

УДК 528.71

В.В. Гнатушенко, Вікт.В. Гнатушенко, І.С. Дмитрієва
**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОРЕКЦІЇ ФОТОГРАММЕТРИЧНИХ
ДАНИХ СКАНЕРНОЇ ЗЙОМКИ**

Анотація. Геометрична корекція зображень земної поверхні, одержуваних цифровими лінійними ПЗЗ-камерами, може проводитися з використанням даних про кутові елементи зовнішнього орієнтування в моменти часу, що відповідають реєстрації кожного з рядків. При відсутності таких даних пропонується використовувати запропоновану математичну модель корекції сканерних даних, що дозволяє компенсувати вплив кутових коливань шляхом аналізу самих зображень, одержуваних ПЗЗ-камерою.

Ключові слова: сканерне зображення, фотограмметрія, модель, геометрична корекція.

Постановка проблеми

Системи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) знаходять ефективне застосування в багатьох галузях народного господарства. Однак у вихідному виді фотограмметричні зображення не можуть бути використані по призначенню, оскільки мають значні геометричні спотворення стосовно об'єктів спостережуваної сцени. Першочерговим завданням при наземній обробці таких відеоданих є їхня геометрична корекція з метою одержання зображень, по яких стає можливим з високою точністю вимірювати геометричні характеристики об'єктів земної поверхні. Основними характеристиками систем ДЗЗ є їхня роздільна здатність і смуга огляду. Традиційне поліпшення цих характеристик здійснювалося шляхом розробки відеодатчиків з підвищеним числом фотоприйомних елементів. Такі датчики, як правило, конструювалися на основі приладів із зарядовим зв'язком з максимально можливим числом світлочутливих елементів. Це дуже тривалий і трудомісткий технологічний шлях, по якому не можна задовольнити зростаючі вимоги споживачів до роздільної здатності й смуги огляду зйомки. Тому в останні роки в практику дистанційного

© Гнатушенко В.В., Гнатушенко Вікт.В., Дмитрієва І.С., 2010

зондування стали активно впроваджуватися відеодатчики сканерного типу. Характерною рисою сканерних зображень, сформованих у процесі польоту супутника або літака, є зміна за складними законами перекриття сканів, що залежить від багатьох факторів: параметрів орбіти й кутів орієнтації носія; режимів роботи сканера (маневри супутника й програмне відхилення поля зору датчика); рельєфу місцевості й ін. Дія цих факторів приводить до порушення структури зображення у вигляді геометричних розривів об'єктів спостережуваної сцени уздовж лінії стику сканів. У зв'язку із цим гостро виникає проблема розробки адекватних моделей геометричної корекції сканерних зображень, які б враховували реальні умови їхнього формоутворення [1].

Аналіз останніх досліджень

Для геометричної корекції одержуваних зображень використовують інформацію із прецизійних датчиків у складі інерціальних навігаційних систем і апаратури автономної супутникової навігації, установлюваних спільно зі знімальною камерою [2, 3]. Навігаційна апаратура повинна забезпечувати вимір кутових і лінійних елементів зовнішнього орієнтування в моменти реєстрації кожного з рядків зображення з високою точністю (порядку 5-10" і 10 см відповідно). При відсутності точних навігаційних вимірів геометрична корекція одержуваних зображень може здійснюватися шляхом їхнього сполучення із заздалегідь отриманими фотопланами. Для забезпечення високої точності при цьому потрібна ідентифікація дуже великої кількості опорних точок (ОТ). Але викривлення форми об'єктів на зображеннях утруднюють ідентифікацію ОТ. Одним зі шляхів підвищення точності корекції може бути детектування та зіставлення прямолінійних ділянок границь об'єктів [3]. Параметри кутових коливань літака по трьом осям суттєво різняться. Кожна зі складових кутового руху виявляє свій вплив на зображення й характер викривлень, що привносяться ними, різний. Кутові коливання по крену встановленої на літаку камери під час зйомки привносять найбільш помітні на око викривлення: прямолінійні ділянки границь об'єктів набувають хвилеподібного виду [3, 4]. Механізм появи таких викривлень полягає в тому, що при коливаннях камери по крену сусідні рядки на зображенні зрушуються друг щодо друга. Описаний ефект можна

частково компенсувати шляхом аналізу самих зображень.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Ціль роботи полягає у розробці математичної моделі корекції сканерних даних, що дозволить урахувати кривизну Землі та компенсувати вплив кутових коливань шляхом аналізу самих зображень, одержуваних ПЗЗ-камерою.

