

УДК 528.4+528.74:622.1.2

А. Л. ДОРОЖИНСКИЙ, Д. Н. ТУРУК

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ ПО ФОТОСНИМКАМ, ПОЛУЧЕННЫМ ДЛИННОФОКУСНОЙ ФОТОКАМЕРОЙ

Для определения оползневых смещений на карьерах при значительном удалении фотостанций от снимаемых профильных линий рекомендован к применению длиннофокусный фототеодолит

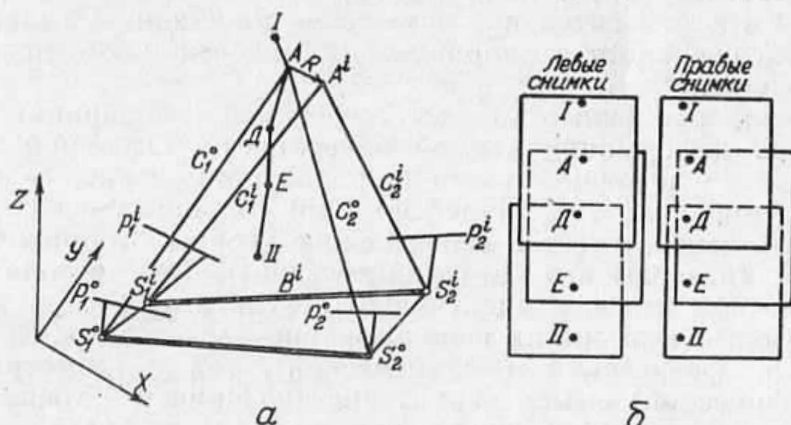


Рис. 1. Схема фотосъемки профильной линии:
а — схема засечки, б — изображение точек профильной линии на снимках.

ФЗЛТ [4]. При его использовании возникают различные инварианты фототеодолитной съемки, теоретическое описание которых изложено в настоящей работе.

Пространственное оползневое смещение (рис. 1) точки A^0 , закрепленной на профильной линии $I-II$, в положение A^i характеризуется вектором $R = A^0A^i$, где индексами i и 0 обозначены соответственно текущий и начальный циклы наблюдений. Для определения смещения R используется либо метод смещений, либо метод координат (по результатам стереофотограмметрической съемки).

Вследствие объективных обстоятельств при фотосъемке на карьере возможны различные инварианты, объединенные в схему (рис. 2). Например, условия карьера не позволяют заложить фотостанции в неподвижных местах, поэтому в текущем цикле они переходят из положения S^0 в S^i (см. рис. 1).

С теоретической точки зрения наиболее общим является случай, когда элементы внутреннего и углового внешнего ориентирования известны приближенно, а фотостанции смещаются от цикла

к циклу. Все другие варианты можно рассматривать как частные случаи общего стереофотограмметрического способа или метода смещений. Рассмотрим их основные положения.

Поскольку искомым вектор R (см. рис. 1) определяется как

$$R = C_1^i - C_1^0 + B^0 - B^i + K_2, \quad (1)$$

то для его отыскания нужны как фотограмметрические (C_1^0 , C_1^i), так и геодезические (B^0 , B^i , K_2) данные. Для последних необходимо в каждом цикле наблюдений выполнять привязку фотостанций к выбранной системе координат XYZ . Для определения век-

