

ПОСТРОЕНИЕ СЕТИ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ МЕТОДОМ СВЯЗОК ПО ФОТОТЕОДОЛИТНЫМ СНИМКАМ

Практическая задача сгущения опорной сети в камеральных условиях возникла при детальном геолого-структурном исследовании месторождений в северо-западном Тянь-Шане, рудоносные пласты которого выходят в узкое ущелье, один из склонов которого имеет высоту 400...600 м, крутизну 70...80° и протяженность 4 км. На таком почти вертикальном склоне необходимо определить параметры трещин, координаты выходов рудоносных пластов. Ввиду недоступности объекта для решения таких задач наиболее рационален фотограмметрический метод, а фототриангуляция, созданная по материалам фототеодолитной съемки, является оптимальным способом сгущения обоснования. Поэтому нами разработан соответствующий алгоритм и создана программа для ЕС ЭВМ, позволяющие максимально использовать всю полезную информацию, получаемую из полевых работ при фототеодолитной съемке.

Использование методов фототриангуляции по фототеодолитным снимкам, в частности метода связок, как наиболее строгого, целесообразно при инженерных изысканиях с точки зрения точности и экономической эффективности [1, 4, 6].

Идея метода связок достаточно хорошо известна [2] и основана на соблюдении условий коллинеарности для всей совокупности точек, изображенных на фотоснимке.

Таким образом, идею метода можно позаимствовать из аэрофототриангуляции с учетом нижеперечисленных отличительных черт (исходные геодезические (опорные) данные более разнообразны и могут быть известны элементы внешнего ориентирования снимков):

1. В наземной фотосъемке с одной фотостанции можно получить несколько снимков (со скосами φ_i влево—вправо, с наклоном главного оптического луча на углы $\omega_i \neq 0$).

2. Любой наклон либо скос фотокамеры приводит к пространственному смещению передней узловой точки объектива относительно фотостанции (закрепленной на местности с известными координатами), поэтому такие снимки нельзя рассматривать как полученные из одного центра проекции.

3. Исходными геодезическими (опорными) данными могут быть все или некоторые (в определенном сочетании) из нижеперечисленных величин:

пространственные (геодезические) координаты фотостанций $(X, Y, Z)_{Q_{0л}}^r$, $(X, Y, Z)_{Q_{0п}}^r$, где индексами л, п обозначена левая и правая фотостанция одного базиса съемки;

пространственные (геодезические) координаты левой (или правой) фотостанции, длина базиса съемки B (или $B_{ху}$ — горизонтальное проложение), превышение правой фотостанции над левой B_z , дирекционный угол A ;

высоты $h_л$, $h_п$ фототеодолита над точками $Q_{0л}$, $Q_{0п}$;

пространственные (геодезические) координаты корректурных точек $(X, Y, Z)_K^r$, расположенные на местности произвольно, но изобразившиеся, как минимум, на одной стереопаре;

горизонтальные направления β_i на корректурные точки, измеренные как отклонение направления от перпендикуляра к базису фототрафирования (оси Y_ϕ);

вертикальные направления γ_i , измеренные как отклонение направления от горизонтальной плоскости $X_\phi Y_\phi$, проходящей через точку Q (рис. 1).

Возможна фиксация угловых элементов ориентирования по уровням и ориентирному устройству.

4. Исходными фотограмметрическими данными являются элементы внутреннего ориентирования фотокамеры, расстояние между координатными метками (из паспорта прибора или из исследований), расстояние r (внецентренность объектива) от передней узловой точки S объектива до точки Q (см. рис. 1), отсчеты по шкалам стереокомпаратора x , z , p , q при наведении измерительной марки на координатные метки или точки фототриангуляционной сети (корректурные, связующие, определяемые, контрольные). Построение сети фототриангуляции выполняется в три этапа: подготовительные геодезические вычисления; предварительная фотограмметрическая обработка; уравнивание блока фототриангуляции по методу связок.

На первом этапе различные опорные данные, относящиеся к базису фототрафирования, приводятся к единому виду: координатам $(X, Y, Z)_{Q_л}^r$, $(X, Y, Z)_{Q_п}^r$ точек $Q_л$, $Q_п$. Если эти значения приближенные, то в процессе уравнивания они уточняются.