Основна частина

Розглянемо схему формування аерокосмічних зображень із урахуванням кривизни Землі. Нехай супутник обгинає поверхню Землі по круговій орбіті на висоті H . Це рівносильно руху супутника по прямій, але над поверхнею циліндра. «Спотворене» зображення, яке буде сканер супутника із циліндричним або лінійним розгорненням, — це проекція на поверхню циліндра F (рис. 1).

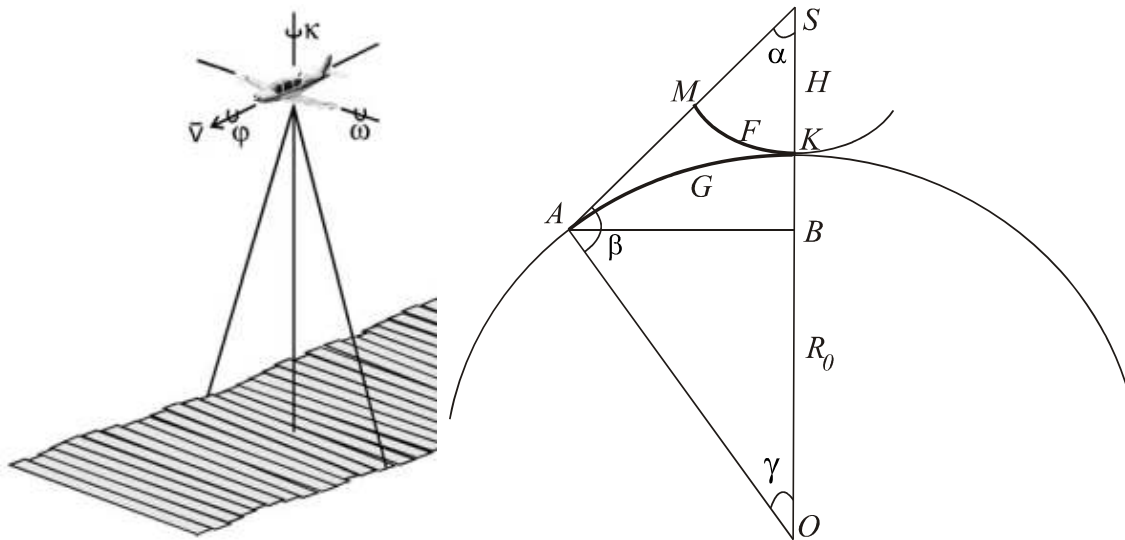


Рисунок 1 - Формування сканерного зображення

У дійсності ж сканер відображає земну поверхню, тобто зовнішню поверхню циліндра G . Будемо вважати, що Земля — куля радіусом $R_0 = 6370$ км; власне обертання Землі під час побудови сканерного зображення враховувати не будемо. Нехай $L = SA$ — відстань від супутника S до деякої точки земної поверхні при скануванні, ΔL — дозвіл у надирі, $\Delta\phi$ — миттєве поле зору, α — кут сканування (кут візування), під кутом γ дуга AK видна із центру Землі. Використовуючи теорему синусів і враховуючи, що для всіх значень кута α виконується співвідношення $(H + R_0) \sin \alpha < H$, одержуємо:

$$\frac{SO}{\sin \beta} = \frac{AO}{\sin \alpha}; \sin \beta = \left(1 + \frac{H}{R_0}\right) \sin \alpha; \gamma = \pi - \beta - \alpha;$$

$$\gamma = \pi - \arcsin \left(\left(1 + \frac{H}{R_0}\right) \sin \alpha \right) - \alpha; L = \frac{R_0 \sin \gamma}{\sin \alpha}. \quad (1)$$

Довжина дуги АК, що відповідає розгорненню зовнішньої поверхні циліндра G дорівнює $y = АК = R_0 \gamma$. Довжина дуги МК, що відповідає зображенню x дорівнює $МК = H\alpha$, звідки $\alpha = \frac{x}{H}$. Таким чином,

$$y = R_0 \left(\pi - \arcsin \left(\left(1 + \frac{H}{R_0}\right) \sin \left(\frac{x}{H} \right) \right) - \frac{x}{H} \right) \quad (2)$$

Використовуючи (2), можна перерахувати координату x уздовж рядка «спотвореного» зображення в координату уздовж рядка реального зображення. Знання відстані L дозволяє уточнити просторове розрізнення. Мінімальна дальність $L_{\min} = H$, при цьому розрізнення $\Delta L = \Delta \varphi H$; при максимальному куті сканування α_{\max} дальність дорівнює L_{\max} , розрізнення $\Delta L_1 = \Delta \varphi L_{\max}$ уздовж напрямку руху супутника. Але поверхня видна із супутника під кутом α_{\max} , тому поперек напрямку руху $\Delta L_2 = \Delta L_1 / \cos \alpha_{\max}$. Таким чином, на максимальній дальності поперек напрямку руху піксели виявляються стислими в $\frac{\Delta L_2}{\Delta L}$ рази, уздовж — у $\frac{\Delta L_1}{\Delta L}$ разу. Смуга огляду, що здається, $F_{\max} = H\alpha_{\max}$, реальна смуга $G_{\max} = 2R\beta_{\max}$.