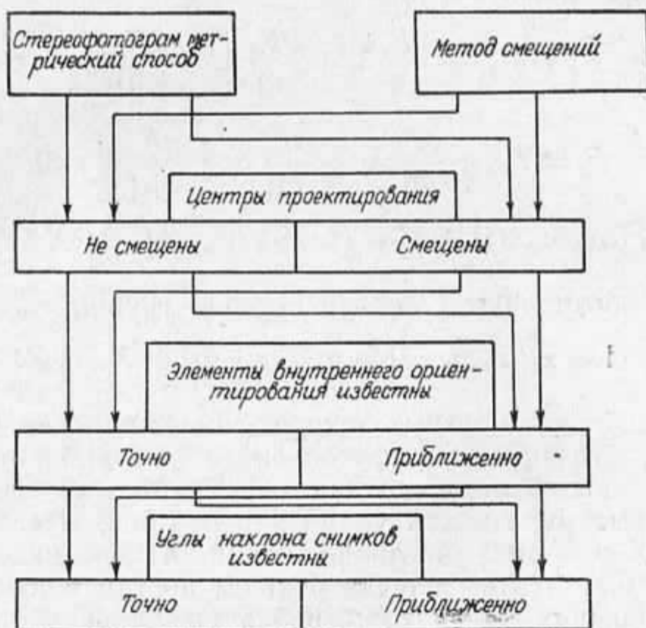


Рис. 2. Инварианты методов и исходных условий определения оползневых смещений.

торов C_1^0 , C_1^i при приближенно известных элементах внутреннего и углового внешнего ориентирования задача разрешима лишь при наличии корректурных точек или направлений. На самом деле векторы C_1^0 и C_1^i находят из прямой фотограмметрической засечки, которая разрешима при известных элементах внутреннего и внешнего ориентирования снимков.

Переходя от векторной к координатной форме определения смещений, имеем

$$R = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1^i \\ Y_1^i \\ Z_1^i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_1^0 \\ Y_1^0 \\ Z_1^0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Используем для определения компонентов вектора R функциональную модель коллинеарности [2, 3]. Поскольку исходные условия

$$F_x = \frac{a_1'(X - X_s) + b_1'(Y - Y_s) + c_1'(Z - Z_s)}{a_2'(X - X_s) + b_2'(Y - Y_s) + c_1'(Z - Z_s)} f + x_0 - x = 0,$$

$$F_z = \frac{a_3'(X - X_s) + b_3'(Y - Y_s) + c_3'(Z - Z_s)}{a_2'(X - X_s) + b_2'(Y - Y_s) + c_2'(Z - Z_s)} f + z_0 - z = 0 \quad (3)$$

являются нелинейными, выполним известную линейризацию относительно таких групп неизвестных: δ_1 — поправки к элементам внутреннего ориентирования, δ_2 — поправки к угловым элементам внешнего ориентирования, δ_3 — поправки к пространственным координатам точки. Получим

$$F_x = F_{0x} + \frac{\partial F_x}{\partial I} \delta_1 + \frac{\partial F_x}{\partial II} \delta_2 + \frac{\partial F_x}{\partial III} \delta_3 = 0,$$

$$F_z = F_{0z} + \frac{\partial F_z}{\partial I} \delta_1 + \frac{\partial F_z}{\partial II} \delta_2 + \frac{\partial F_z}{\partial III} \delta_3 = 0, \quad (4)$$

где $\delta_1^T = (\delta x_0 \delta z_0 \delta f)^T$, $\delta_2^T = (\delta \alpha \delta \omega \delta \kappa)^T$, $\delta_3^T = (\delta X \delta Y \delta Z)^T$, (5)

а I, II, III обозначают соответствующие группы переменных

$$I = x_0, z_0, f; \quad II = \alpha, \omega, \kappa; \quad III = X, Y, Z. \quad (6)$$

Конкретный вид частных производных приведен в [3].

Полагая, что процессы фотосъемки, фотолабораторной обработки и измерений сопровождаются случайными ошибками, (4) следует рассматривать как уравнения ошибок, т. е. вместо нулевого вектора в правой части уравнений (4) возникает вектор невязок $V(v_x, v_z)$. В этом случае решаем поставленную задачу методом наименьших квадратов, требуя выполнения условия

$$V^T V = \min.$$

Итеративный процесс, возникающий вследствие линейризации (4), контролируется по стабилизации ошибки единицы веса уравниваемых величин.

