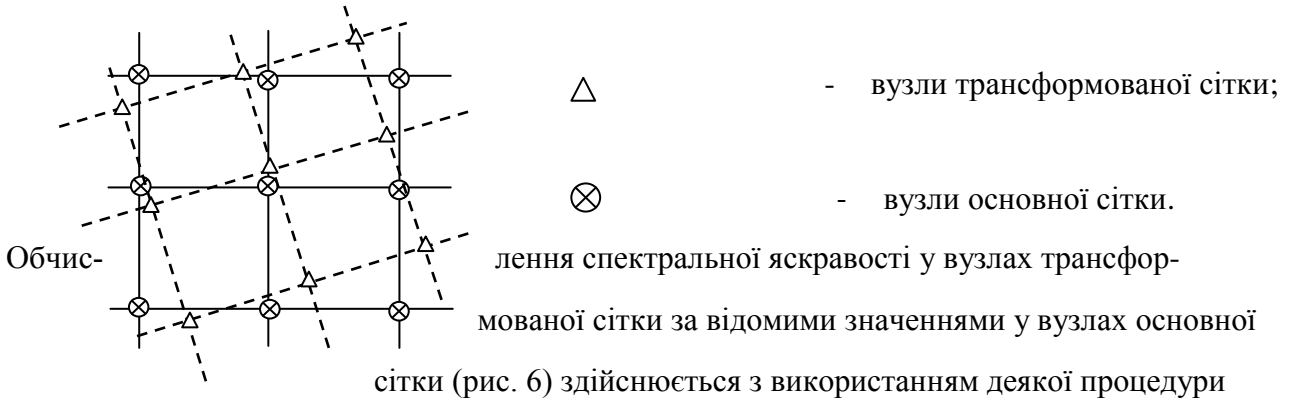


Рис. 6

інтерполяції. Найбільш вживаними при обчисленні спектральної

яскравості є процедури найближчого сусіда, білінійна та бікубічна

інтерполяція.

Для обчислення значення яскравості зображення A_{i_0, j_0} для зміщеного спектрального каналу в деякому вузлі основної сітки з піксельними координатами (i_0, j_0) , обчислюємо положення цього пікселя на трансформованому зображенні $x_1 = P_x^{(3)}(i_0, j_0)$, $y_1 = P_y^{(3)}(i_0, j_0)$ та найближчий до точки (x_1, y_1) вузол основної сітки $(i, j) = \text{Arg min}_{(i,j)} ((x_1 - i)^2 + (y_1 - j)^2)$.

Тоді за методом найближчого сусіда $A_{i_0, j_0} = A_{i, j}$, за методом білінійної інтерполяції $A_{i_0, j_0} = g_1(x_1 - i)g_1(y_1 - j)$, за методом бікубічної інтерполяції $A_{i_0, j_0} = g_3(x_1 - i)g_3(y_1 - j)$, де $g_1(s)$ та $g_3(s)$ - лінійний та кубічний В – сплайни.

$$g_1(s) = \begin{cases} s + 1, & -1 \leq s < 0 \\ 1 - s, & 0 \leq s \leq 1 \\ 0, & |s| > 1 \end{cases}, \tag{14}$$

$$g_3(s) = \begin{cases} |s|^3 / 2 - s^2 + 2/3, & |s| \in (0, 1) \\ -|s|^3 / 6 + s^2 - 2s + 4/3, & |s| \in (1, 2) \\ 0, & |s| > 2 \end{cases}. \tag{15}$$

Відмітимо, що застосування білінійного та особливо бікубічного метода інтерполяції призводить до згладжування інтерпольованого зображення, що, в свою чергу, веде до погір-

шення його якості. Інтерполятор за методом найближчого сусіда зберігає значення спектральної яскравості в кожній точці і веде лише до локальних зміщень.

Процедура субпіксельного суміщення зображень

Параметри зміщення зображень, отриманих в різних спектральних діапазонах, уточнюються шляхом застосування субпіксельних алгоритмів суміщення [5], найбільш вживаними серед яких є алгоритми:

- інтерполяції інтенсивності;
- апроксимації розв'язної функції двовимірною гаусовою функцією;
- градієнтний.

