

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ЦИФРОВИХ СКАНЕРНИХ
ЗОБРАЖЕНЬ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

Гнатушенко В.В.

Постановка проблеми. Як відомо, у загальному вигляді в залежності від геометрії побудови знімка можна виділити три види зйомки: кадрова, щілинна, скануюча. При кадровій зйомці усі точки кадру фіксуються в один момент часу (при спрацюванні затвора). Такий знімок має єдиний центр проєкціонування та строгу геометрію побудови зображення. При щілинній фотозйомці зображення точок місцевості проєктуються об'єктивом фотокамери на фотоплівку через вузьку щілину, що забезпечує печатку одного рядка кадру. Розгорнення зображення здійснюється за рахунок руху або плівки щодо щілини з одночасним переміщенням фотокамери відносно об'єкта зйомки, або щілини уздовж плівки. У скануючих камерах побудова зображення як по рядку так і по кадру відбувається попіксельно, тобто кожна точка фіксується в окремий момент часу та має свій центр проєкціонування. Очевидні переваги цифрової зйомки обумовили проведення в даний час активних робіт зі створення цифрових сканерних камер з фотоприймачами на базі матричних і лінійних приладів зарядового зв'язку (ПЗЗ). Особливості сканерних знімків, що відрізняють їх від фотографій або кадрових зображень, обумовлені як геометрією пучка променів, що реєструються нерухомим сенсором, так і рухом сенсора в процесі формування знімка по рядкам. Сканерне зображення суттєво відрізняється від центральної проєкції тим, що воно миттєво отримується в межах смуги (рис.1), перпендикулярної до напрямку польоту [1]. Космічний апарат (КА) переміщається в польоті — фіксується наступна смуга (рис.2). Зображення якби “склеєне” з окремих смуг, кожна з яких має свій миттєвий центр проєкціонування, і внаслідок нестабільностей сенсорів суцільне зображення є спотвореним.

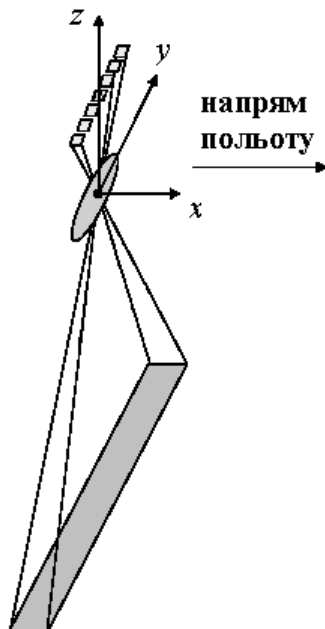


Рис. 1. Одержання знімка окремої смуги ПЗЗ-лінійкою

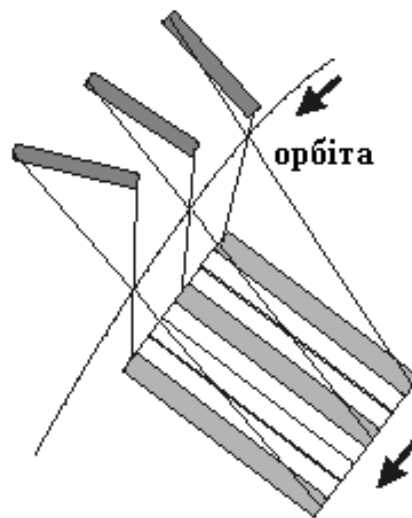


Рис. 2. Одержання знімка сцени в результаті руху КА

Існуючі моделі і методи попередньої обробки кадрових зображень не дозволяють ефективно компенсувати такі перекручування з урахуванням динаміки їхнього формування внаслідок відсутності адекватної фізичної моделі формування сканерних зобра-

жень. Це приводить до зниження рівня вірогідності дешифрування об'єктів на цифровому знімку. Зазначені особливості вимагають застосування специфічних алгоритмів для фотографметричної обробки сканерних знімків.