Вернемся теперь к уравнению (2). В методе координат обработку данных необходимо вести отдельно для начального и текущего циклов. Этим приемом мы избегаем появления пропорциональности между столбцами в системе уравнений (4), возможной ввиду малости вектора R , близости численных значений координат центров проекций S^0 и S^i , углов наклона $(\alpha, \omega, \kappa)^0$ и $(\alpha, \omega, \kappa)^i$.

Запишем (4) для точки одного снимка

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{bmatrix} \delta_1 + \begin{bmatrix} a_4 & a_5 & a_6 \\ b_4 & b_5 & b_6 \end{bmatrix} \delta_2 + \begin{bmatrix} a_7 & a_8 & a_9 \\ b_7 & b_8 & b_9 \end{bmatrix} \delta_3 + \begin{bmatrix} l_x \\ l_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_z \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Одна точка, принадлежащая одному (левому или правому) снимку, дает два уравнения при девяти неизвестных. Для пары снимков имеем четыре уравнения при двенадцати неизвестных.

Общее же число неизвестных N для k точек в n стереопарах подсчитываем по формуле

$$N = 3k + 6n + 3. \quad (8)$$

Для однозначного решения задачи по отысканию векторов δ_1 и δ_2 при $n=1$ необходимо иметь три опорные точки (для них $\delta_3=0$), расположенные по углам стереопары.

Примененные функциональная и стохастическая модели полностью охватывают общий случай стереофотограмметрического метода. Однако специфика решаемой задачи, конструктивные особенности камеры ФЗЛТ требуют конкретизации теоретической схемы.

Рассмотрим метод смещений. В нем традиционно фотосъемка идет при сохранении элементов внутреннего и внешнего ориентирования, а по несовпадению абсцисс x^0 и x^i , аппликат z^0 и z^i вычисляют смещение R . Если предположить, что угловые элементы внешнего ориентирования известны приближенно и снимки получены с различных фотостанций, то задачу можно

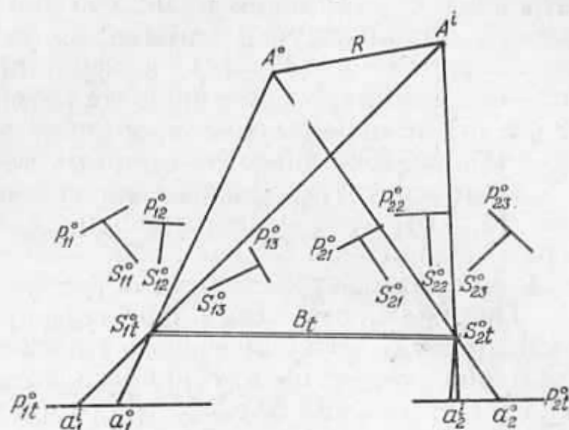


Рис. 3. Формирование квазиснимков в начальном цикле фотосъемки.

решить в два этапа: на первом — формируются левые и правые квазиснимки, приведенные к нормальному случаю фототеодолитной съемки с едиными центрами фотографирования S_{1t}^0, S_{2t}^0 (рис. 3); на втором — вычисляются компоненты вектора смещения по этим квазиснимкам. Если углы наклона реальных снимков известны приближенно, снимки получены с 60%-ным продольным перекрытием, то формирование возможно с использованием связующих точек [2] или по элементам взаимного ориентирования [1].

Для начального и текущего циклов формирование протекает идентично. Опуская индекс t (трансформирование), из формул нормального случая для квазиснимков получим компоненты вектора смещения

$$\begin{aligned} \Delta X &= \frac{Y^0}{f} (x^i - x^0) + \frac{\Delta Y}{f} x^i, & \Delta Z &= \frac{Y^0}{f} (z^i - z^0) + \frac{\Delta Y}{f} z^i, \\ \Delta Y &= Y^0 \frac{\Delta P}{P^i}, & \Delta P &= (x_1^0 - x_2^0) - (x_1^i - x_2^i) = P_0^0 - P^i. \end{aligned} \quad (9)$$

Как следует из (9), в начальном цикле необходимо определить отстояние Y^0 и в текущем и начальном циклах получить координаты точки на снимках x^i, x^0 и z^i, z^0 .

