

ОЦІНКА ТОЧНІСНИХ ВИМОГ ДО СИСТЕМ НАВІГАЦІЇ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ КООРДИНАТ ТОЧОК МІСЦЕВОСТІ ФОТОГРАММЕТРИЧНИМ КОМПЛЕКСОМ

© Смірнов Є.І., 2012

Получены формулы для априорной оценки точности наземной съёмки с движущихся носителей.

Formulas for the a priori estimate of the accuracy of ground survey with the moving carrier.

Постановка проблеми. Застосування наземного фототеодолітного знімання можливе не лише зі стаціонарних базисів, що розташовані на землі, а й у випадках коли камера переміщується (наприклад, знімання з човнів або автомобілів).

Використання цього методу дає змогу оперативно виконувати різноманітні завдання, особливо у разі застосування цих матеріалів у ГІС-технологіях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У фаховій літературі достатньо повно розкриті питання наземного знімання з рухомих носіїв. У праці [5] пропонується знімання з рухомого базису. Комплекс складається з цифрової камери та GPS-системи.

Дослідження [1] показало, що цей метод дає змогу опрацьовувати матеріали знімання берегової смуги, які отримані з рухомого човна.

У роботі [1] розкриті питання щодо точності визначення координат точок, але залишається невирішеним питання точності визначення координат точок знімання.

Виклад основного матеріалу. Розташуємо на наземному рухомому об'єкті, який оснащено системою навігації, апаратуру для здійснення фотограмметричного знімання місцевості з метою визначення координат окремих точок.

Будемо з визначеним інтервалом фотографувати місцевість. Розглянемо два послідовних знімки як стереопару. Схематично це зображено на рисунку.

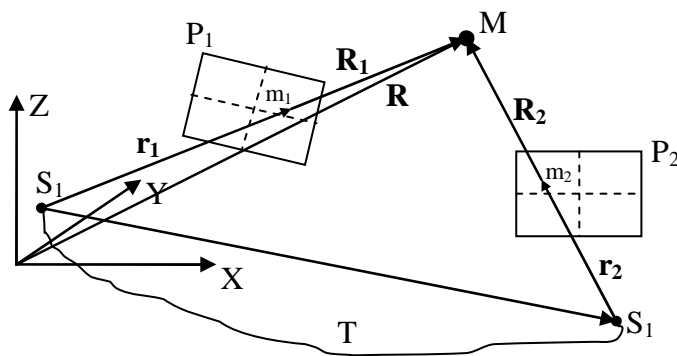


Схема розташування точок знімання та точок місцевості: T – траєкторія руху наземного рухомого об'єкта; S₁, S₂ – точки знімання, M – точка місцевості; P₁, P₂ – пара знімків; m₁, m₂ – зображення точки M на знімках; R – утворюючий вектор точки M в загальній системі координат; R₁, R₂ – утворюючі вектори точки M в системах координат відповідно лівого та правого знімків

Залежність між просторовими координатами точки M і її відображеннями на знімках у векторній формі має вигляд [2; 4]:

$$R = R_{S_1} + Nr_1. \quad (1)$$

У координатній формі цей вираз має такий вигляд:

$$\begin{aligned}
X &= X_S + NX_P, \\
Y &= Y_S + NY_P, \\
Z &= Z_S + NZ_P,
\end{aligned} \tag{2}$$

де $N = \frac{B_X(Y_2 - Z_2) + B_Y(Z_2 - X_2) + B_Z(X_2 - Y_2)}{X_1(Y_2 - Z_2) + Y_1(Z_2 - X_2) + Z_1(X_2 - Y_2)} \approx \frac{B_X Y_2 - B_Y X_2}{X_1 Y_2 - Y_1 X_2},$

а X_1, Y_1, Z_1 та X_2, Y_2, Z_2 – координати точок m_1 та m_2 в системах $S_1(XYZ)$ і $S_2(XYZ)$ відповідно і $B_X = X_{S2} - X_{S1}, B_Y = Y_{S2} - Y_{S1}, B_Z = Z_{S2} - Z_{S1}.$

Знайдемо оцінку точності визначення координат точок місцевості, а саме $m_R = \{m_X, m_Y, m_Z\},$ які зумовлені похибками елементів орієнтування знімків. Користуючись відомим співвідношенням [2;3]:

$$\Phi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \varepsilon_i} \right)^2 m_i^2, \tag{3}$$

де Φ – функція багатьох аргументів, ε_i – аргумент функції, m_i – середня квадратична помилка аргументу, n – кількість аргументів.