Для супутника NOAA $H = 870$ км, $\alpha_{\max} = 55$, $\Delta \varphi = 1.26 \cdot 10^{-3}$ рад., $\Delta L = 1,1$ км. Максимальна дальність $L_{\max} = 1827$ км, смуга огляду $G \sim 3000$ км, розрізнення $\Delta L_1 = 2,31$ км і $\Delta L_2 = 4,02$ км. На максимальній дальності поперек напрямку руху піксели виявляються стислими в 3,65 рази, уздовж нього — в 2,1 рази. Дві ріки, що течуть паралельно напрямку руху супутника і перебувають на відстані 1,1 км друг від друга, у надирі були б помітні, але на краю скана вони зливаються. Якщо не проводити корекцію, то смуга огляду видасться рівною $F_{\max} = H\alpha_{\max} = 1670$ км. Під час одного скана супутник NOAA переміщається на 1,1 км при розрізненні в надирі 1,1 км. На деякій

відстані від надира рядки зображення починають помітно перекриватися. Визначимо область супутникового зображення з малими викривленнями як ділянку, де рядки перекриваються не більше ніж на 10%, тобто приблизно на 0,1 км. При цьому $\Delta L_1 = 1,3$ км. Ця ділянка відповідає смузі огляду в ± 475 км і дійсній смузі огляду в ± 540 км від надира. Розрізнення уздовж скана на границі ділянки становить $\Delta L_2 = 1,54$ км, уздовж скана піксели витягнуто в 1,4 рази.

Для супутників з малою смугою огляду (наприклад, супутник «Ресурс-01-3», сканер «МСУ-Э»; супутник SPOT, сканер HVR) при спостереженні в надир геометричні викривлення зображень за рахунок кривизни Землі незначні. Викривлення виникають при відхиленні осі сканування від надира, яке може досягати близько 30° (перспективні викривлення). У дійсності зображення трохи витягнуте уздовж напрямку сканування (60,5 км). При цьому розрізнення уздовж напрямку руху супутника становить $\Delta L_1 = 41$ м на максимальній дальності та $\Delta L_1 = 39$ м на мінімальній, у той час як у надирі $\Delta L_1 = 35$ м. У надирі для МСУ-Э розрізнення уздовж лінії сканування $\Delta L_2 = 45$ м, при відхиленні осі сканування на 30° $\Delta L_2 = 60$ м. Результати аналогічних розрахунків для інших сучасних супутників зведено у табл.1.

Таблиця 1

Супутник	Висота, км	Розрізнення в надирі, м	Кут	Доступна смуга огляду, км	Смуга захвату, км	ΔL_1	ΔL_2
QuickBird	450	0.61	30	544	16.5	0,74	0,85
IRS-P5	618	2,5x2,78	26	800	30	3,37	3,74
Монитор-Э	540	8	30	780	90	11,56	13,34
Ресурс-ДК	350-600	1	30	448	28,3	1,28	1,48
THEOS	822	2	30	1000	22	0,05	0,06

Розглянуті причини геометричних викривлень супутникових зображень не єдино можливі. Сонячно-синхронні орбіти природознавчих супутників не перетинають вісь обертання Землі, а нахилені щодо неї. Оскільки супутник рухається з півночі на південь (спадний виток орбіти), то вгорі зображення буде не північ, як на карті, а, наприклад, північ-північно-схід. До того ж під час сеансу приймання супутникової інформації Земля повертається на деякий

