

КАЛІБРУВАННЯ ЦИФРОВИХ АЕРОФОТОЗНІМКІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ДОСЛІДНОГО ПОЛІГОНУ

© Шкурченко Ю.В., 2003

Представлена математическая модель способа частичной калибровки цифровой аэрофотосистемы с использованием материалов калибровочного полигона. Определены рабочие уравнения решения задачи калибровки. Вычислены параметры калибровки, приведены результаты расчетов. Сделан вывод о возможности применения способа для калибровки цифровых аэрофотосистем.

Mathematical model of the method of partial calibration of digital aerophotosystem with use the materials of the calibration polygon is presented. The working equations of the calibration problem solution are determined. The parameters of calibration have been calculated and shown in the results. There are made the conclusions about possibilities to use the method for digital aerophotosystem calibration.

Вступ

Під калібруванням знімків розуміють визначення елементів внутрішнього орієнтування аерофотокамери і значень систематичних спотворень для ряду точок знімка.

Польові методи калібрування з використанням дослідного полігону дозволяють визначити елементи внутрішнього орієнтування і значення систематичних спотворень в умовах, близьких до умов реального аерофотознімання.

Визначення елементів внутрішнього орієнтування потребує наявності великих перевищень між точками дослідного полігону. Тому, як правило, для метричних цифрових камер виконують так зване часткове калібрування знімків: значення внутрішнього орієнтування визначають в лабораторних умовах, а значення систематичних спотворень в точках аерофотознімків – за аерофотознімками дослідного полігону.

Усі способи подібного калібрування потребують наявності аерофотознімків з опорними точками, координати яких визначаються геодезичними методами з достатньою точністю [1]. Для аналізу ефективності того чи іншого способу калібрування знімків, важливе значення має правильне визначення математичної моделі і справедливості критеріїв оцінки точності рішення.

Представлена робота є продовженням досліджень систематичних спотворень аерознімка, виконаних доцентом Міщенко І.І. [3].

Мета даних досліджень – визначити теоретичну модель способу і виконати розв'язок задачі калібрування цифрових аерофотознімків за даними дослідного полігону, оцінити точність рішення задачі калібрування знімків.

Математична модель способу

В запропонованому для дослідження способі калібрування знімків під систематичною похибкою координат точок аерофотознімка розуміють різницю

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_t - \frac{f}{H_i}(X_{ri} - X_s) \\ \Delta y &= y_t - \frac{f}{H_i}(Y_{ri} - Y_s), \end{aligned} \tag{1}$$

де x_t, y_t – трансформоване значення вимірних координат точки аерофотознімка;
 X_s, Y_s – координати центру проєкції у вибраній абсолютній (зовнішній) системі;
 X_{ri}, Y_{ri} – координати відповідної точки місцевості у згаданій вище системі.

Якщо відомі наближені значення елементів зовнішнього орієнтування аерофотознімків, то виконавши диференціювання виразу (1) по всім змінним, отримаємо рівняння похибок, де невідомими будуть поправки у наближені значення елементів зовнішнього орієнтування і значення систематичних спотворень $\Delta x_i, \Delta y_i$ для кожної точки аерофотознімка.

$$\begin{aligned} a_1\delta\alpha + a_2\delta\omega + a_3\delta\chi + a_4\delta X_s + a_5\delta H_s - \Delta x_i &= v_x \\ b_1\delta\alpha + b_2\delta\omega + b_3\delta\chi + b_4\delta Y_s + b_5\delta H_s - \Delta y_i &= v_y \end{aligned} \tag{2}$$

Склавши вказані рівняння похибок для точок і аерофотознімків, отримаємо систему рівнянь, в результаті рішення якої знаходяться елементи зовнішнього орієнтування аерофотознімків і шукані значення систематичних спотворень в кожній точці аерофотознімка.

При фотограмметричних роботах часто виникає питання про вид функції, яка описує систематичні спотворення аерофотознімків. В запропонованому способі часткового калібрування в якості такої функції прийнято поліном третього ступеня.

$$\begin{aligned} \Delta x &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy + a_5x^2 + a_6x^3 + a_7y^3 + a_8x^2y + a_9xy^2 + a_{10}y^2 \\ \Delta y &= b_1 + b_2x + b_3y + b_4xy + b_5y^2 + b_6x^3 + b_7y^3 + b_8x^2y + b_9xy^2 + b_{10}x^2 \end{aligned} \tag{3}$$

При умові (3) в процесі калібрування замість невідомих $\Delta x_i, \Delta y_i$ будуть визначатись коефіцієнти a_i, b_i апроксимуючого поліному.