Застосуємо (3) до рівняння (1), що записане у скалярному вигляді, тоді одержимо

$$\begin{aligned}
X' &= NX_P' + \frac{A'B - AB'}{B^2} X_P = NX_P' + \frac{A'}{B} X_1 - \frac{NX_1}{B}, \\
Y' &= NY_P' + \frac{A'B - AB'}{B^2} Y_P = NY_P' + \frac{A'}{B} Y_1 - \frac{NY_1}{B}, \\
Z' &= NZ_P' + \frac{A'B - AB'}{B^2} Z_P = NZ_P' + \frac{A'}{B} Z_1 - \frac{NZ_1}{B},
\end{aligned} \tag{4}$$

де $A = B_X Y_2 - B_Y X_2,$
 $B = X_1 Y_2 - Y_1 X_2.$

Розрахуємо складову виразу (3) за аргументом $\alpha_1,$ тоді

$$\begin{aligned}
\frac{\partial X_i}{\partial \alpha_i} &= b_{i1} x_i + b_{i2} f + b_{i3} z_i = Y_i, & \frac{\partial X_2}{\partial \alpha_1} &= 0, \\
\frac{\partial Y_i}{\partial \alpha_i} &= -a_{i1} x_i - a_{i2} f - a_{i3} z_i = -X_i, & \frac{\partial Y_2}{\partial \alpha_1} &= 0, \\
\frac{\partial Z_1}{\partial \alpha_1} &= 0, & \frac{\partial Z_2}{\partial \alpha_1} &= 0.
\end{aligned} \tag{5}$$

Підставляючи (5) у формули (4) отримаємо

$$\begin{aligned}
\frac{\partial X}{\partial \alpha_1} &= (Y - Y_{S1}) + \frac{(X - X_{S1}) \cdot (Y_1 Y_2 + X_1 X_2)}{X_1 Y_2 - Y_1 X_2}, \\
\frac{\partial Y}{\partial \alpha_1} &= (X - X_{S1}) + \frac{(Y - Y_{S1}) \cdot (Y_1 Y_2 + X_1 X_2)}{X_1 Y_2 - Y_1 X_2}, \\
\frac{\partial Z}{\partial \alpha_1} &= \frac{(Z - Z_{S1}) \cdot (Y_1 Y_2 + X_1 X_2)}{X_1 Y_2 - Y_1 X_2}.
\end{aligned} \tag{6}$$

Для апіорної оцінки точності достатньо врахувати похибки першої величини малізні, тоді $X_i = x_i$, $Y_i = f$, $Z_i = z_i$.

Враховуючи це та обмежуючись першою величиною малізні, вирази (6) набудуть вигляду

$$\begin{aligned}\frac{\partial X}{\partial \alpha_1} &= (Y - Y_{S1}) - \frac{(X - X_{S1}) \cdot (f^2 + x_1 x_2)}{fp}, \\ \frac{\partial Y}{\partial \alpha_1} &= (X - X_{S1}) + \frac{(Y - Y_{S1}) \cdot (f^2 + x_1 x_2)}{fp}, \\ \frac{\partial Z}{\partial \alpha_1} &= \frac{(Z - Z_{S1}) \cdot (f^2 + x_1 x_2)}{fp}.\end{aligned}\quad (7)$$

де $p = x_1 - x_2$.

Аналогічні формули знайдемо для похідних, що зумовлені іншими кутowymi елементами зовнішнього орієнтування:

