

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ФОКУСНОЇ ВІДСТАНІ ЦИФРОВИХ ФОТОТЕОДОЛІТНИХ КАМЕР

© Глотов В., 2003

В статье приводятся особенности определения элементов внутреннего ориентирования цифровых съёмочных камер. Дан анализ способов определения фокусных расстояний цифровых камер и определения их необходимой точности. Делаются соответствующие выводы относительно целесообразности выбора методов определения элементов внутреннего ориентирования цифровых камер.

The peculiarities of determination of the inner orientation elements of the digital surveying cameras are presented in the paper. The analysis of the methods of the determination of camera focal distances and its necessary accuracy is shown. The corresponding conclusions about appropriateness of choice of methods of digital surveying cameras inner orientation elements are done.

В теперішній час у фотограмметричному виробництві, а в особливості у фототеодолітному зніманні, відбулися суттєві зміни у виконанні як польових, так і камеральних робіт. Це в першу чергу пов'язано з впровадженням цифрових методів, які докорінно змінили приладний парк та технологічні схеми створення планів та карт стереофотограмметричним методом. Випускаються і створюються цифрові фототеодолітні знімальні системи не тільки на базі метричних, але і неметричних камер [1].

В той час, коли почали застосовуватись фотографічні неметричні камери, виникала проблема пов'язана з аберацією зображень. При застосуванні цифрових камер відпала ціла низка похибок, що були притаманні фототеодолітам, а саме непритискання фототеодолітних платівок до прикладної рамки камери, деформація фотоматеріалів тощо. Всі ці фактори безумовно суттєво підвищили точність визначення координат точок об'єктів, що визначаються. Однак, поява цифрових знімальних камер виявила не тільки багато спрощень у всіх видах робіт, але і немало проблем, що вимагають розв'язання. Одною з таких проблем є визначення фокусної відстані знімальних камер. По-перше, фокусна відстань камери, що приводиться або на фокаторі, або у технічному паспорті відповідає розміру тільки ПЗЗ-матриці, а не розміру кадру, що буде опрацьовуватись на ЦФС. По-друге, зміна фокусної відстані на фокаторі безумовно викликати зміню еквівалентної фокусної відстані та буде мінятися, як вже відмічалось вище, від розміру кадру. Зазвичай фірми, які випускають знімальні камери, не подають у технічних характеристиках з необхідною точністю розміри ПЗЗ-матриці, або розміри комірки. Таким чином практично отримати дійсне значення фокусної відстані стає неможливим.

Окрім цього постає питання визначення точності елементів внутрішнього орієнтування знімальних камер. Основною метою при рішенні багатьох фотограмметричних задач є отримання координат точок місцевості або в фотограмметричній, або в геодезичній системі координат. Таким чином розрахунок

необхідної точності обчислення ЕвНО правомірно буде виконуватись, виходячи з формул, що встановлюють зв'язок між координатами точок місцевості та знімка. При чому, так як річ йде про високоточні вимірювання, а також знімання віддалених об'єктів, необхідно розглядати загальний випадок знімання без яких-небудь спрощень. З цією метою скористуємось формулами [2].

Визначив з першої формули f , маємо[3]:

$$f(x) = \frac{X(b_1x + b_3z) - Y(a_1x + a_3z)}{Ya_2 - Xb_2} \quad (1)$$

Враховуючи значення похідних, отримаємо:

$$\begin{aligned} m_{f(x)} = & \left(\frac{Ya_2(b_1x + b_3z) - Yb_2(a_1x + a_3z)}{(Ya_2 - Xb_2)^2} \right)^2 m_x^2 + \left(\frac{Xb_2(a_1x + a_3z) - Xa_2(b_1x + b_3z)}{(Ya_2 - Xb_2)^2} \right)^2 m_y^2 + \\ & + \left(\frac{Xb_1 - Ya_1}{Ya_2 - Xb_2} \right)^2 m_x^2 + \left(\frac{Xb_3 - Ya_3}{Ya_2 - Xb_2} \right)^2 m_z^2 + \left(\frac{(X^2 + Y^2)[x(b_2a_1 - b_1a_2) + z(a_3b_2 - a_2b_3)]}{(Ya_2 - Xb_2)^2} \right)^2 m_a^2 + \\ & + \left(\frac{(Y \sin \alpha - X \cos \alpha)[(xc_1 + zc_3)(Ya_2 - Xb_2) + c_2(X(b_1x + b_3z) - Y(a_1x + a_3z))]}{(Ya_2 - Xb_2)^2} \right)^2 m_\omega^2 + \\ & + \left(\frac{X(xb_3 - zb_1) - Y(xa_3 - za_1)}{Ya_2 - Xb_2} \right)^2 m_x^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Перейдемо тепер до визначення m_f через друге рівняння :