Серед наведених градієнтний алгоритм має оптимальні характеристики як за точністю, так і за швидкодією, і зводиться до мінімізації середньоквадратичного відхилення між еталонним $A(x_i, y_j)$ і зміщеним $B(x_i, y_j)$ зображеннями:

$$\min_{(dx, dy)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (A(x_i, y_j) - B(x_i + dx, y_j + dy))^2 \quad (16)$$

У припущенні розвинення спектральної яскравості за формулою Тейлора $B(x_i + dx, y_j + dy) = B(x_i, y_j) + B_x(x_i, y_j)dx + B_y(x_i, y_j)dy$ мінімізація функціоналу (16) зводиться до системи лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{pmatrix} \sum_{i,j=1}^{M,N} (B_x(x_i, y_j))^2 & \sum_{i,j=1}^{M,N} (B_x(x_i, y_j)B_y(x_i, y_j)) \\ \sum_{i,j=1}^{M,N} (B_x(x_i, y_j)B_y(x_i, y_j)) & \sum_{i,j=1}^{M,N} (B_y(x_i, y_j))^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i,j=1}^{M,N} (A(x_i, y_j) - B(x_i, y_j))B_x(x_i, y_j) \\ \sum_{i,j=1}^{M,N} (A(x_i, y_j) - B(x_i, y_j))B_y(x_i, y_j) \end{pmatrix}$$

Для обчислення похідних $B_x(x_i, y_j)$ та $B_y(x_i, y_j)$ використовується скінченно-різницєва апроксимація:

$$\begin{aligned} B_x(x_i, y_j) &= (8B(x_{i+2}, y_j) - 8B(x_{i-2}, y_j) - B(x_{i+1}, y_j) + B(x_{i-1}, y_j)) / 12 \\ B_y(x_i, y_j) &= (8B(x_i, y_{j+2}) - 8B(x_i, y_{j-2}) - B(x_i, y_{j+1}) + B(x_i, y_{j-1})) / 12 \end{aligned} \quad (17)$$

Формування множини реперних фрагментів зображення

Знімки, що надходять з космічного апарата «Січ-2», мають фіксовану кількість ліній 6 090, яка відповідає ширині смуги огляду 48 км; перші 90 ліній знімка містять службову

інформацію. Кількість рядків знімка може змінюватись, але не перевищує 38 000, що відповідає максимальній довжині смуги огляду 300 км.

Для вибору множини реперних фрагментів космічний знімок покривається рівномірною сіткою з множиною вузлів $IX_i, IY_j, i = 1, K_x, j = 1, K_y$.

Для вихідного зображення множина вузлів у напрямку рядків визначається за форму-

лою:
$$IX_i = 90 + \left[0.5(N - (K_x - 1) \left[\frac{N}{K_x + 1} \right] \right] + (i - 1) \left[\frac{N}{K_x + 1} \right], i = 1, K_x,$$

де $N = 6000$ - кількість ліній, $K_x = 40$ - кількість вузлів у напрямку рядків.

Множина вузлів за напрямом ліній обчислюється за формулою:

$$IY_j = \left[0.5(M - (K_y - 1) \left[\frac{M}{K_y + 1} \right] \right] + (j - 1) \left[\frac{M}{K_y + 1} \right], j = 1, K_y,$$

де M - кількість рядків, $K_y = \left[K_x \frac{M}{N} \right]$ - кількість вузлів у напрямку ліній. Для пірамідних зображень кількість вузлів сітки зменшується пропорційно параметру осереднення L_p .

У результаті такого вибору вузлів рівномірної сітки крок сітки по напрямку рядків та ліній дорівнює 146 пікселів. Кожний вузол сітки IX_k, IY_l обирається геометричним центром квадратного реперного фрагмента $\Omega_{k,l} = \{(i, j), IX_k - L_m \leq i \leq IX_k + L_m, IY_l - L_m \leq j \leq IY_l + L_m\}$ розміром $(2L_m + 1) \times (2L_m + 1)$ пікселів. Величина L_m обирається експериментальним шляхом, використовуючи критерій мінімізації кількості хибних точок ототожнення. Найкращі результати суміщення каналів спостерігаються для значень параметра $40 \leq L_m \leq 70$, що відповідає розміру квадратної просторової області зі стороною 625 – 1090 м.

Послідовність операцій алгоритму міжканальних геометричних суміщень

- На вхід алгоритму подаються два двовимірних масиви $\bar{A} = A_{i,j}, \bar{B} = B_{i,j}, i = 1, N; j = 1, M$, які містять значення спектральної яскравості базового та зміщеного каналів відповідно.
- Якщо канал \bar{B} - ближній інфрачервоний або панхроматичний, то обчислюється оператор Собеля $S(\bar{A}), S(\bar{B})$ (9), якщо канал \bar{B} - червоний, то оператор S співпадає з тотожним оператором.
- Обирається етап суміщення каналів (грубе, середнє, точне) шляхом вибору параметру L_p . та обчислюються піраміди $P_{L_p}(S(\bar{A})), P_{L_p}(S(\bar{B}))$ для вихідних зображень або їх перетворень Собеля за формулою (16). Для етапу точного суміщення параметр $L_p = 1$.
- Обчислюються вузли регулярної сітки $IX_i, IY_j, i = 1, K_x, j = 1, K_y$ для пірамідних зображень двох каналів та обирається параметр L - півширина реперних квадратних фрагментів $\Omega_{k,l}, k = 1, K_x, l = 1, K_y$.