На втором этапе известным приемом [3] выполняют переход от отсчетов по шкалам стереокомпаратора к координатам точек

$x_{л}, z_{л}, x_{п}, z_{п}$ на левом и правом снимках с введением поправок, учитывающих влияние систематических ошибок. Поскольку реализация метода связок требует отыскания поправок к искомым координатам точек сети, то начальные значения геодезических координат находим из решения прямой фотограмметрической засечки. Если элементы внешнего ориентирования снимков известны точно, то уравнивание, естественно, не выполняется, а приве-

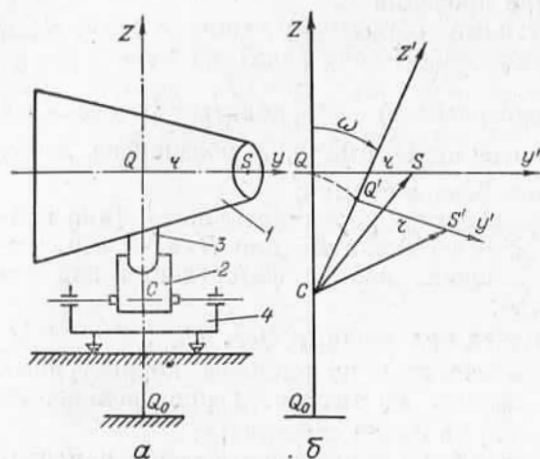


Рис. 1. Влияние наклона фотокамеры на положение центра проекции: основные прямые и точки (а); геометрическая интерпретация смещений точек при наклоне камеры (б):

1 — фотокамера; 2 — подставка для наклона фотокамеры; 3 — вертикальная ось фототеодолита; 4 — трепер; C — центр вращения приставки; Q — точка (репер) фотостанции; Q0 — пересечение вертикальной оси с главной оптической осью фотокамеры; ω — угол наклона камеры; S — передняя узловая точка объектива.

денная ниже формула служит для вычисления окончательных значений пространственных фотограмметрических координат:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_i = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{Q_n} + r \cdot \begin{pmatrix} b_2 \\ a_2 \\ c_2 \end{pmatrix}_n + \frac{B_t}{p_t} \begin{pmatrix} f \\ x_{t_n} \\ z_{t_n} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $x_{t_n}, z_{t_n}, p_t, B_t$ — трансформированные координаты, параллакс и базис фотографирования; направляющие косинусы a_i, b_i, c_i вычисляются по углам наклона камеры α, ω, κ (α — угол, образованный осью X^r и проекцией главной оптической оси фотокамеры на горизонтальную плоскость: $\alpha = A + \varphi - 90^\circ$); r — величина внецентренности объектива. Как видно из рис. 1, передняя узловая точка S и точка Q лежат на оптической оси фотокамеры, поэтому нет необходимости определять координаты центров проекций снимков, а достаточно найти координаты точки Q. Из этих соображений в (1) и дальнейших формулах координаты центров проекций выражены через координаты точки Q и величину r .

Затем по всей совокупности точек с известными (в том числе и вычисленными по формуле (1)) геодезическими координатами находится центр тяжести блока и выполняется параллельный перенос геодезической системы координат в эту условную точку.

На третьем этапе происходит формирование уравнений поправок, решение их по методу наименьших квадратов, проверка ите-

ративного процесса на сходимость и оценка точности уравнивания.

Для каждой точки левого (правого) снимка составляются два уравнения:

$$\begin{aligned} &|d_1 \delta X_Q + d_2 \delta Y_Q + d_3 \delta Z_Q| + |d_4 \delta \alpha + d_5 \delta \omega + d_6 \delta \kappa| - |(d_1 \delta X + \\ &\quad + d_2 \delta Y + d_3 \delta Z)| + |(\bar{x} - x)| = v_x, \\ &|d'_1 \delta X_Q + d'_2 \delta Y_Q + d'_3 \delta Z_Q| + |d'_4 \delta \alpha + d'_5 \delta \omega + d'_6 \delta \kappa| - \\ &\quad - |(d'_1 \delta X + d'_2 \delta Y + d'_3 \delta Z)| + |(\bar{z} - z)| = v_z, \end{aligned} \quad (2)$$

Рис. 2. Матрица коэффициентов уравнений поправок.