$$f(z) = \frac{Z(b_1x + b_3z) - Y(c_1x + c_3z)}{Yc_2 - Zb_2} \quad (3)$$

Враховуючи значення похідних, отримуємо:

$$\begin{aligned} m_{f(z)} = & \left(\frac{Zb_2(c_1x + c_3z) - Zc_2(b_1x + b_3z)}{(Yc_2 - Zb_2)^2} \right)^2 m_y^2 + \left(\frac{Yc_2(b_1x + b_3z) - Yb_2(c_1x + c_3z)}{(Yc_2 - Zb_2)^2} \right)^2 m_z^2 + \\ & + \left(\frac{Zb_1 - Yc_1}{Yc_2 - Zb_2} \right)^2 m_x^2 + \left(\frac{Zb_3 - Yc_3}{Yc_2 - Zb_2} \right)^2 m_z^2 + \left(\frac{YZc_1x + c_3z - Z(a_1x - a_3z)(Yc_2 - Zb_2) - Z^2a_2(b_1x + b_3z)}{(Yc_2 - Zb_2)^2} \right)^2 m_a^2 + \\ & + \left(\frac{(Yc_2 - Zb_2)(x \sin \chi + z \cos \chi) - (Y \cos \omega + Zc_2 \cos \omega)(Z(b_1x + b_3z) - Y(c_1x + c_3z))}{(Yc_2 - Zb_2)^2} \right)^2 m_\omega^2 + \\ & + \left(\frac{Z(b_3x - b_1z) + Y(c_1z - c_3x)}{Yc_2 - Zb_2} \right)^2 m_x^2 \end{aligned} \quad (4)$$

Підраховуємо за формулами (2)-(4) значення m_f для цифрової камери Olympus E20P з еквівалентним фокусом 85 мм для розміру кадру 83x62,25 мм, для відстані 1000 м, середньоквадратичних похибок координат на місцевості 0,1 м, з розрахунку, що отримане зображення буде оброблятися на ЦФС "Дельта-2". Середньоквадратичні похибки кутових елементів складають 3" [4]. Тоді $m_{f(x)}=0.02$ мм, $m_{f(z)}=0.03$ мм.

Як видно з наведених методів, для подальшого опрацювання знімальних матеріалів необхідно знати фокусну відстань камери в межах 10-20 мкм.

Тепер перейдемо до аналізу способів визначення фокусних відстаней фототеодолітних камер та можливості застосування їх для цифрових камер.

Фотограмметричний метод заснований на вимірюванні кутів вибраних напрямків та фотографуванні даної ділянки місцевості з наступним вимірюванням координат точок на фотограмметричних аналітичних приладах. Робочі формули методу (33 с. 32)

$$\begin{aligned} f &= \Delta \times \operatorname{tge}, \\ x_0 &= x_i - \Delta, \\ z_0 &= z_i - \frac{f}{\cos \varepsilon} \operatorname{tg} \beta_i, \end{aligned} \quad (5)$$

де Δ - відстань від проекції точки S на вісь x до точки o ;
 ε - кут між вищевказаною проекцією та головним променем;
 β_i - вертикальний кут на i -ту точку;
 x_i, z_i - координати точки, виміряні на знімку.

Величини Δ, ε є допоміжними і визначаються з наступних співвідношень:

$$\Delta = d'(\operatorname{ctg}\psi' \operatorname{ctg}\varepsilon - 1) \sin^2 \varepsilon, \quad (6)$$

$$\operatorname{ctg}\varepsilon = \frac{d + d'}{d' \operatorname{ctg}\psi' - d \operatorname{ctg}\psi},$$

де d, d' - горизонтальні відстані між проекціями вибраних точок на головну горизонталь;
 ψ, ψ' - горизонтальні кути при точці фотографування S між напрямками на вибрані точки.