Аналіз останніх досліджень. Існує два основних підходи до побудови таких алгоритмів: перший пов'язаний з геометричним моделюванням процесу зйомки (внутрішньої геометрії сенсора, орбіти й орієнтації носія) [2], другий — з використанням параметризованих алгебраїчних співвідношень [3, 4]. Алгоритми першої групи звичайно забезпечують кращу точність, хоча існують приклади досить точних методів другої групи, у яких використовуються досить складні співвідношення (наближені значення вхідних параметрів поставляються разом зі знімком). Вибір підходу до обробки визначається складом даних, що супроводжують знімок. У будь-якому випадку для уточнення параметрів знімка використовуються опорні точки (GCP), тобто точки з відомими геодезичними координатами, розпізнані на знімку [5].

Строге моделювання лінійних матричних сканерів вимагає знання параметрів внутрішньої орієнтації (ІОР) і параметрів зовнішньої орієнтації (ЕОР) сканера для кожного зображення в сцені. Компенсувати недостачу такої інформації покликані альтернативні моделі [3, 6], серед яких слід виділити паралельно-проекційну модель, що має певні переваги для наступної обробки сканерних зображень.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Ці обставини ставлять задачу розробки та дослідження властивостей паралельно-проекційної моделі формування цифрових сканерних зображень з урахуванням специфіки їхнього формоутворення.

Основна частина. Спочатку дамо визначення використовуваним термінам “сцена” і “зображення”. Під *зображенням* будемо розуміти зареєстровані сенсорні дані, пов'язані з одним станом експозиції. Як було зазначено вище, у випадку кадрового зображення існує тільки один такий стан, і, отже, результат - одне повне зображення. У випадку лінійного ПЗЗ-сканера є багато 1-D зображень, кожне з яких пов'язане з різними моментами експозиції. Під *сценою* будемо розуміти зареєстровані сенсорні дані, пов'язані з одним (як у кадрових зображень) чи більшою кількістю станів експозиції (як у лінійних ПЗЗ-сканерів), що відображають майже безупинний простір об'єкта в окремому дискретному переміщенні датчика. Тому, для випадку кадрових зображень, зображення і сцена - ідентичні поняття, у той час як, для лінійних ПЗЗ-сканерів, сцена - множина послідовних 1-D зображень. Отже, важливо розрізнити координати сцени і координати зображення.

Далі наведемо ті міркування, якими був обумовлений наш вибір паралельно-проекційної моделі. По-перше, це той факт, що переважна більшість космічних сканерів мають вузьку смугу огляду (наприклад, для супутника IKONOS — 0.92°). Зрозуміло, що в такому разі, промені проєціювання в межах сцени можна вважати паралельними. По-друге, космічні сцени фіксуються у стислий час (для IKONOS — менше 1 сек.). Тому можна припустити, що під час експозиції усієї сцени сканер має незмінні елементи зовнішнього орієнтування і, як результат, що площини окремих зображень (смуг) та їх центри проєціювання паралельні. І нарешті, через дуже стислий час фіксації можна вважати, що сканер рухається з постійною швидкістю, в результаті чого однакові відстані у предметній площині відображуються в рівнозначні відстані у картинній площині.

Зв'язок між просторовими характеристиками реального об'єкта (X, Y, Z) і координатами об'єкта на знімку (x, y) для нелінійної форми паралельно-проекційної моделі має наступний вигляд:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix} = \lambda s A^T \begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} + s A^T \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де A — матриця переходу від системи координат об'єкта до картинної системи координат; λ — відстань між відповідними точками об'єкта і зображення; N — Z -компонента одиничного проєкційного вектора, тобто $N = \sqrt{1 - L^2 - M^2}$.

Лінійна форма даної моделі набуває наступного афінного вигляду [2, 3]:

$$\begin{aligned} x &= A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4, \\ y &= A_5X + A_6Y + A_7Z + A_8. \end{aligned} \quad (2)$$

Слід зазначити, що дана форма використовується, коли “доступні” GCP. З іншого боку, при наявності навігаційних даних сканера (елементів зовнішнього орієнтування) краще користатися співвідношенням (1).