N к/п	N _p	Поправки к точкам Q ₁ Q ₂	Поправки к углам азимутам, высоте по ориентировкам	Поправки к координатам точек сети
		$\delta Q^1 \delta Q^2 \delta Q^3 \delta Q^4 \delta Q^5 \delta Q^6$	$\delta \alpha^1 \delta \alpha^2 \delta \alpha^3 \delta \alpha^4 \delta \alpha^5 \delta \alpha^6$	3 6 8 10 11 13 15 16 18 20 23 L
1-2	1			
	3			
	6			
	8			
	10			
3-5	11			
	13			
	15			
	16			
	18			
4-6	20			
	23			
	25			
	26			
	27			
5-6	28			
	29			
	30			
	31			
	32			

где $d_1, d_2, d_3, \dots, d_6'$ — частные производные, полученные из уравнений (3) путем дифференцирования по соответствующим переменным; x, z — измеренные координаты; $\bar{x}, \bar{z}$ — вычисленные координаты;

$$\begin{aligned} \bar{x} &= f \frac{b_1 (X^r - X_Q^r) + a_1 (Y^r - Y_Q^r) + c_1 (Z^r - Z_Q^r)}{b_2 (X^r - X_Q^r) + a_2 (Y^r - Y_Q^r) + c_2 (Z^r - Z_Q^r) - r}; \\ \bar{z} &= f \frac{b_3 (X^r - X_Q^r) + a_3 (Y^r - Y_Q^r) + c_3 (Z^r - Z_Q^r)}{b_2 (X^r - X_Q^r) + a_2 (Y^r - Y_Q^r) + c_2 (Z^r - Z_Q^r) - r}; \end{aligned} \quad (3)$$

a_i, b_i, c_i — направляющие косинусы, вычисленные по углам α, ω, κ .

В матричной форме для всей совокупности точек (кроме корректурных) система (2) имеет вид

$$A_{ij} \delta Q + B_{ik} \delta \varepsilon - A_{im} \delta R + L_i = V_i, \quad (4)$$

где $A_{ij}, B_{ik}, A_{im}, L_i, V_i$ — блоки, отмеченные пунктирными линиями в (2) и изображенные клетками на рис. 2; индексы i, j, k, m — указывают номера строк и столбцов блоков; $\delta Q, \delta \varepsilon, \delta R$ —

векторы отыскиваемых поправок. Структура блоков очевидна из сопоставления (4) и (2).

Если координаты станций известны точно, то система (4) принимает вид

$$B_{ij}\delta\varepsilon - A_{ik}\delta R + L_i = V_i. \quad (5)$$

Если угловые элементы внешнего ориентирования известны точно, то система (4) принимает вид

$$A_{ij}\delta Q - A_{ik}\delta R + L_i = V_i. \quad (6)$$

Для корректурных точек, если угловые элементы ориентирования подлежат уточнению, уравнения поправок имеют вид

$$A_{ij}\delta Q + B_{ik}\delta\varepsilon + L_i = V_i, \quad (7)$$

если же углы заданы точно, то имеем

$$A_{ij}\delta Q + L_i = V_i. \quad (8)$$

Если в списке исходных данных имеется превышение B_z для двух фотостанций, то возникает уравнение

$$\begin{aligned} \delta Z_{Q_n} &= \delta Z_{Q_d} + h^\circ - h = V_h, \\ h^\circ &= Z_{Q_n}^r - Z_{Q_d}^r, \quad h = B_z + (h_n - h_d). \end{aligned} \quad (9)$$

Для известного базиса съемки B (расстояние между точками Q_d и Q_n) уравнения поправок имеют вид

$$\begin{aligned} g_1 \delta X_{Q_n} + g_2 \delta Y_{Q_n} + g_3 \delta Z_{Q_n} - g_1 \delta X_{Q_d} - g_2 \delta Y_{Q_d} - \\ - g_3 \delta Z_{Q_d} + B^\circ - B = V_B, \end{aligned} \quad (10)$$

где g_1, g_2, g_3 — частные производные, аналитические выражения для которых получены из формулы

$$B = [(X_{Q_n}^r - X_{Q_d}^r)^2 + (Y_{Q_n}^r - Y_{Q_d}^r)^2 + (Z_{Q_n}^r - Z_{Q_d}^r)^2]^{1/2}, \quad (11)$$

B^0 — вычисленный в процессе итераций базис съемки.