Враховуючи значення похідних і вважаючи, що $m_\psi = m_{\psi'}, m_d = m_{d'}$, отримаємо

$$m_f = \left(\left(\frac{m(p^2 + n^2)(np + dd'(\operatorname{ctg}\psi' - \operatorname{ctg}\psi))}{(p^2 + n^2)^2} - \frac{dd'mn(4p + 2n(\operatorname{ctg}\psi \operatorname{ctg}\psi'))}{(p^2 + n^2)^2} \right)^2 m_d^2 + \right. \\ \left. + \left(\frac{dd'(p^2 + n^2) \left(\frac{n + 2d \operatorname{ctg}\psi}{\sin^2 \psi} - \frac{n + d'm}{\sin^2 \psi'} \right) - 2dd'mn^2 \left(\frac{d}{\sin^2 \psi} - \frac{d'}{\sin^2 \psi'} \right)}{(p^2 + n^2)^2} \right)^2 m_\psi^2 \right)^{1/2} \quad (7)$$

$$m_{x_0} = \left(m_{xi}^2 + \left(\frac{d'((p \operatorname{ctg}^2 \psi - 5n \operatorname{ctg} \psi)(n^2 - p^2) - 2pn^2)}{(p^2 + n^2)^2} \right)^2 m_d^2 + \right. \\ \left. + \left(\frac{nd'(2n \operatorname{ctg} \psi + 2p)(\operatorname{ctg} \psi p - n) - ((\operatorname{ctg} \psi p - n)(n + d' \operatorname{ctg} \psi') + d'(\operatorname{ctg} \psi - \operatorname{ctg} \psi'))(n^2 + p^2)}{(n^2 + p^2)^2} \right)^2 m_d^2 + \right. \\ \left. + \left(\frac{d'(n(p + d) - d(p \operatorname{ctg} \psi - n)(n^2 + p^2)) + 2n^2 dd'(p \operatorname{ctg} \psi - n)}{\sin^2 \psi (n^2 + p^2)^2} \right)^2 m_\psi^2 + \right. \\ \left. + \left(\frac{d'(n^2 + p^2)(p \operatorname{ctg} \psi - 2n) - 2n^2 d'^2 (p \operatorname{ctg} \psi - n)^2}{\sin^2 \psi (n^2 + p^2)^2} \right)^2 m_\psi^2 \right)^{1/2}; \quad (8)$$

$$m_{z_0} = \left(m_{zi}^2 + \left(\frac{(n^2 + p^2)^{1/2} \operatorname{tg} \beta}{p} \right)^2 m_f^2 + \left(\frac{f^2 (n^2 + p^2)^{1/2}}{p \cos^2 \beta} \right)^2 m_\beta^2 + \right. \\ \left. + \left(\frac{f \cdot n \cdot \operatorname{tg} \beta (2n + p \operatorname{ctg} \psi - p \operatorname{ctg} \psi')}{p^2 (p^2 + n^2)^{1/2}} \right)^2 m_d^2 + \left(\frac{f \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot n \left(\frac{d}{\sin^2 \psi} + \frac{d'}{\sin^2 \psi'} \right)}{p (n^2 + p^2)^{1/2}} \right)^2 m_\psi^2 \right)^{1/2} \quad (9)$$

Підрахуємо точність отримання ЕвНО даним методом для камери з фокусною відстанню 200 мм. З цією метою використаємо значення, представлені в [2]. Тоді за формулами (7)-(9) маємо $m_f = 0.06$ мм, $m_{x_0} = 0.09$ мм, $m_{z_0} = 0.01$ мм.

Проте дані значення не відповідають реальній точності, так як тут не враховується вплив помилок елементів зовнішнього орієнтування. Так, наприклад, відносно величини z_0 слід помітити, що фактично $z'_0 = z_0 + f\Delta\omega$. Тому остаточна оцінка точності величини z_0 може бути зроблена тільки в тому випадку, коли відомі похибки величини ω . Припустимо, що похибка в нахилі фототеодоліта рівна $10'$, тоді похибка z_0 буде ± 0.06 мм.

Професором Урмаєвим Н.А. був запропонований спосіб, який частково виключає вплив помилок зовнішнього орієнтування. Проте при визначенні елементів внутрішнього орієнтування помічено, що послідовні визначення величин x_0, z_0 , виконані на одній і тій же точці стояння, відрізняються між собою на величини порядку 0.1 мм, в той час як виміри розходяться тільки в сотих долях міліметра. Ймовірно, що це слід пояснити неповністю виключеним впливом величин α, ω .

