УДК 528.72

Ю. Шкурченко
Національний університет "Львівська політехніка"

КАЛІБРУВАННЯ НАЗЕМНИХ ФОТОЗНІМКІВ ЗА ВІДОМИМИ КООРДИНАТАМИ ОПОРНИХ ТОЧОК

© Шкурченко Ю., 2005

Сформулировано математическую модель задачи фотограмметрической калибровки наземных фотоснимков при известных координатах опорных точек. Представленная модель практически использована для розработки алгоритма и программы калибровки наземных фотоснимков по макетным данным. При расчетах применен принцип учета систематических искажений в точках снимка.

The mathematic problem of photogrammetric calibration of terrestrial images when coordinate of control points are known is formulated. Proposed model was practically used for development of algorithm and program of calibration of terrestrial images on pattern data. Principle of account of systematic deviations in the image points has been applied.

Постановка проблеми. Центральне місце в сучасних умовах фотограмметричного виробництва займає комплексна проблема ефективності функціонування наземних фотознімальних систем. Невід'ємну частину цієї актуальної проблеми становить задача калібрування фотограмметричної апаратури, визначення і врахування параметрів калібрування фотокамер під час фотограмметричної обробки знімків. Тому питання підвищення метричних характеристик зображень під час використання аналітичних та цифрових методів фотограмметрії потребують постійної уваги та вдосконалення.

Зв'язок з науковими та практичними завданнями. Застосування способів фотограмметричної обробки знімків для розв'язання багатьох практичних задач можливе за умови розробки способів калібрування фотографічних камер. Нові можливості вдосконалення таких технологій виникли у зв'язку із загальним розвитком теорії аналітичної та цифрової фотограмметрії, різким зростанням технічних можливостей фотограмметричної апаратури та обчислювальної техніки. Результати роботи можливо використати для розробки моделей, алгоритмів та програмного забезпечення технологій фотограмметричного калібрування знімків.

Аналіз досліджень та публікацій. У сучасній фотограмметрії завдання калібрування розв'язується різними способами [1]. В основу теорії найбільш перспективних польових способів калібрування покладено метод сумісного визначення результатів фотограмметричних побудов з врахуванням поправок в результати лабораторних випробувань та систематичних похибок в точки знімків, отриманих в реальних умовах знімання [1, 2]. Ця робота є продовженням дослідження математичної моделі калібрування цифрових аеро- та наземних знімків з використанням опорних польових даних [3].

Мета цих досліджень – удосконалити теоретичну модель способу калібрування аерофотознімків з використанням дослідного полігону [3], розв'язати задачі визначення параметрів калібрування за наземними макетними знімками, вказати особливості використання запропонованого способу.

Виклад основного матеріалу досліджень. ***1. Теоретична модель способу.*** В теоретичному плані математичну модель задачі фотограмметричного калібрування наземних фотознімків дослідного тест-об'єкта подано як різницю між виміряними величинами **x**, **z** на знімку та обчисленими $\bar{x}$, $\bar{z}$ за відомими просторовими координатами опорних точок об'єкта:

$$\Delta x_i = x_{ti} - \bar{x}_i = x_{ti} - \frac{f}{Y_i}(X_{ri} - X_s), \qquad \Delta z_i = z_{ti} - \bar{z}_i = z_{ti} - \frac{f}{Y_i}(Z_{ri} - Z_s), \tag{1}$$

де x_{ti}, z_{ti} – трансформовані значення виміряних координат *i*-точки фотознімка; $\bar{x}_i$, $\bar{z}_i$, – обчислені значення координат *i*-точки на горизонтальному знімку; X_S, Z_S – координати центра проекції у вибраній абсолютній (зовнішній) системі; X_{ri}, Z_{ri} – координати відповідної опорної точки місцевості у згаданій вище системі; f, Y_i – фокусна відстань фотокамери (паспортне або наближене значення), значення відстані до *i*-опорної точки.

Варто зазначити, що модель (1) досліджено при калібруванні аерофотознімків з використанням дослідного полігону. Нами отримано відмінні результати з часткового калібрування макетних та реальних аерофотознімків для випадку *малих кутів* зовнішнього орієнтування знімка (плановий випадок знімання) [4].