$$\begin{aligned}\frac{\partial X}{\partial \omega_1} &= \frac{(X - X_{S1}) z_1 x_2}{fp}, \quad \frac{\partial Y}{\partial \omega_1} = (Z - Z_{S1}) + \frac{(Y - Y_{S1}) z_1 x_2}{fp}, \quad \frac{\partial Z}{\partial \omega_1} = Nf - \frac{(Z - Z_{S1}) z_1 x_2}{fp}, \\ \frac{\partial X}{\partial \kappa_1} &= Nz_1 + \frac{(X - X_{S1}) q}{p}, \quad \frac{\partial Y}{\partial \kappa_1} = -\frac{Y - Y_{S1}}{p}, \quad \frac{\partial Z}{\partial \kappa_1} = Nx_1 - \frac{(Z - Z_{S1}) q}{p}, \\ \frac{\partial X}{\partial \alpha_2} &= \frac{(X - X_{S1}) \cdot (f^2 + x_1 x_2) - (B_X x_2 + B_Y f) x_1}{fp}, \\ \frac{\partial Y}{\partial \alpha_2} &= \frac{(Y - Y_{S1}) \cdot (f^2 + x_1 x_2) + (B_X x_2 + B_Y f) f}{fp}, \\ \frac{\partial Z}{\partial \alpha_2} &= \frac{(Z - Z_{S1}) \cdot (f^2 + x_1 x_2) - (B_X x_2 + B_Y f) z_1}{fp}, \\ \frac{\partial X}{\partial \omega_2} &= \frac{(X - X_{S2}) x_1 z_2}{fp}, \quad \frac{\partial Y}{\partial \omega_2} = \frac{((X - X_{S1}) x_1 - B_X f) z_2}{fp}, \quad \frac{\partial Z}{\partial \omega_2} = \frac{((X - X_{S1}) x_1 - B_X z_2) z_2}{fp}, \\ \frac{\partial X}{\partial \kappa_2} &= \frac{(B_Y x_1 - (X - X_{S1}) f) z_2}{fp}, \quad \frac{\partial Y}{\partial \kappa_2} = -\frac{(Y - Y_{S2}) z_2}{p}, \quad \frac{\partial Z}{\partial \kappa_2} = \frac{(B_Y z_1 - (Z - Z_{S1}) f) z_2}{fp}.\end{aligned}\quad (8)$$

Для середніх квадратичних помилок, що зумовлені лінійними елементами зовнішнього орієнтування, формули мають вигляд

$$\begin{aligned}\frac{\partial X}{\partial X_{S1}} &= \frac{\partial Y}{\partial Y_{S1}} = \frac{\partial Z}{\partial Z_{S1}} = 1, \\ \frac{\partial X}{\partial Y_{S1}} &= \frac{\partial X}{\partial Z_{S1}} = \frac{\partial Y}{\partial X_{S1}} = \frac{\partial Y}{\partial Z_{S1}} = \frac{\partial Z}{\partial X_{S1}} = \frac{\partial Z}{\partial Y_{S1}} = 0.\end{aligned}\quad (9)$$

Підставляючи вирази (7), (8) та (9) у формулу (3), отримаємо

$$\begin{aligned}
m_X^2 &= m_{XS1}^2 + \left((Y - Y_{S1}) - \frac{(X - X_{S1}) \cdot (f^2 + x_1 x_2)}{fp} \right)^2 m_{\alpha 1} + \left(\frac{(X - X_{S1}) z_1 x_2}{fp} \right)^2 m_{\omega 1}^2 + \\
&+ \left(Nz_1 + \frac{(X - X_{S1}) q}{p} \right)^2 m_{\kappa 1}^2 + \left(\frac{(X - X_{S1}) \cdot (f^2 + x_1 x_2) - (B_X x_2 + B_Y f) x_1}{fp} \right)^2 m_{\alpha 2}^2 + \\
&+ \left(\frac{(X - X_{S2}) x_1 z_2}{fp} \right)^2 m_{\omega 2}^2 + \left(\frac{(B_Y x_1 - (X - X_{S1}) f) z_2}{fp} \right)^2 m_{\kappa 2}^2, \\
m_Z^2 &= m_{ZS1}^2 + \left(\frac{(Z - Z_{S1}) \cdot (f^2 + x_1 x_2)}{fp} \right)^2 m_{\alpha 1}^2 + \left(Nf - \frac{(Z - Z_{S1}) z_1 x_2}{fp} \right)^2 m_{\omega 1}^2 + \left(\frac{(Z - Z_{S1}) q}{p} \right)^2 m_{\kappa 1}^2 + \\
&+ \left(\frac{(Z - Z_{S1}) \cdot (f^2 + x_1 x_2) - (B_X x_2 + B_Y f) z_1}{fp} \right)^2 m_{\alpha 2}^2 + \left(\frac{((X - X_{S1}) x_1 - B_X z_2) z_2}{fp} \right)^2 m_{\omega 2}^2 + \\
&+ \left(\frac{(B_Y z_1 - (Z - Z_{S1}) f) z_2}{fp} \right)^2 m_{\kappa 2}^2.
\end{aligned} \tag{10}$$