Визначення елементів внутрішнього орієнтування фотокамери за знімками зірок в теперішній час отримало широке використання, тому що дає можливість отримувати не тільки ЕВНО, але і дисторсію фотокамери.

До основних джерел помилок даного способу відносять наступні фактори:

- а) помилки фотографічного процесу: деформація фотоматеріалу та відступ останнього від площини в момент експозицій;
- б) невідповідність спектрального складу світла при дослідженні спектрального світла при експлуатації камери;
- в) помилки виміру координат зображень зірок;
- г) вплив атмосферної рефракції на геометрію побудови зображення;
- д) паралакс, диференційна річна аберація зірок;
- е) вплив процесії та нутації Землі;
- ж) рівняння яскравості;
- з) помилки опізнавання та помилки каталогових координат зірок.

З перерахованих факторів помилки фотографічного процесу надають найбільший вплив на точність визначення параметрів.

Крім цього, застосування даного методу в фототопографії є практично неможливим без додаткового устаткування, так як в технологічній схемі визначення координат точок віддалених об'єктів використовуються фотопластинки з великою роздільною здатністю, що відповідає малій світлочутливості (2-5 од. ГОСТа), а це в свою чергу не дає можливості виконати знімання зірок таким чином, щоб вони відобразилися точками.

Перейдемо до розгляду точності фотограмметричних способів, що засновані на використанні двох знімків. Один з них запропонований А.Н. Лобановим та М.Н. Ютановим. На відміну від розглянутих вище, при цьому способі не потрібно виконувати кутові вимірювання. Тут фокусна відстань фотокамери та координати головної точки знімка можна знайти за двома знімками, що перекриваються, отриманих з однієї точки.

В той самий час в способі допускається цілий ряд спрощень, що негативно впливає на точність визначення ЕВНО. Так, наприклад, допускається, що дисторсія об'єктива та похибки встановлення елементів зовнішнього орієнтування малі і не мають практичного значення, а кут між двома знімками встановлюється за допомогою орієнтуючого пристрою, що безумовно на сучасному етапі вимог до входних вимірів приведе до значного зниження точності ЕВНО. Середньоквадратична помилка визначення фокусної відстані буде мати вигляд

$$m_f = \left((m_{x_1}^2 + m_{x_0}^2) \operatorname{ctg}^2 \lambda + (x'_1 - x_0) \frac{m_{x_1}^2}{\sin^4 \lambda} \right)^{1/2} \quad (10)$$

Припустимо, що $m_x = 0.004$ мм, $m_{x_0} = 0.12$ мм, $x = 80$ мм, $x_0 = 0.10$ мм, $\lambda = 15^\circ$ для камери з $f = 300$ мм, тоді маємо $m_f = 0.45$ мм.

М.Н. Ютанов припустив використовувати на знімках, що перекриваються, чотири точки для визначення фокусної відстані та координати x_0 головної точки.

При форматі знімка 18*13 см можна рахувати, що $x_{\max} = 80$ мм, якщо $f = 200$ мм, $\alpha = 37$ мм (півсумма відрізків на знімках між відповідними точками), $p = 3$ мм (також півсумма відповідних відрізків на знімках), то середньоквадратичну помилку визначення фокусної відстані можна підрахувати за формулою

$$m_f = \sqrt{\frac{\left(\frac{6}{p}a^2 + 2a\right)^2 m_a^2 + \frac{4a^6}{p^4} m_p^2}{2\left(\frac{2a^3}{p} + a\right)}}, \quad (11)$$

де m_a, m_p - середньоквадратичні помилки вимірів величин α та p .

Нехай $m_a = m_p = 0.01$ мм. Тоді $m_f = 0.43$ мм.

Виконавши дослідження основних методів визначення фототеодолітних камер, можна зробити наступні висновки:

Фотограмметричні способи (обробка поодинокого знімка), що засновані на тригонометричному методі, по характеристикам точності, в принципі, повинні відповідати гоніометричним способам. Проте, як вже неодноразово відмічалось, вплив помилок елементів зовнішнього орієнтування знижує точність визначення ЕВНО в 2-5 разів. Крім цього, на точність визначення ЕВНО впливають помилки виміру координат точок знімка.