Для горизонтальных β и вертикальных γ направлений на корректурные точки имеем уравнения

$$\begin{aligned} t_1 \delta X_Q + t_2 \delta Y_Q - t_1 \delta X - t_2 \delta Y + \beta^\circ - \beta = v_\beta, \\ t'_1 \delta X_Q + t'_2 \delta Y_Q + t'_3 \delta Z_Q - t'_1 \delta X - t'_2 \delta Y - t'_3 \delta Z + \gamma^\circ - \gamma = v_\gamma, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\beta^\circ, \gamma^\circ$ — приближенные (вычисленные) значения углов; $t_1, t_2, \dots, t'_3$ — частные производные, полученные из формул

$$\operatorname{tg} \beta^\circ = (Y^r - Y_Q^r) / (X^r - X_Q^r); \quad (13)$$

$$\operatorname{tg} \gamma^\circ = (Z^r - Z_Q^r) / [(X^r - X_Q^r)^2 + (Y^r - Y_Q^r)^2]^{1/2}. \quad (14)$$

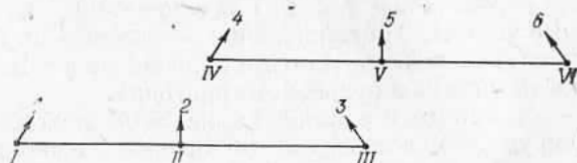
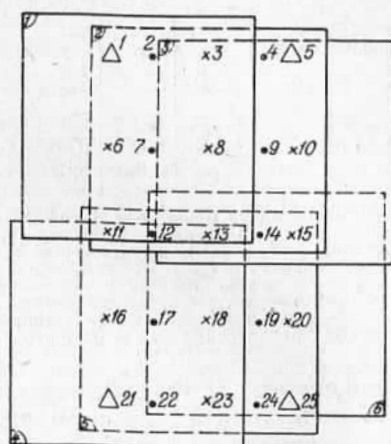
Значения частных производных подлежат уточнению в ходе итеративного процесса; поэтому после исправления в текущей ите-

рации вектора-столбца неизвестных происходит повторное вычисление коэффициентов (новых значений частных производных).

Процесс формирования уравнений поправок имеет свои особенности ввиду наличия разнообразной информации. Здесь должно быть учтено, что для снимков, полученных с одной фотостанции, поправки к координатам точки Q помещают в одних и тех же столбцах; для снимка, входящего в различные стереопары, поправки к элементам внешнего ориентирования располагают в одних и тех же столбцах; для точки, общей для разных снимков, поправки к пространственным координатам записывают в одних

Рис. 3. Схема расположения базисов съемки, снимков и точек макетного блока:

Δ — опорные точки; $\cdot$, $\times$ — точки сети; $\times$ — точки, по которым составлена схема матрицы коэффициентов уравнений поправок; 1^1 — номер снимка, полученного с указанной фотостанции; $I-VI$ — центры фотостанций.



и тех же столбцах; для опорной (корректирующей) точки поправки в пространственные координаты не находят; при точных значениях угловых элементов внешнего ориентирования соответствующие поправки не вычисляют; при точных значениях координат фотостанций соответствующие поправки не находят.

Структура матрицы уравнений поправок для блока довольно сложна. В качестве примера формирования системы уравнений поправок для макетного блока снимков, показанного на рис. 3, составлена схема матрицы коэффициентов уравнений поправок (см. рис. 2). Схема дана только для точек, отмеченных знаком $\times$.

Дальнейший путь решения задачи известен из уравнительных работ: переход к нормальным уравнениям; проверка итерационного процесса на сходимость; вычисление исправленных значений искомых неизвестных; оценка точности уравнивания.

Изложенный алгоритм реализован в виде комплекса программ для ЕС ЭВМ, написанных на языке Фортран-IV; на их базе можно уравнивать стереопару, маршрут или блок. Выбор необходимого варианта счета определяется заданным набором опорных данных. Структура набора исходных данных состоит из трех уровней. Первый уровень — исходные данные, общие для блока (элементы внутреннего ориентирования камеры, геодезические координаты опорных точек, допуски, некоторые управляющие параметры).