Рівняння похибок, які використано при розрахунках параметрів калібрування зображень за наземними фотознімками, мають вигляд

$$\begin{vmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & c_5 & c_6 & c_7 & c_8 & c_9 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 & d_5 & d_6 & d_7 & d_8 & d_9 \end{vmatrix} \cdot \left| \delta\alpha \;\; \delta\omega \;\; \delta\chi \;\; \delta X_S \;\; \delta Z_S \;\; \delta Y_S \;\; \delta f \;\; \delta x_0 \delta z_0 \right|^T + \begin{vmatrix} x_t \\ z_t \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} \bar{x} \\ \bar{z} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} v_x \\ v_z \end{vmatrix},$$

де $\delta\alpha$, $\delta\omega$, $\delta\chi$, δX_s, δY_s, δZ_s, δf, δx_0, δz_0 – поправки в наближені значення елементів зовнішнього (ЕЗО) та внутрішнього орієнтування (ЕВнО); c_1-c_9 , d_1-d_9 – часткові похідні функції (1) за всіма змінними; v_x, v_z – значення похибок в точках знімка.

Значення коефіцієнтів c_i, d_i обчислюються за наближеними значеннями елементів зовнішнього і внутрішнього орієнтування.

Для врахування геометричних спотворень центральної проекції знімків (Δx, Δz) в рівняння (2) необхідно ввести додаткові параметри, які виражають вплив елементів внутрішнього орієнтування, дисторсії, всіх складових систематичних похибок [1].

2. Розв'язок задачі аналітичного калібрування знімків наземного знімання. Вихідний матеріал для визначення параметрів калібрування фотознімка складається з:

– паспортних даних фотокамери (лабораторне калібрування);

– файла результатів вимірів (x, z) або (x, z, p, q) – для знімків або стереопар;

– файла геодезичних координат опорних точок тест- об'єкта.

Визначено алгоритм розв'язку задачі:

– ввід вихідних даних, початкових параметрів та допусків, перевірка даних;

– виконують попередню обробку результатів вимірів (особливо важливим цей етап виконується для цифрових знімків);

– визначають поправки до ЕВнО та ЕЗО знімків;

– розв'язок системи продовжують доти, поки поправки до невідомих не стануть меншими від встановленого допуску.

Розв'язуючи систему рівнянь (2) за способом найменших квадратів (за умови [vv]=min), знаходимо елементи внутрішнього та зовнішнього орієнтування фотознімків та шукані значення систематичних спотворень (x_i, Δz_i) в кожній точці фотознімка.

Подамо вирази для коефіцієнтів рівнянь похибок (2), які використано при розрахунках:

$c_1 = (f + x_{2i} \cdot x_{ti} / f) / \cos^2\alpha_x$;

$c_2 = (x_{2i} \cdot z_{1i} / f + x_{1i} \cdot \sin\omega_x) / \cos^2\omega_x$;

$c_3 = - z_{1i}$;

$c_4 = 0$;

$c_5 = f / Y_i$;

$c_6 = x_{ti} / Y_i$;

$c_7 = x_{ti} / f - (x_{ti} \cdot \cos\alpha_x - f \cdot \sin\alpha_x) / (f \cdot \cos\alpha_x - x_{2i} \cdot \sin\alpha_x) - (X_i - X_s) / Y_i$;

$d_1 = (x_{2i} \cdot z_{ti} / f + z_{2i} \cdot \sin\alpha_z) / \cos^2\alpha_z$;

$d_2 = (f + z_{2i} \cdot z_{ti} / f) / \cos^2\omega_z$;

$d_3 = x_{1i}$;

$d_4 = f / Y_i$;

$d_5 = 0$;

$d_6 = z_{ti} / Y_i$;

$d_7 = z_{ti} / f - z_{ti} \cdot \cos\alpha_x / (f \cdot \cos\alpha_x - x_{2i} \cdot \sin\alpha_x) - (Z_i - Z_s) / Y_i$.

У формулах використано x_{1i}, z_{1i}, x_{2i}, z_{2i}, x_{ti}, z_{ti} – трансформовані значення виміряної координати точки відповідно на кути χ, ω, α [5].

Значення вільних членів l_{oxi}, l_{ozi} і коефіцієнтів c_i, d_i отримують з рівнянь (1), (3) за наближеними значеннями елементів внутрішнього і зовнішнього орієнтування.