При использовании камеры ФЗЛТ возникает ряд специфических условий. Прежде всего, ввиду малости кадра (24×36 мм²) выбор

корректирных точек или направлений по общепринятой методике нецелесообразно, поэтому элементы внешнего ориентирования для каждого снимка фиксируются. Далее, при фотосъемке профильных линий приходится выполнять перефокусировку камеры, так что фокусное расстояние для каждого снимка известно приближенно. Фотографирование профильной линии ведется с таким перекрытием, чтобы на снимках изобразилось не менее 2 замаркированных точек профильной линии (см. рис. 1). Геодезические работы обеспечивают в каждом цикле определение координат фотостанций и концевых точек профиля I—II. Для повышения точности определения базис съемки составляет $B=0,5Y$, т. е. применен общий случай съемки. С учетом этих замечаний вектор $\delta_2=0$ входит в (4), (7), а функциональная модель коллиарности обеспечивает частичную калибровку камеры (нахождение вектора δ_1) и определение координат точек оползня (вектор δ_3) при надлежащем количестве опорных точек.

Если считать элементы внутреннего ориентирования известными ($\delta_1=0$), то применима функциональная модель прямой фотограмметрической засечки как наиболее простой и надежный способ фотограмметрических построений.

Покажем, что схема фотографирования (см. рис. 1) профильной линии I—II существенно снижает требования к точности определения элементов внутреннего ориентирования. Пусть для точек A и D из прямой засечки (нормальный случай) определены ординаты $Y=B\frac{f}{P}$, а затем вычислено приращение $\Delta Y=B\frac{f}{P_D}-B\frac{f}{P_A} =$

$$= Bf \frac{P_A - P_D}{P_D P_A}.$$

Отсюда $\delta\Delta Y = \Delta Y \frac{\delta f}{f}$, где $\delta\Delta Y$ — ошибка в приращении ΔY , вызванная ошибкой δf . При $\Delta Y=50$ м, $f=1000$ м, $\delta\Delta Y=0,05$ м получим $\delta f=1$ мм. Поскольку $Y \gg \Delta Y$, требования к δf при использовании ординат Y будут более жесткими.

При такой схеме между концевыми точками I и II прокладывается фотограмметрический ход, в котором возникают координатные условия

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta X_{\Phi} - (X_{II}^r - X_I^r) &= 0, \quad \Sigma \Delta Y_{\Phi} - (Y_{II}^r - Y_I^r) = 0, \\ \Sigma \Delta Z_{\Phi} - (Z_{II}^r - Z_I^r) &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь каждая стереопара (1₁—1₂), (2₁—2₂), (3₁—3₂) формируется и обрабатывается независимо и распределение невязок (10) при равноточных измерениях выполняется равномерно в каждое приращение. Такая методика предпочтительнее фототриангуляционных построений, где, как известно, накопление ошибок происходит по закону двойного суммирования. Уравненные фотограмметрические координаты могут использоваться в качестве необходимых данных способа смещений.

Таковы основные пути реализации фотограмметрического определения оползневых смещений при использовании длиннофокусной фотокамеры.

Список литературы: 1. Добрынин Н. Ф. Общий случай формирования квазиснимков в наземной съемке. — Геодезия и фотограмметрия, 1983, № 11, с. 48—58. 2. Лобанов А. Н. Фотограмметрия. — М.: Недра, 1984. — 384 с. 3. Сердюков В. М. Фотограмметрия в промышленном и гражданском строительстве. — М.: Недра, 1977. — 200 с. 4. Финковский В. Я., Турук Д. Н. Стереофотограмметрический способ определения деформаций бортов и уступов карьера. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1979, вып. 30, с. 195—200.

Статья поступила в редколлегию 12. 02. 85
