

А. Л. ДОРОЖИНСКИЙ

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИЯ ВДОЛЬ ЛОМАНЫХ МАРШРУТОВ

В настоящей работе рассмотрена теория построения фототриангуляционной сети вдоль маршрута, составленного из обычных (продольных) стереопар аэросъемочного маршрута, и поперечных пар, образованных перекрывающимися на 60 и более процентов аэроснимками двух смежных аэросъемочных маршрутов. Такой маршрут назван ломаным (рис. 1).

Практически применить описываемый метод можно при проектировании линейных сооружений, когда вариант трассы пролегает по участку, ранее покрытому площадной аэросъемкой. Из всей совокупности снимков в обработку отбираются лишь те, по которым проходят проектируемая трасса и граница участка, в пределах которого необходимо построить цифровую модель местности. Очевидно, что в этом случае образуется один или несколько ломаных маршрутов (не обязательно параллельных), а затраты на производство повторной аэрофотосъемки полностью отпадают. Применить предлагаемый способ можно и при обработке снимков площадной съемки, если по каким-либо причинам часть снимков аэросъемочных маршрутов необходимо исключить из фотограмметрических построений (плохое качество аэроснимков, изображение больших водных пространств и др.).

Построение сети фототриангуляции вдоль ломаного маршрута выполним по методу частично зависимых моделей, а соединение нескольких маршрутных моделей в блок возможно при наличии общих точек для нескольких маршрутных моделей.

Отличие описываемой методики от общепринятой [1] состоит в том, что в математическую обработку могут быть включены стереопары трех типов.

Первый тип — продольные стереопары (рис. 1), например, 1—2 и 2—3. Снимок 2 занимает в стереопаре 2—3 такое положение, какое он занимал в паре 1—2. Угол κ между осями снимка 2 входящего в последующую (2—3) и предыдущую (1—2) стереопары, равен нулю ($\kappa=0$).

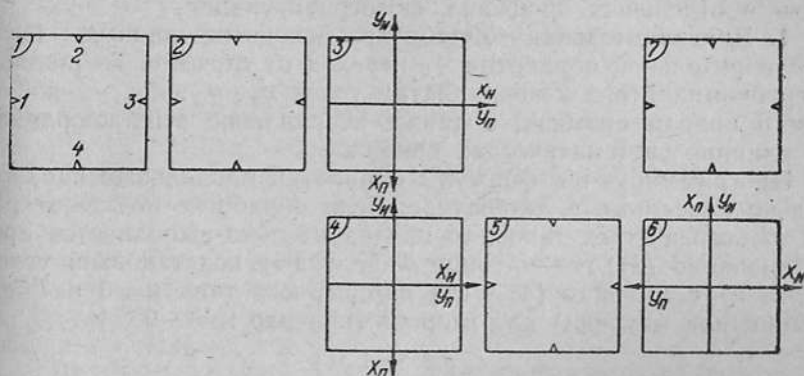


Рис. 1. Схема ломаного маршрута.

Второй тип — поперечные стереопары, например, 3—4. Оси снимка 3 в паре 3—4 занимают повернутое на угол $\kappa=-90^\circ$ положение относительно первоначального своего положения в паре 2—3.

Третий тип — поперечные стереопары вида 6—7. Снимок 6 в паре 6—7 занимает повернутое на угол $\kappa=+90^\circ$ положение относительно первоначального своего положения в паре 5—6.

Для выполнения обработки стереопар всех типов по единому алгоритму воспользуемся следующими положениями теории линейных ортогональных преобразований [2]. Если положение ортов новой координатной системы относительно ортов старой системы определяется матрицей T , то преобразование имеет вид

$$u' = Tu. \quad (1)$$

Обратный переход дает

$$u = T^*u', \quad (2)$$

где u, u' — векторы в старой и новой координатных системах соответственно; T^* — транспонированная матрица T .

Если в старой координатной системе вектор u претерпевал преобразование с помощью матрицы A , вектор u' определяется так:

$$u' = TAT^*u. \quad (3)$$

Для случая ортогонального трехосного пространства матрицы T , A являются матрицами направляющих косинусов

$$T = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Опишем теперь преобразования, которые необходимо выполнить в отдельных процессах фототриангуляции.

1. Предварительная обработка исходных данных. Цель предварительной обработки — переход от отсчетов по шкалам стереокомпаратора к координатам точек x_a, y_a, x_n, y_n на левом и правом снимках, а также исправление этих координат за влияние систематических ошибок.