Отже, рівняння похибок (2), складені для *i-x* точок, дають змогу сумісно з елементами внутрішнього і зовнішнього орієнтування фотознімка визначити значення залишкових Δx_i, Δz_i і використати апроксимуючі функції, які характеризують систематичні спотворення [4].

В результаті розв'язування задачі отримуємо значення елементів зовнішнього і внутрішнього орієнтування наземного знімка і таблицю значень систематичних спотворень (Δx_i, Δz_i) в кожній точці фотознімка.

3. Експериментальні дослідження способу. На основі теоретичної моделі (1) виконано дослідження задачі калібрування наземних фотознімків за макетними даними тест-об'єкта.

За розробленою автором комп'ютерною програмою часткового та повного калібрування знімків *наземного фотознімання* передбачено два варіанти розв'язання задачі. В *першому* систематичні похибки (коефіцієнти полінома) визначають сумісно зі знаходженням елементів внутрішнього та зовнішнього орієнтування фотознімків. В *другому* варіанті за обчисленими елементами орієнтування знімка визначають спотворення координат точок фотознімка, які в подальшому апроксимуються поліномом.

Програма обчислення передбачає обробку вимірів як поодиноких знімків, так і стереопар, виміряних на стереокомпараторах.

Умови моделювання макетних знімків:

- розрахунок параметрів калібрування виконано для макетних фотознімків масштабу 1:10000;
- для розрахунків використано значення ЕВнО $f_{мак}$ = 195.151 мм, $x_0 = y_0 = 0.0$;
- кутові ЕЗО відповідають плановому випадку знімання (кути < 1°);
- визначено 10 точок з відомими геодезичними координатами, рівномірно розташованих по площі фотознімка;
- для визначення ЕВнО з точністю m_f=0.005мм різниця висот опорних точок повинна відповідати значенням, наведеним в таблиці [1, 3]:

Кут поля зору камери (2 ω)	Значення $\Delta y_{max} / Y_{сер.}$
75°	≤ 0.5
75–105°	≤ 0.3
105°	≤ 0.2

• за даними ЕВнО, ЕЗО та опорних даних (значення Δy/Y=0,57) розраховано координати точок на знімку.

Для визначення елементів калібрування викладеним способом складено програму мовою FORTRAN і виконані обчислення.

Основним критерієм правильності математичної моделі, алгоритму та програмного забезпечення задачі стало обчислення елементів внутрішнього орієнтування макетних знімків. В результаті виконаних експериментів похибки визначення ЕВнО становлять: $\delta x_0 = \delta z_0 = 3$ мкм, $\delta f = 4$ мкм (значення $f_{обч} = 195.147$ мм), що відповідає спеціальним дослідженням [1, 3].

Висновки. 1. Для розв'язання задачі сформульовано математичну модель (1) фотограмметричного калібрування наземних фотознімків за відомих координат опорних точок.

2. Опрацьовано алгоритм розв'язання задачі калібрування наземних знімків. Виконано розрахунки для макетних знімків.

3. Дослідження підтвердили надійність використання методики для випадку малих кутів (кути < 1°) зовнішнього орієнтування знімків.

4. Результати експериментальних досліджень на макетних знімках підтверджують можливість застосування вказаного способу для калібрування неметричних цифрових камер.

1. Дубиновский В.Б. Калибровка снимков. – М.: Недра, 1982. – 224 с. 2. Дорожинский А.Л. Уравнивание в фотограмметрии с учетом ошибок исходних даных // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. – 1987. – № 45. – С. 131–137. 3. Лаврова Н.П., Стеценко А.Ф. Аэрофотосъемка. Аэрофотосъемочное оборудование: Учеб. для вузов. – М.: Недра, 1981. – 296 с. 4. Шкурченко Ю.В. Калібрування цифрових аерофотознімків з використанням дослідного полігону // Геодезія, картографія, аерофотознімання. – 2003 – Вип. 63. – С. 164–167. 5. Шкурченко Ю.В. Фотограмметричне калібрування знімків при побудові мереж аналітичної фототріангуляції: Дис. ...канд. техн. наук: 05.24.02. – Львів, 2004. – 143 с. – Машинопис.