Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LIX, вып. 1, 1969 г.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Г. З. Скоблов

Фотограмметрические методы широко используются в нетопографических целях и, в частности, в строительстве для определения деформаций инженерных сооружений. За последние годы появился ряд работ, посвященных этой теме, и в этой области накоплен некоторый опыт. Однако исследователи часто либо копируют методику и принципы аэрофотосъемки, что усложняет и затрудняет необходимые расчеты [1], либо упрощают метод до такой степени, что он становится пригоден только для архитектурных обмеров или для определения больших по абсолютному значению величин деформаций (2—3 *мм*) [3].

Выясним возможности повышения точности определения деформаций стереофотограмметрическим методом, учитывая особенности и специфику строительства. В связи с этим необходимо отметить следующие особенности, отличающие эту область использования стереофотограмметрии.

1. Определение не абсолютных координат точек объекта, а разностей координат (деформацию), возникающую за период между двумя съемками.

2. Необходимость выполнения съемок с близких расстояний, например менее 15 *м*.

3. Невозможность закрепления положения базиса съемки на местности (например, в связи с застройкой района при дол-

говременном контроле за поведением сооружения при эксплуатации).

4. Возможность, как правило, использовать нормальный случай съемки и съемки с одного базиса (одиночная модель).

Некоторые из вышеперечисленных особенностей заставляют предъявлять дополнительные требования к фотограмметрической съемочной аппаратуре, другие дают возможность разработать новую методику производства съемки и обработки результатов.

Опыт стереофотограмметрических работ показывает, что при определенном соотношении между размерами самого объекта и расстоянием до объекта при съемке (это соотношение устанавливается в каждом конкретном случае, но, как правило, не менее 1/40—1/50) пространственные размеры объекта можно определять с относительной ошибкой 0,5—1,0% [1]. Если объект снимать два раза, при условии, что все ошибки второй съемки будут равны ошибкам первой по знаку и величине, то очевидно, что значения фотограмметрических координат, полученных в результате двух съемок, совпадут. Расхождения в координатах идентичных точек в этом случае укажут на изменение положения объекта и будут являться величинами деформации. Можно утверждать, что относительная ошибка определения таких деформаций будет равна относительной ошибке определения координат точек объекта, полученных в результате первой съемки (0,5—1,0%).

Здесь имеют место как систематические, так и случайные ошибки. Все ошибки определения элементов внутреннего и внешнего ориентирования снимков систематические, что дает возможность определить отвечающие им поправки и ввести их в вычисленные значения фотограмметрических координат точек объекта.

Наиболее существенна ошибка измерения снимка, которая будет определяться качеством используемого материала (волнистость подложки, разрешающая способность и деформативность эмульсионного слоя), аберрацией объектива съемочной камеры (если она не учитывается) и непосредственно ошибками самого измерительного устройства.

Если предположить, что все систематические ошибки определения фотограмметрических координат учтены, то получим минимально возможную ошибку определения деформации $m\sqrt{2}\frac{Y}{f}$, где m — случайная ошибка измерения фотокоорди-

наты (измерения негатива); $\frac{Y}{f}$ — отношение, определяющее знаменатель масштаба изображения.

Так как официальные источники строительного производства задают характеристики материала и величины несущих способностей сооружения с точностью 5—10%, то в строительной физике величина деформации считается определенной с достаточной точностью при ошибке ±5% от абсолютного значения деформации [2]. В таком случае можно полагать, что при соблюдении неравенства $m\sqrt{2}\frac{Y}{f} \leqslant 0{,}5\Delta$, где Δ — абсолютное значение деформации, стереофотограмметрический метод является приемлемым для измерения деформаций.

Как указывалось, ошибки в определении элементов внутреннего и внешнего ориентирования снимков можно считать систематическими и поправки к элементам ориентирования можно определить с помощью контрольных точек на объекте, координаты которых известны и не изменяются в процессе съемки. При использовании «нормального» случая съемки поправки к элементам ориентирования находятся из решения выведенной нами системы уравнений вида

$$\Delta X = \Delta X_0 + \frac{2X}{f}\Delta f + \frac{X}{b}\Delta b + \frac{(b+X)(Y^2 \times X^2)}{bY}\Delta\varphi - \frac{X[Y^2+(X-b)^2]}{bY}\Delta\varphi_1 + \frac{XZ(b+X)}{bX}\Delta\omega - \frac{XZ(X-b)}{bY}\Delta\omega_1 + \frac{Z(b+X)}{b}\Delta\varkappa_2 - \frac{XZ}{b}\Delta\varkappa_1 + \frac{3X(X-b)}{fY}\Delta x_0; \quad (1)$$