Программируются формулы обработки продольных пар, детально описанные в литературе. Если обработке подлежат пары любого из трех типов, то предварительно выполняется преобразование (2), где матрицу T получают подстановкой углов $(0, 0, \kappa)$ в матрицу (4). Для пар первого типа $\kappa=0$ и $T=E$ (единичная матрица) для второго типа пар $\kappa=-90^\circ$ и

$$T = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (5)$$

для третьего типа пар $\kappa=+90^\circ$ и

$$T = \begin{vmatrix} 0 & +1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Вектор u можно представить в виде

$$u = \begin{vmatrix} x \\ y \\ -f \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Если порядок наблюдения четырех координатных меток в продольной паре имел вид 1, 2, 3, 4 (рис. 1), а при наблюдении поперечных пар он не нарушался, то необходимо наблюдения меток в поперечных парах привести к порядку записи их в продольных парах. Это обеспечивается преобразованием вида (2) для пар второго типа, и преобразованием (1) для пар третьего типа, где

$$u = \begin{vmatrix} 1\text{ м} \\ 2\text{ м} \\ 3\text{ м} \\ 4\text{ м} \end{vmatrix}; \quad (8) \quad T = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}. \quad (9)$$

Здесь 1 м, 2 м, 3 м, 4 м — порядковый номер метки.

Очевидно, что u, u' можно рассматривать как блочные матрицы, в которых каждый из субблоков, например, 1 м можно представить строчной матрицей

$$\|1\text{ м}\| = \|x_1 y_1 p_1 q_1\|. \quad (10)$$

Описанные действия обеспечивают: приведение измерений стереопар всех случаев к одной оси стереокомпаратора; правильное вычисление коэффициента систематической деформации; правильное введение поправок за влияние других систематических ошибок.

После предварительной обработки исходной информации выполним преобразование (1) для всех пар и вектор координат u' сохраним для дальнейших вычислений.

2. Определение элементов взаимного ориентирования (ЭВО). Выполнение последнего преобразования (1) обеспечивает возможность программировать обычные формулы, применяемые при определении ЭВО продольных пар. ЭВО пар других типов определяется по той же программе. Массив ЭВО $\Delta\alpha, \Delta\omega, \Delta\kappa, \tau, \nu$ (базисная система ЭВО) хранится для последующих вычислений.

3. Передача условных углов наклона снимков вдоль ломаного маршрута. Предположим, что генеральное направление ломаного маршрута определяется углом φ , определенным по карте, или по репродукции накидного монтажа, или вычисленным по координатам крайних в маршруте опознаков.

Углы α, ω, κ наклона каждого предыдущего снимка с порядковым номером i отнесены к условно выбранной пространственной системе координат левого снимка первой стереопары маршрута.

Примем, что эта пара была продольной. Эти углы определяют матрицу направляющих косинусов A_i , а элементы взаимного ориентирования пары $(i) - (i+1)$ $\Delta\alpha, \Delta\omega, \Delta\kappa$ определяют матрицу A . Тогда матрица направляющих косинусов снимка $(i+1)$ на основании преобразований (1) и (3) будет иметь вид

$$A_{i+1} = A_{\varphi} A_i T A T^*, \quad (11)$$

где A_{φ} — матрица вида (4), полученная по углам $(0, 0, \varphi)$. Матрица T получена подстановкой углов в матрицу направляющих косинусов (4):

$0, 0, 0$ — для пар первого типа;

$0, 0, -90^\circ$ — для пар второго типа;

$0, 0, +90^\circ$ — для пар третьего типа.

4. Вычисление компонентов базиса фотографирования и пространственных координат точек. Примем левый снимок стереопары за условно горизонтальный, а начало координат совместим с центром проектирования этого снимка. Так как вектор

базиса фотографирования определяется углами $\tau, \nu, 0$ (элементы взаимного ориентирования) в системе $X Y_0 Z_0$ (рис. 2, б), а матрица (4) отнесена к случаю направления осей координат XYZ (рис. 2, а), то отношение ортов двух этих систем должно давать преобразование

или

$$\begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} = T_0 \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y \\ Z \\ -X \end{pmatrix}. \quad (12)$$

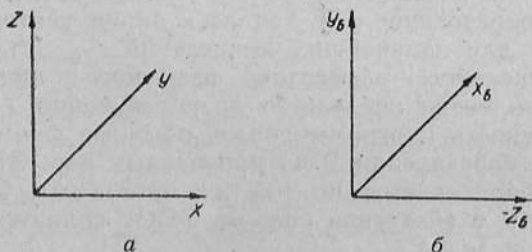


Рис. 2. Фотограмметрическая и базисная системы координат.

Нетрудно заметить, что

$$T_0 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

На основании (3) с учетом преобразования (12) получим компоненты базиса фотографирования

$$\begin{pmatrix} B'_x \\ B'_y \\ B'_z \end{pmatrix} = T_0^* A_{(\tau, \nu, 0)} T_0 \begin{pmatrix} B \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

где $A_{(\tau, \nu, 0)}$ — матрица (4), полученная по элементам взаимного ориентирования $\tau, \nu, 0$.