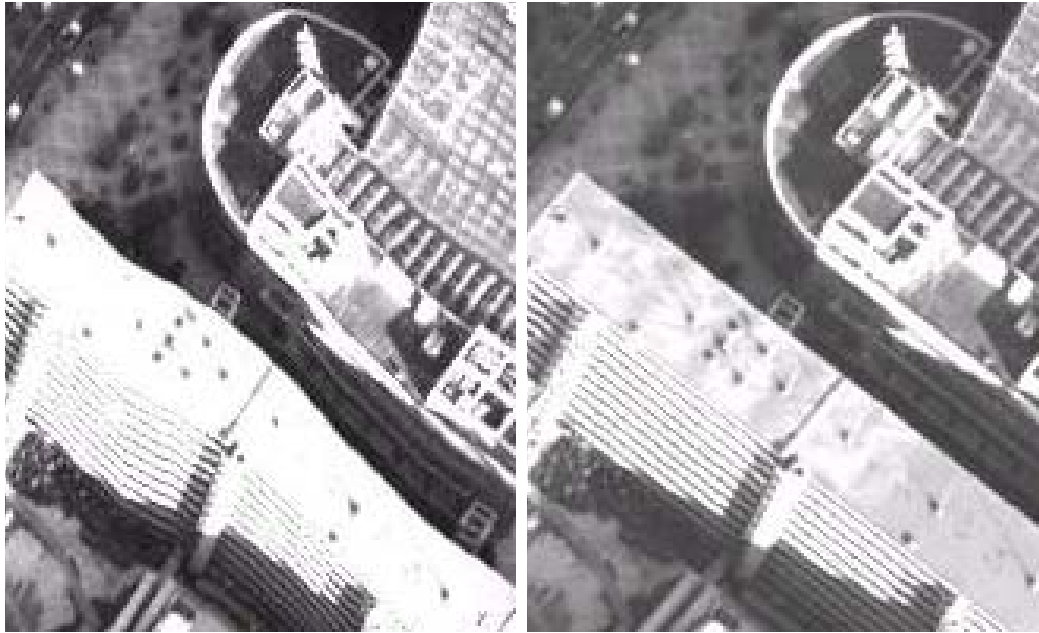
кут (на $0,25^\circ$ за 1 хв). Крім того, часто доводиться обробляти архівні зображення, для яких невідомі й орбітальні дані, і кут відхилення осі сканування від надира.

Запропонована модель формування сканерних зображень та геометричної корекції викривлень, що викликані кутовими коливаннями носія та кривизною Землі, засновано на оцінці величини взаємних зсувів сусідніх рядків зображень із субпіксельною точністю й наступній компенсації цих зсувів. Наявність на зображенні навіть окремих яскраво виражених діагонально орієнтованих об'єктів може привести до неправильної оцінки величини зсуву сусідніх рядків, оскільки такі об'єкти будуть домінувати над неконтрастними деталями на зображенні. Для того щоб уникнути зазначеного ефекту, доцільно проводити оцінки зсувів у межах декількох фрагментів рядка, а потім відсівати неправильні оцінки шляхом медіанної фільтрації. Пропонуємий алгоритм оцінки зсувів рядків зображення включає наступні етапи: 1) кожний рядок зображення розбивається на набір фрагментів фіксованого розміру; 2) для кожного із фрагментів визначається величина зсуву поточного рядка щодо попереднього; 3) оцінюється величина додаткового субпіксельного зсуву фрагмента рядка щодо попереднього рядка; 4) у якості величини зсуву рядка ухвалюється середнє значення зсувів, отриманих для окремих фрагментів; 5) отриманий вектор величин зсувів зазнає високочастотної та низькочастотної фільтрації для виключення шумових складових.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Тестування запропонованої моделі геометричної корекції сканерних зображень підтвердило її адекватність. На рис. 2 поданий приклад результатів роботи спеціально написаного програмного модуля геометричної корекції. На рис. 2а подане вихідне сканерне зображення («сирий» знімок, сформований у наземному Центрі прийому), на якому можна бачити геометричні спотворення уздовж лінії стику сканів. На рис. 2б подане скоректоване зображення. Викривлення, що були присутні у вигляді хвилеподібних границь будинків і доріг практично не помітні на скоректованому зображенні. Наші подальші дослідження будуть присвячені питанням геометричної корекції сканерних стереозображень. Оскільки стереозйомка має більшу інформативність, то на перший погляд це

надасть додаткові можливості з підвищення якості результатів геометричної корекції сканерних знімків.



а) вихідне зображення

б) після корекції

Рисунок 2 - Результати геометричної корекції

ЛІТЕРАТУРА

1. Гнатушенко В.В. Моделювання процесу формування цифрових сканерних зображень дистанційного зондування / В.В. Гнатушенко // Научно-техн. журнал “Автоматика. Автоматизация. Электротехн. комплексы и системы”. – Херсон: ХНТУ. — №1 (15), 2005. – С. 42-46.
2. Кашкин В.Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений / В.Б. Кашкин, А.И. Сухинин // Учебное пособие. – М.: Логос, 2001. – 264 с.
3. Василейский А.С. Коррекция геометрических искажений видеоданных с цифровых аэросъемочных камер, вызываемых угловыми колебаниями носителя по крену / А.С. Василейский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – М.: ИКИ РАН. — №1 Т.2, 2005. – С. 203-209.
4. Гнатушенко В. В. Моделі геометричної корекції сканерних зображень / В.В. Гнатушенко, І.С. Дмитрієва // Праці ТДАТУ. — Мелітополь, 2008. — Вип. 4, т.39. — С.75—79.

Получено 27.01.2010г.