- Обчислюємо початковий рівень Γ_0 міри близькості (3) – (8) зображень двох спектральних каналів, вид міри близькості є параметром алгоритму.
- Відбираємо найбільш інформативні реперні фрагменти $\overline{A}^{(i,j)} = A_{n,m}^{(i,j)}$, $n = IX_i - L, IX_i + L, m = IY_j - L, IX_i + L$, здійснюючи сортування центральних точок фрагментів $IX_i, IY_j, i = 1, K_x, j = 1, K_y$, ключем сортування обирається ступінь інформативності $\gamma^{(s)} = \rho(A^{(s)}, M_{A^{(s)}}) \leq \gamma^{(s+1)} = \rho(A^{(s+1)}, M_{A^{(s+1)}}) \leq \gamma, s = \overline{1, S}$. Фрагменти, що не задовольняють обраному критерію інформативності, не використовуються для пошуку точок ототожнення двох каналів.
- Для кожного інформативного фрагмента $\overline{A}^{(i_s, j_s)}$ шукаємо реперний фрагмент $\overline{B}^{(i_s+k_s, j_s+l_s)}$ за правилом $(k_s, l_s) = \text{Arg} \max_{-L_m \leq k, l \leq L_m} \rho(A^{(i_s, j_s)}, B^{(i_s+k, j_s+l)})$, $s = \overline{1, S}$.
- За результатами знайдених векторів зміщення (k_s, l_s) формуємо множину точок ототожнення $(IX_{i_s}, IY_{j_s}) \rightarrow (IX_{i_s} + k_s, IY_{j_s} + l_s)$, $s = \overline{1, S}$.
- Будуємо поліноміальні перетворення (11) від першої до третьої степені включно.
- Здійснюємо розрахунок спектральної яскравості зображення зміщеного каналу з використанням процедури інтерполяції для кожного поліноміального перетворення.
- Оцінюємо значення міри близькості $\Gamma_i, i = 1, 2, 3$ для здійснених поліноміальних перетворень. Обираємо результат перетворення з максимальним значенням міри близькості. Результат перетворення зміщеного зображення приймається, якщо виконується умова $\Gamma_p = \max_{1 \leq i \leq 3} \Gamma_i > \Gamma_0$.
- Послідовно здійснюються етапи грубого, середнього та точного суміщень.
- По завершенні етапу точного суміщення проводиться етап субпіксельного суміщення та перерахунок спектральної яскравості.
- Оцінюється значення міри близькості Γ_{sp} . Результат субпіксельного суміщення приймається за умови $\Gamma_{sp} > \Gamma_p$.

Результати чисельних експериментів та висновки

- Розроблений автоматичний алгоритм суміщення спектральних і панхроматичного каналів космознімків КА «Січ-2» працює в повністю автоматичному режимі, здійснює перетворення координат для зміщеного каналу відносно базового та обчислює значення спектральних яскравостей у точках базового каналу. За замовчанням в якості базового каналу обраний канал green.
- Якість суміщення двох каналів на кожному кроці суміщення контролюється за величиною деякої міри близькості зображень, яка зростає на кожному кроці перетворення (грубе, середнє, точне, субпіксельне суміщення) і сягає деякого максимального значення на останньому кроці перетворення спектральних та панхроматичного каналів.

Розділ 3. Науково-технологічна безпека та інтелектуальні ресурси

- Величина міри близькості Γ різних каналів при абсолютно точному суміщенні варіюється в залежності від обраної пари каналів:

- green – read $\Gamma = 0.85 - 0.98$;
- S(green) – S(nir) $\Gamma = 0.60 - 0.80$;
- S(green) – S(pan) $\Gamma = 0.65 - 0.85$;

S(nir), S(pan) – перетворення Собеля ближнього інфрачервоного та панхроматичного каналів.