Перехід від форми (1) до лінійної форми (2) здійснюється з проміжним обчисленням параметрів (U, V) та наступним знаходженням афінних параметрів [7]:

$$\begin{aligned} U &= \frac{a_{11}L + a_{21}M + a_{31}N}{a_{13}L + a_{23}M + a_{33}N}, \\ V &= \frac{a_{12}L + a_{22}M + a_{32}N}{a_{13}L + a_{23}M + a_{33}N}. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} A_1 &= s(a_{11} - a_{13}U); & A_2 &= s(a_{21} - a_{23}U); & A_3 &= s(a_{31} - a_{33}U); & A_4 &= \Delta x; \\ A_5 &= s(a_{12} - a_{13}V); & A_6 &= s(a_{22} - a_{23}V); & A_7 &= s(a_{32} - a_{33}V); & A_8 &= \Delta y, \end{aligned}$$

де $a_{11} \dots a_{33}$ — елементи поворотної матриці A .

Зворотній перехід та отримання паралельно-проєкційних параметрів сцени можуть бути здійснені наступним чином. Спочатку знаходимо компоненти проєкційного вектора:

$$\begin{aligned} L' &= \frac{A_3}{\sqrt{(A_2^2 + A_3^2)P^2 + 2A_1A_2P + A_1^2 + A_3^2}}; & M' &= PL'; & N' &= \frac{-L'A_1 - M'A_2}{A_3}; \\ L &= L' \frac{N'}{|N'|}; & M &= M' \frac{N'}{|N'|}; & N &= |N'|, \end{aligned} \quad (4)$$

де $P = \frac{A_1A_7 - A_3A_5}{A_3A_6 - A_2A_7}$. Далі знаходимо коефіцієнт масштабування:

$$s = \sqrt{K_1 / (1 + W^2)}, \quad (5)$$

де $K_1 = A_1^2 + A_2^2 + A_3^2$; $K_2 = A_5^2 + A_6^2 + A_7^2$; $K_3 = A_1A_5 + A_2A_6 + A_3A_7$; $T = K_3^2 - K_1K_2$;

$$B = 2K_3^2 + K_1^2 - K_1K_2; \quad C = K_3^2; \quad W = \sqrt{\frac{-B - \sqrt{B^2 - 4TC}}{2T}} \frac{L}{|L|}; \quad Q = \frac{K_3(1 + W^2)}{K_1W}.$$

Нарешті, знаходимо кути орієнтування сцени:

$$\begin{aligned} \varphi &= \arcsin \left(\frac{\frac{L}{|L|} \sqrt{E^2 - 4DF} - E}{2D} \right); & k &= \arctan \left(\frac{\frac{A_5}{s} - Q \sin \varphi}{\frac{A_1}{s} + W \sin \varphi} \right); \\ \omega &= \arcsin \left(\frac{A_2 \sin \varphi \cos k + A_2 W \cos \varphi + A_3 \sin k}{s(\sin^2 k + (\sin \varphi \cos k + W \cos \varphi)^2)} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{де } E = \frac{2}{S}(WA_1 + QA_5); D = 1 + W^2 + Q^2; F = \frac{1}{S^2}(A_1^2 + A_5^2) - 1.$$

Знаючи кут крена ψ , здійснюємо перехід від перспективної до паралельно-проекційної моделі [7]:

$$\begin{aligned} x &= A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4, \\ y &= \frac{A_5X + A_6Y + A_7Z + A_8}{1 + \frac{\tan(\psi)}{c}(A_5X + A_6Y + A_7Z + A_8)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Дана форма використовується для безпосередньої оцінки 2-D афінних параметрів і кута крена сканера. Далі розглянемо альтернативний підхід, що дозволяє одержати паралельно-проекційні параметри сцени, коли доступні елементи зовнішнього орієнтування сканера.