Таким чином, особливість даного способу часткового калібрування – визначення коефіцієнтів апроксимуючого поліному замість невідомих значень $\Delta x_i, \Delta y_i$ систематичних спотворень аерофотознімків в i -х точках.

Подібний підхід дозволяє значно зменшити кількість невідомих в системі рівнянь похибок, яка визначається числом елементів зовнішнього орієнтування одиночного аерофотознімка, ступенем апроксимуючого поліному і є постійною для всіх аерофотознімків.

Розв’язок задачі аналітичного калібрування аерофотознімків

Послідовність виконання рішення наступна:

- виконується попередня обробка результатів вимірів, тобто перехід від координатної системи прилада або графічної системи скрану до координатної системи знімка. При цьому за результатами вимірів (к-1)-ї і к-ї стереопари обчислювались вимірні координати точок к-го (центрального) аерофотознімка.
- складаються рівняння похибок;
- виконується перехід до нормальних рівнянь, в результаті рішення яких, отримуємо значення елементів зовнішнього орієнтування аерофотознімка і шукані значення коефіцієнтів a_i, b_i апроксимуючого поліному (3).

Рівняння похибок, які використано, мають вигляд

$$\begin{aligned} a_1\delta\alpha_x + a_2\delta\omega_x + a_3\delta\chi_x + a_4\delta X_s + a_5\delta H_s + a_6x_{ri}^3 + a_7y_{ri}^3 + a_8x_{ri}^2y_{ri} + a_9x_{ri}y_{ri}^2 + a_{10}y_{ri}^2 + l_{ox} &= v_x \\ b_1\delta\alpha_y + b_2\delta\omega_y + b_3\delta\chi_y + b_4\delta Y_s + b_5\delta H_s + b_6x_{ri}^3 + b_7y_{ri}^3 + b_8x_{ri}^2y_{ri} + b_9x_{ri}y_{ri}^2 + b_{10}x_{ri}^2 + l_{oy} &= v_y \end{aligned} \tag{4}$$

$$\text{де } l_{ox} = x_t - \frac{f}{H_i}(X_{ri} - X_s) \quad l_{oy} = y_t - \frac{f}{H_i}(Y_{ri} - Y_s) \tag{5}$$

Значення l_{ox}, l_{oy} і коефіцієнтів a_i, b_i обчислювались за наближеними значеннями елементів зовнішнього орієнтування.

В формулах використано $x_{ri}, y_{ri}; x_{2i}, y_{2i}; x_{ri}, y_{ri}$ – трансформовані значення вимірної координати точки відповідно на кути χ, ω, α .

При виводі рівнянь (4), щоб запобігти поганій обумовленості системи рівнянь, враховано, що $x_1^2 \approx x_2x_1$, $x_1y_1 \approx x_2y_1$...

Знаходження невідомих системи (4) виконано методом послідовних наближень в 2 етапи.

Спочатку визначили тільки елементи зовнішнього орієнтування аерофотознімка, враховуючи, що вплив систематичних спотворень мінімальний, тобто рівняння (4) на I етапі розв'язують при умові $a_{6-10} = b_{6-10} = 0$

$$\begin{aligned} \alpha_x = \alpha_y = \alpha; & \quad \omega_x = \omega_y = \omega; \\ \chi_x = \chi_y = \chi; & \quad H_x = H_y = H. \end{aligned}$$

Процес ітерацій припинявся, коли різниця значень вільних членів l_{oxi} , l_{oyi} з двох послідовних наближень не перевищувала заданого допуску. Зроблено припущення, що отримані при цьому згідно з формулами (5) значення l_{oxi} , l_{oyi} дорівнювали величинам систематичних спотворень Δx_i , Δy_i в i -х точках аерофотознімка, які не компенсувались елементами зовнішнього орієнтування.

На другому етапі рівняння системи (4) розв'язувались окремо по вісям x і y з визначенням всіх невідомих; знайдені на I-му етапі рішення значення α , ω , ..., H приймалися за наближені значення невідомих α_x (α_y), ..., H_x (H_y).

Рівняння похибок (4) складені для n точок, дозволяють сумісно з елементами зовнішнього орієнтування аерофотознімка визначити коефіцієнти апроксимуючих поліномів (3), які характеризують систематичні спотворення 3 порядку.