Способи, що засновані на визначенні ЕВНО за двома знімками, за технологічними особливостями не відповідають розрахунковій точності.

З приведених способів видно, що, нажаль, високоточні камеральні способи, які засновані на гоніометричному принципі, неможливо застосувати для визначення фокусних відстаней цифрових камер у зв'язку з відсутністю прямого спостереження у фокальній площині. В той же час польові фотограмметричні способи за технологією опосередковано визначають фокусну відстань, а тому виникає можливість використовувати їх з метою розв'язування поставленої задачі.

Для прикладу приведемо визначення фокусної відстані цифрової камери Olympus E20P, яка входить у склад цифрового фототеодоліта, що представлена в таблиці.

Визначення еквівалентних ЕВНО цифрової камери Olympus E20P

Елементи	160*160	83*62.24
$d = x_b - x_a$	51.2344	26.598
$d' = x_c - x_b$	58.8399	30.558
$d + d'$	110.0743	57.156
$\text{Ctg} \psi$	3.22212595	
$\text{ctg} \psi'$	2.7924652158	
$d' \text{ctg} \psi'$	164.30837	85.332151
$d \text{ctg} \psi$	165.08368	85.702104
$d' \text{ctg} \psi' - d \text{ctg} \psi$	-0.77531	-0.369953
$\text{tg} \varepsilon$	-0.0070435	-0.0064726
$(d' \text{ctg} \psi') \varepsilon$	-1.157306	-0.552287
$-\varepsilon^2 d'$	-0.003118	-0.0012773
Δ	-1.160424	-0.5535643
$(d \text{ctg} \psi) \varepsilon$	-1.1627669	-0.5547154
$+\varepsilon^2 d$	0.0025412	0.0011117
Δ	-1.1602157	-0.5533598
$x_0 = x_b - \Delta$	+1.3750	+0.644
$d' + \Delta$	57.679685	30.0047
$\psi + \varepsilon$	19°18'03"	
$\text{ctg}(\psi + \varepsilon)$	2.855	
f	164.6755	85.663
$d - \Delta$	52.394615	27.1513
$\text{ctg}(\psi - \varepsilon)$	3.146	
f	164.8334	85.4179
f_{cp}	164.754	85.54049
k	1.02977	1.030608

Аналізуючи результати наведені у таблиці необхідно відмітити, що є постійна залежність між розміром кадру (в даному випадку вибиралася довжина L_x) та фокусною відстанню F_f . Таким чином зафіксувавши положення фокатора та вибравши розмір кадру (у нашому випадку 90 мм) можливо визначити фокусну відстань для цього формату за формулою

$$F_f = L_x \times K, \quad (12)$$

де K - коефіцієнт переходу від дійсної фокусної відстані до еквівалентної;

F_f - еквівалентна фокусна відстань.

Звичайно при зміні F_f буде змінюватися величина K , тому необхідно заздалегідь визначити ці коефіцієнти при необхідних положеннях знімання для фокусних відстаней вищезгаданим способом.

Висновки.

Визначення фокусної відстані цифрових камер та дисторсії об'єктива виконувати за технологіями [2,5].

Перед виконанням фототеодолітних робіт необхідно встановити на фокаторі відповідну реальну фокусну відстань, після чого задати розміри кадру і розрахувати еквівалентну фокусну відстань.

Для робочого діапазону фокусних відстаней необхідно визначити еквівалентні фокусні відстані.

Необхідно розробити більш точніший спосіб визначення ЕВНО цифрових камер.

Література

1. Глотов В.М. Розробка та дослідження фототеодоліта на базі цифрової камери Kodak DC260 та оптичного теодоліта Theo-010B.// Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища GPS і GIS-технології.- 2000.-С.5-9
2. Лобанов А.Н. Фототопография.// М., "Недра"-1983
3. Глотов В.М. Разработка и исследование способов определения элементов внутреннего ориентирования фототеодолитных камер.//Диссертация ... канд. техн. наук. Львов-1990
4. Смирнов Е.И. Разработка и исследование способа обработки фототеодолитной съемки и применение его в маркшейдерском деле.//Диссертация ... канд. техн. наук. Львов-1989
5. Глотов В.М., Майоров Г.Е. Аналіз метричних властивостей цифрових знімальних систем.//Геодезія, картографія і аерознімання.-2000.-Вип.60.-С.102-106