Пространственные координаты фотограмметрической точки получим из решения прямой фотограмметрической засечки

$$\Delta U = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = N \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ -f \end{pmatrix}, \quad (15)$$

где

$$N = \frac{B'_x + \frac{x_{tn}}{f} B'_z}{x_n - x_{tn}}. \quad (16)$$

Координаты точки на левом снимке x_l, y_l не трансформируются, так как его углы наклона равны нулю. Абсциссу точки на правом снимке x_{tn} получим путем трансформирования координат x_n, y_n по компонентам матрицы A , входящей в формулу (11).

Для приведения составляющих базиса фотографирования и вектора ΔU выполним преобразование

$$\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = A_i T^* \begin{pmatrix} B'_x \\ B'_y \\ B'_z \end{pmatrix}, \quad (17)$$

$$\Delta U_H = \begin{pmatrix} \Delta X_n \\ \Delta Y_n \\ \Delta Z_n \end{pmatrix} = A_i T^* \Delta U. \quad (18)$$

Здесь матрица T получена действиями, описанными в пункте 3; матрица A_i получена по формуле (11).

5. Вычисление масштабного коэффициента. Приведение стереопар к единому масштабу выполним по аппликатам связующих точек, расположенных в зоне перекрытия стереопар любого типа. Масштабный коэффициент вычисляется по известной формуле

$$k_j = k_{j-1} \frac{(\Delta Z_H - B_z)_{j-1}}{\Delta Z_{Hj}}, \quad (19)$$

где j — номер стереопары.

6. Вычисление пространственных координат центров фотографирования и точек сети. Координаты правого центра фотографирования вычислим по известным формулам

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{s_n} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{s_\pi} + k_j \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix}, \quad (20)$$

а вектор координат фотограмметрической точки получим так:

$$U_\phi = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_\phi = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{s_\pi} + k_j \cdot \Delta U_H. \quad (21)$$

Таким образом, свободная фотограмметрическая сеть построена.

7. Геодезическое ориентирование и исключение деформации сети. Геодезическое ориентирование, сводящееся к отысканию сети параметров ориентирования сети $\Delta\lambda, \delta\alpha, \delta\omega, \delta\kappa, \delta X_0, \delta Y_0, \delta Z_0$, выполняется по алгоритму, описанному в литературе для маршрутной фототриангуляции [1]. Расположение опознаков не отличается от общепринятой схемы. Уравнивание сети целесообразно выполнять по полиномам, симметричным относительно координат X, Y , так как простираение сети вдоль осей X, Y мо-

жет быть примерно одинаковым. Для уравнивания высот, например, применим полином

$$\Delta Z = C_0 + C_1 X + C_2 Y + C_3 XY + C_4 X^2 + C_5 Y^2. \quad (22)$$

Аналогичные полиномы с коэффициентами A_i , B_i применяются для уравнивания плановых координат.

8. Решение прямой фотограмметрической засечки. Решение прямой засечки выполним по формулам, приведенным в пунктах 4 и 6, с последующим преобразованием вектора фотограмметрических координат

$$U_r = \begin{Bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{Bmatrix} = (1 + \Delta\lambda) A(\delta\alpha, \delta\omega, \delta\kappa) U_\phi + \begin{Bmatrix} \delta X_0 \\ \delta Y_0 \\ \delta Z_0 \end{Bmatrix}. \quad (23)$$

Наконец, учтем параметры деформации пространственной сети

$$U_{yp} = \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}_{yp} = \begin{Bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} 1 \\ X_r \\ Y_r \\ X_r Y_r \\ X_r^2 \\ Y_r^2 \end{Bmatrix}. \quad (24)$$

где A_i , B_i , C_i — строчные матрицы, составленные из коэффициентов полиномов вида (22).

Вектор пространственных координат U_{yp} является окончательным результатом сгущения маршрутной сети. Если необходимо построить блок, то несколько маршрутных моделей соединяются между собой по общим точкам, лежащим в зонах поперечного перекрытия ломаных маршрутов.

Вполне очевидно, что частными случаями описанного метода являются фототриангуляция вдоль аэросъемочных маршрутов (для всех стереопар $\kappa=0$), и фототриангуляция, построенная по каркасным маршрутам ($\kappa=\pm 90^\circ$).

При практической реализации описанного способа на ЭЦВМ по однотипным формулам достаточно сформировать логическую шкалу, для обозначения типа обрабатываемых стереопар (например, 0, 1, 2 — стереопары первого, второго, третьего типов соответственно), а затем на основании этой шкалы находить угол κ , определяющий дальнейшее преобразование.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лобанов А. Н. Аналитическая фотограмметрия. М., «Недра», 1972.
2. Смирнов В. И. Курс высшей математики, т. 3. ч. 1. М., «Наука», 1967.

Работа поступила в редколлегию 24 сентября 1974 года. Рекомендована кафедрой аэрофотогеодезии Львовского политехнического института.