Точность сгущения сети фототриангуляции
при различных опорных данных

Ср. кв. ошибки, м	Варианты опорных данных						
	1	2	3	4	5	6	7
m_x	0,024	0,022	0,018	0,015	0,016	0,018	0,018
m_y	0,118	0,091	0,062	0,190	0,054	0,059	0,059
m_z	0,029	0,038	0,017	0,019	0,014	0,016	0,016

Примечания: 1—4 — опорные плано-высотные точки (ОП); 2—4 — ОП, длина базисов и превышения между фотостанциями; 3—4 — ОП, корректурные направления, длина базисов и превышения между фотостанциями; 4—4 — корректурные направления, длина базисов и превышения между фотостанциями; 5—4 — корректурные направления и координаты фотостанций; 6—4 — ОП и координаты фотостанций; 7—4 — ОП, 4 корректурные направления и координаты фотостанций.

Второй уровень — данные, которые относятся к базису съемки (ими могут быть точные или приближенные координаты фотостанций, длина базиса и превышение правой фотостанции над левой, горизонтальные и (или) вертикальные направления на корректурные точки). Третий уровень — данные по стереопарам (номер стереопары, точные или приближенные углы наклона камеры, отсчеты по шкалам стереокомпаратора).

В процессе обработки на ЭВМ исходная информация контролируется и сообщения об ошибках выводятся на печать; в зависимости от характера ошибки счет на ЭВМ продолжается или прекращается.

Для проверки алгоритма и программы использованы макетные снимки, имитирующие фототеодолитную съемку почти вертикального склона (см. рис. 3). Параметры фотокамеры: формат кадра 13×18 см, фокусное расстояние $f=200$ мм, координаты главной точки $x_0=z_0=0$. Количество базисов съемки — 4 при средней длине каждого из них 160 м; отстояния колеблются в пределах 300...500 м. Блок состоит из шести снимков и включает 25 точек сети. Четыре опорные точки расположены по углам блока; горизонтальные и вертикальные корректурные направления заданы на эти же четыре точки.

В истинные координаты и параллаксы точек снимков вводились на ЭВМ по стандартной программе «GAUSS» нормально распределенные случайные ошибки со средними квадратическими ошибками $m_{x,z}=0,01$ мм и $m_{p,q}=0,007$ мм. Из набора опорных дан-

ных сформированы различные допустимые варианты, и для каждого варианта просчитан на ЭВМ ряд серий фототриангуляции с различными генерированными случайными ошибками. Затем для каждого варианта из всех серий по 21...25 контрольным точкам вычислены средние квадратические ошибки пространственных координат точек m_x , m_y , m_z и оценки доверия к ним σ_x , σ_y , σ_z . Результаты эксперимента приведены в таблице.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что точность сгущения координат X и Z во всех случаях почти одинакова ($\sigma_x=0,004$, $\sigma_z=0,003$). Варианты 3, 5, 6, 7 дают одинаковую точность определения ординаты Y ($\sigma_y=0,014$). В вариантах 1 и 2 наблюдается снижение точности по Y примерно в 1,5 раза, а в варианте 4 — в 3 раза. Следовательно, оптимальным является набор опорных данных типа 3, 5, 6, 7.

Список литературы: 1. Кудрявцев Г. Н. Аналитические методы обработки материалов наземной стереофотограмметрии. — В сб.: Наземная стереофотограмметрия при инженерных изысканиях и съемках. Новосибирск, 1975. 2. Лобанов А. Н. Аналитическая фотограмметрия. — М.: Недра, 1972. 3. Финковский В. Я., Дорожнинский А. Л., Тумская О. В., Любимов И. Н. Методы и алгоритмы создания цифровой модели рельефа для машинного проектирования мелиоративных систем. — Львов: Вища школа, 1980. 4. Buoi Vu Ngoe, Schule H. U. Untersuchungen zur genauigkeitssteigerung bei analytischen Auswertungen terrestrischer Bildpaare durch Einbeziehung zusätzlicher Parameter. — Vermessungstechnik, 1979, v. 27, № 5. 5. Veress S. A., Hatzopoulos J. N. A combination of aerial and terrestrial photogrammetry for monitoring. — Photogramm. Eng. and Remote Sens., 1981, v. 47, № 12. 6. Wrobel Bernhard, Ellenbeck Karl-Heiko. Zur Lüstungssteigerung der terrestrisch — photogrammetrischen Punktbestimmung. — Bildmess. und Luftbildung, 1977, v. 45, № 3.