Як було доведено вище, можна припустити, що під час фіксації сцени космічні сканери рухаються з постійною швидкістю $V_T(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ та збереженням параметрів орієнтування $(\omega_T, \varphi_T, \kappa_T)$. Тоді відповідний проекційний вектор моделі визначається як:

$$[L \ M \ N] = [a_{T13} \ a_{T23} \ a_{T33}], \quad (8)$$

де $a_{T11} \dots a_{T33}$ — елементи поворотної сканерної матриці.

Матриця переходу A , яка фігурує у співвідношенні (1), у загальному випадку не співпадає зі сканерною матрицею та може бути знайдена наступним чином:

$$A = [x \ y \ z], \quad (9)$$

де x, y, z — одиничні вектори по координатним осям сцени:

$$x = y \times z; \quad y^T = [a_{T12} \ a_{T22} \ a_{T32}]; \quad z = \frac{V_T \times y}{|V_T \times y|}.$$

Коефіцієнт масштабування сцени дорівнює:

$$s = c \frac{a_{T33}}{Z_{0T} - Z_{cp}}, \quad (10)$$

де Z_{cp} — середнє значення висот місцевості сцени.

Нарешті зсув двох сцен визначається наступним чином:

$$\begin{aligned} \Delta x &= s(a_{13}U - a_{11})X_{0T} + s(a_{23}U - a_{21})Y_{0T} + s(a_{33}U - a_{31})Z_{0T}, \\ \Delta y &= s(a_{13}V - a_{12})X_{0T} + s(a_{23}V - a_{22})Y_{0T} + s(a_{33}V - a_{32})Z_{0T}, \end{aligned} \quad (11)$$

де U, V можуть бути знайдені за допомогою співвідношення (3).

Висновки та перспективи подальших досліджень. Розроблене спеціалізоване програмне забезпечення, яке реалізує запропоновану паралельно-проекційну модель формування сканерних зображень, дозволяє на наступних етапах автоматично коректувати спотворення, викликані кутовими коливаннями по крену, тангажу і рисканню, що істотно спрощує процедури автоматичної інтерпретації одержуваних зображень та ідентифікації окремих об'єктів на них. Приклади тестування на реальних даних, одержаних зі супутни-

ків Spot-5 і Ikonos, підтверджують адекватність та ефективність розробленої моделі і дозволяють оцінити геометричну точність результатів корекції, яка підвищується при застосуванні допоміжного перспективно-паралельного перетворення (7).

Наші подальші дослідження будуть присвячені питанням залежності точності відновлення елементів орієнтування сцени від кількості опорних точок та наступній автоматичній триангуляції цифрових знімків.

The work is devoted to development and research of properties and capabilities of parallel-projection model of formation digital scanner remote sensing images of in view of their specificity formation.

1. Корчинський В.М. Реконструкція просторових розподілів яскравості багатоспектральних растрових зображень на основі інформаційних критеріїв // Праці VII Всеукраїнської міжн. конференції з оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів “УкрОбраз-2004”. - Київ: Інститут кібернетики НАН України, 2004. – С. 53-56.
2. Zhang J., Zhang X. Strict geometric model based on affine transformation for remote sensing image with high resolution // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 34 (B3), - 2003. - P 309-312.
3. Гнатушенко В.В. Альтернативні геометричні моделі одержання супутникових зображень високого розрізнення // Геометричне та комп’ютерне моделювання. – Харків: ХДУХТ, 2004. – Вип. 8. – С. 48-53.
4. Гнатушенко В.В. Геометричні методи формування зображень високого розрізнення зі супутника IKONOS // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2004. – Вип. 4, Т.27. – С. 35-39.
5. Гнатушенко В.В., Реута О.В. Геометрія пошуку опорних точок при обробці зображень // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – К.: КНУБА, 2003. – Вип. 73. – С. 184-189.
6. Wang Y. Automated triangulation of linear scanner imagery // Joint workshop of ISPRS WG I/1, I/3, IV/4 on sensors and mapping from space. – Hanover, 1999.
7. Morgan M., Kim K., Jeong S., Habib A. Parallel projection modelling for linear array scanner scenes // XXth Congress of ISPRS, 12-23 July, 2004.