Для апіорної оцінки точності використаємо наближені формули (10). Тобто прийнемо кутові елементи зовнішнього орієнтування такими, що дорівнюють нулю і позначимо $M_p = \frac{B}{p}$, тоді:

$$\begin{aligned}
m_X^2 &= m_{XS}^2 + M_p^2 \left(\left(f - \frac{x_1 (f^2 + x_1 x_2)}{fp} \right)^2 m_{\alpha 1}^2 + \left(\frac{x_1 x_2 z}{fp} \right)^2 m_{\omega 1}^2 + z^2 m_{\kappa 1}^2 + \right. \\
&\left. + \left(\frac{x_1 (f^2 + x_1 x_2)}{fp} - \frac{x_1 x_2}{f} \right)^2 m_{\alpha 2}^2 + \left(\frac{x_1^2 z}{fp} \right)^2 m_{\omega 2}^2 + \left(\frac{x_1 z}{p} \right)^2 m_{\kappa 2}^2 \right), \\
m_Y^2 &= m_{YS}^2 + M_p^2 \left(\left(x_1 + \frac{(f^2 + x_1 x_2)}{p} \right)^2 m_{\alpha 1}^2 + \left(z + \frac{Bz x_2}{p^2} \right)^2 m_{\omega 1}^2 + z^2 m_{\kappa 1}^2 + \right. \\
&\left. + \left(\frac{(f^2 + x_1 x_2)}{p} - x_2 \right)^2 m_{\alpha 2}^2 + \left(\frac{x_1^2 z}{fp} - z \right)^2 m_{\omega 2}^2 + \left(\frac{fz^2}{p} \right)^2 m_{\kappa 2}^2 \right), \\
m_Z^2 &= m_{ZS}^2 + M_p^2 \left(\left(\frac{z (f^2 + x_1 x_2)}{fp} \right)^2 m_{\alpha 1}^2 + \left(f - \frac{z^2 x_2}{fp} \right)^2 m_{\omega 1}^2 + \right. \\
&\left. + \left(\frac{z (f^2 + x_1 x_2)}{fp} - \frac{z x_2}{f} \right)^2 m_{\alpha 2}^2 + \left(\frac{x_1^2 z}{fp} - \frac{z^2}{f} \right)^2 m_{\omega 2}^2 + \left(\frac{z^2}{p} \right)^2 m_{\kappa 2}^2 \right).
\end{aligned} \tag{11}$$

Отримані формули достатньо громіздкі. Насамперед, це стосується наявності у цих формулах координат і паралаксів точок. Координати точок для апіорної оцінки точності можна записати через розміри знімка

$$x_1 = z = l, \quad x_2 = 2l - b, \tag{12}$$

де l – половина розміру знімка.

Крім того, вважатимемо, що $m_\alpha = m_\omega = m_\kappa$. У такому разі отримуємо:

$$m_x^2 = m_{xS}^2 + M_p^2$$

1. Глотов В. М. Визначення апіорної та апостеріорної точності просторових координат точок цифрового наземного знімання / В. М. Глотов, Смірнов Є. І. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: зб. наук. праць. Вип. I (13). – Львів; Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2007. – С. 173–179. 2. Лобанов А. Н. Фототопографія. Наземная стереофотограмметрическая съёмка / А. Н. Лобанов – М.: Недра, 1983. – 224 с. 3. Лобанов А. Н. Автоматизация фотограмметрических процессов / А. Н. Лобанов, И. Г. Журкин – М.: Недра, 1980 – 240 с. 4. Малявский Б. К. Аналитическая обработка фотограмметрической информации в целях инженерных изысканий / Б. К. Малявский, А. А. Жарновский – М.: Недра, 1984. – 220 с. 5. Тюфлин Ю. С. Способы стереофотограмметрической обработки снимков, полученных с подвижного базиса. – М.: Недра, 1971.