- Для пари каналів green – read значення міри близькості Γ обчислюється безпосередньо для вихідних зображень двох каналів. Для пар каналів green – nir та green – pan значення міри Γ обчислюється для градієнтних зображень по оператору Собеля відповідних зображень.
- Точність здійснення суміщення каналів в значній мірі визначається якісними характеристиками відзнятої сцени. Зокрема, негативним чином на точність суміщення впливають великі за площею сингулярні фрагменти знімка, такі знімки містять:
 - Відсоток хмарності більший за 30%;
 - Великі за площею (більше за 30% від площі знімка) однорідні фізико-географічні об'єкти: морські акваторії, великі озера, лісові масиви, пустелі, вкриті снігом території.
- Фрагменти таких частин знімку мають значно нижчий ступінь інформативності, що може призводити до появи хибних точок ототожнення таких фрагментів на різних каналах та зниження точності суміщення каналів. У запропонованому алгоритмі обираються найбільш інформативні реперні фрагменти.
- Точність суміщення досягнута алгоритмом в автоматичному режимі для знімків, які не містять великих за площею сингулярних фрагментів, відповідає потребам подальшої тематичної обробки та знаходиться в межах 0.5 пікселя.
- Суміщення каналів для знімків з великими за обсягом сингулярними фрагментами можуть бути здійснені алгоритмом суміщення каналів за допомогою внесення змін до параметрів конфігураційного файлу. При цьому точність, необхідна для здійснення тематичної обробки, може бути досягнута лише для інформативної частини знімка.
- Алгоритм автоматичного суміщення каналів «Січ-2» функціонує на обчислювальному комплексі під управлінням операційного середовища Windows 7 на базі процесора «I7» та 8 Гб ОЗУ, вимоги до величини оперативної пам'яті є критичними. При суміщенні усіх каналів знімка в розрахунку на один рядок знімка розміром 6 000 пікселів алгоритм витрачає близько 0,019 сек. Тобто знімок з кількістю 25 000 рядків обробляється протягом 475 сек.

Список використаної літератури

1. Василевский А.С. Межканальные геометрические совмещение изображений, полученных с помощью малого спутника BIRD/ А.С. Василевский, Б.С. Жуков, Я.Л. Заман Д. Эртель, М. Конрадт//<http://www.iki.rssi.ru/earth/2-05./pdf>

2. Ван дер Векен Д. Применимость мер подобия при обработке изображений / Д.Ван дер Векен, М. Нахтегаль, Э.Е. Керре //
3. Шовенгерд Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Роберт А. Шовенгерд/ М. Техносфер. – 2010. – 560 с.
4. Кузнецов А.Е. Оперативное совмещение спектрональных изображений при цвето-синтезе / А.Е. Кузнецов, П.Н. Светелкин// Весник РГРТУ. – Вып. 22. – Рязань. – 2007.
5. Душепа В.А. Сравнительный анализ субпиксельных алгоритмов при совмещении изображений/ В.А. Душепа, М.Л. Усс// Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2011. – № 4 (52). – с. 41-50.

Стаття надійшла до редакції 17.01.13 українською мовою

© А.В. Кузьмин, Л.Д. Греков, В.В. Оноцкий

Автоматизация процедуры устранения межканальных геометрических деформаций изображений, полученных съёмочной аппаратурой спутника «Сич-2»

Рассматривается алгоритм, предназначенный для устранения взаимных межканальных смещений снимков земной поверхности, полученных съёмочной аппаратурой космического спутника «Сич-2», которые имеют место между тремя отдельными мультиспектральными каналами и панхроматическим каналом. С использованием предложенного алгоритма поиск и устранение межканальных смещений осуществляется оператором в полностью автоматическом потоковом режиме обработки космических снимков. Космические снимки со значительной долей однородных областей алгоритм позволяет обрабатывать с использованием индивидуальных настроек. Устранение межканальных смещений для сильно деформированных каналов осуществляется поэтапно (грубое, среднее, пиксельное и субпиксельное) совмещение. При наличии априорной информации о степени межканальных смещений этапы грубого и среднего совмещения могут не выполняться.

© A.V. Kuzmin, L.D. Grekov, V.V. Onozkiy

Automatization of the procedure for removal of interchannel geometric distortions of images obtained by the “Sich-2” surveying instruments

The article describes the algorithm aimed at eliminating mutual interchannel shifts of Earth surface pictures taken by Sich-2 space satellite shooting equipment. The shifts take place between three separate multispectral channels and the panchromatic channel. With the use of the proposed algorithm the search and elimination of interchannel shifts can be carried out by an operator in a completely automated stream mode of the space picture processing. The algorithm allows space pictures with a considerable degree of homogeneous parts to be processed with the use of individual adjusting parameters. The search and elimination of interchannel shifts for too deformed channels are carried out step-by-step (coarse, medium, pixel and sub-pixel) superimposition. When there is an a priori information about the degree of interchannel shifts the steps of rough and medium superimposition can remain unperformed.