Хоча запропоновані рівняння не дають можливості визначити для поліномів (3) коефіцієнти, які характеризують спотворення I-го і II-го порядку, непрямий їх вплив враховується. В зв'язку з цим зроблено висновок, що, значення залишкових вільних членів l_{ox} , l_{oy} після рішення рівнянь (4) характеризують точність апроксимації систематичних спотворень аерофотознімків поліномами (3).

Якщо необхідно визначити всі коефіцієнти поліномів (3), то після I-го етапу рішення рівнянь (4), отримані в останній ітерації значення l_{ox} , l_{oy} прирівнюються до Δx_i , Δy_i ; і для кожної i -ї точки аерофотознімка складаються рівняння, аналогічні (3). В результаті рішення отриманої системи рівнянь визначались коефіцієнти a_i , b_i поліномів (3). При цьому знайдені коефіцієнти при членах 1-ї, 2-ї степені поліномів характеризують систематичні спотворення аерофотознімка, які не компенсувались елементами зовнішнього орієнтування.

Експериментальні дослідження способу

Перевірку запропонованого способу проведено на макетних знімках і реальному матеріалі аерофотознімання дослідного полігону.

Для визначення елементів калібрування вказаним способом складено програму на мові Фортран. Відлагодження програми обчислення ЕЗО виконано за макетними знімками масштабу 1:10000 з фокусною віддаллю $f = 75$ мм [2].

Розрахунки параметрів калібрування виконано для реальних фотознімків масштабу 1:5000 з фокусною віддаллю $f = 350$ мм. Вимірювання виконано з точністю 0,01 мм. Виміряно 64 точки, рівномірно розташованих по площі фотознімка.

В результаті рішення задачі на комп'ютері, на друк і в файл видаються: таблиці елементів зовнішнього орієнтування аерофотознімка, таблиці систематичних і залишкових похибок, таблиці коефіцієнтів поліному, які описують систематичні спотворення, значення середньоквадратичних похибок вказаних коефіцієнтів.

Отримано:

Значення елементів зовнішнього орієнтування знімка

α (min)	ω (min)	χ (min)	x_s (m)	y_s (m)	H_s (m)
-17.972	14.790	980.166	9849.168	9385.717	1780.448

Значення коефіцієнтів поліному рівнянь (4) дорівнюють

a_{6-10}	-0.23573E-07	-0.16989E-07	0.28850E-08	0.78511E-08	0.16204E-06
b_{6-10}	-0.15708E-07	0.49404E-07	0.18231E-07	0.56589E-08	-0.10208E-05

У випадку апроксимації за поліномом (3) визначено коефіцієнти

a_{1-5}	-0.17679E-02	0.17311E-03	0.17276E-03	0.75011E-06	0.75907E-06
a_{6-10}	-0.23580E-07	-0.17115E-07	0.28335E-08	0.77984E-08	0.16116E-06
b_{1-5}	0.27955E-02	0.16744E-03	-0.30807E-03	-0.10994E-05	-0.51900E-06
b_{6-10}	-0.15695E-07	0.49476E-07	0.18268E-07	0.57111E-08	-0.10172E-05

Середні квадратичні значення систематичних похибок (Δx , Δy) аерофотознімка після першого етапу рішення дорівнювали:

$$m_{x_c} = 0.010 \text{ мм} \qquad m_{y_c} = 0.011 \text{ мм.}$$

Середні квадратичні значення залишкових похибок (δx , δy) після апроксимації поліномом дорівнювали:

$$m_{x_z} = 0.007 \text{ мм} \qquad m_{y_z} = 0.007 \text{ мм.}$$

Середні квадратичні похибки визначення параметрів калібрування (коефіцієнтів поліному) були вираховані за ваговими коефіцієнтами.

Висновки

1. В загальному, сформульовано математичну модель способу часткового калібрування цифрових фотознімків з використанням дослідного полігону (тест-об'єкту).
2. Визначено алгоритм рішення задачі калібрування . Виконано розрахунки для аерофотознімків дослідного полігону.
3. Результати теоретичних і експериментальних досліджень підтверджують можливість застосування вказаного методу для проведення часткового калібрування цифрових аерофотосистем.

Література

1. Дубиновский В.Б. Калибровка снимков.— М., Недра. 1982.
2. Лобанов А.Н., Дубиновский В.Б. Аналитические модели местности и снимков.—М., Недра, 1980.
3. Мищенко И.И. К вопросу учета систематических ошибок аероснимка. Сб. "Фотограмметрия в горн. деле". Вып.1. – Свердловск . 1974.