$$\Delta Y = \Delta Y_0 + \frac{2Y}{Y}\Delta f + \frac{Y}{b}\Delta b + \frac{X^2+Y^2}{b}\Delta\varphi - \frac{(X-b)^2+Y^2}{b}\Delta\varphi_1 + \frac{XZ}{b}\Delta\omega - \frac{(X-b)Z}{b}\Delta\omega_1 + \frac{YZ}{b}\Delta\varkappa - \frac{YZ}{b}\Delta\varkappa_1 + \frac{2X-b}{f}\Delta x_0;$$

$$\Delta Z = \Delta Z_0 + \frac{2Z}{f}\Delta f + \frac{Z}{b}\Delta b + \frac{Z(bX+X^2+Y^2)}{bY}\Delta\varphi - \frac{Z[Y^2+(X-b)^2]}{bY}\Delta Y_1 + \frac{XZ^2+b(Z^2+Y^2)}{bY}\Delta\omega - \frac{Z^2(X-b)}{bY}\Delta\omega_1 + \frac{Z^2-bX}{b}\Delta\varkappa - \frac{Z^2}{b}\Delta\varkappa_1 + \frac{2Z(X-b)}{fY}\Delta x_0,$$

где X, Y, Z — вычисленные фотограмметрические координаты контрольной точки; ΔX, ΔY, ΔZ — расхождение между вычисленными и известными значениями фотограмметрических координат контрольной точки; ΔX_0, ΔY_0, ΔZ_0 — ошибки положения точки начала фотограмметрической системы координат; Δf — ошибка определения фокусного расстояния камеры; Δx_0 — ошибка определения фотокоординаты главной точки снимка; Δb — ошибка длины базиса съемки; $\Delta\varphi$, $\Delta\varphi_1$ — углы неперпендикулярности оптических осей камер (левой и правой) к базису съемки; $\Delta\omega$, $\Delta\omega_1$ — углы наклона оптических осей камер к горизонту; $\Delta\varkappa$, $\Delta\varkappa_1$ — углы крена.

Очевидно, для решения такой системы должны быть известны координаты четырех контрольных точек на объекте, каждая из которых даст возможность составить три уравнения. В случае последовательной серии фототеодолитных съемок, результаты первой съемки можно принять за истинные и отвечающие ей вычисленные значения фотограмметрических координат контрольных точек принять за безошибочные. Относительная ошибка определения координат, как указывалось выше, не будет превышать 0,5—1,0%.

Решение системы (1) в таком виде, как она записана, может иметь место лишь при небольших значениях углов $\Delta\varphi$, $\Delta\omega$ и $\Delta\varkappa$, но так как условия и особенности использования стереофотограмметрического метода не позволяют сохранить это требование, то возникает необходимость использовать другое решение.

Координаты одних и тех же точек, полученные в результате первой и любой из последующих съемок, могут считаться заданными в двух самостоятельных системах координат.

Координаты контрольной точки в первой системе обозначим XYZ, а во второй $X'Y'Z'$.

Если точки начала систем не совпадают, то перевычисление координат выполняется по формулам

$$\begin{aligned} X' &= Xa_1 + Ya_2 + Za_3 + \Delta X_0; \\ Y' &= Xb_1 + Yb_2 + Zb_3 + \Delta Y_0; \\ Z' &= Xc_1 + Yc_2 + Zc_3 + \Delta Z_0, \end{aligned} \qquad (2)$$

где a_i, b_i, c_i — направляющие косинусы; ΔX_0, ΔY_0, ΔZ_0 — координаты точки начала системы XYZ в координатной системе $X'Y'Z'$.

Величины направляющих косинусов можно выразить либо через соответствующие углы между координатными осями двух систем, либо через углы Эйлера.

Косинусы a_i, b_i, c_i связаны между собой известными из аналитической геометрии соотношениями (условиями), являющимися следствием того, что координатные оси любой прямоугольной системы образуют собой три прямых угла

$$\begin{gathered} a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 = 1; \\ b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 - 1; \\ c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 = 1; \\ a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3 = 0; \\ a_1 c_1 + a_2 c_2 + a_3 c_3 = 0; \\ b_1 c_1 + b_2 c_2 + b_3 c_3 = 0. \end{gathered} \tag{3}$$

Если систему уравнений (2) составить по четырем контрольным точкам и решать совместно с условиями (3), то вследствие наличия избыточных данных система решится с некоторыми остаточными погрешностями

$$\begin{gathered} X_i a_1 + Y_i a_2 + Z_i a_3 + \Delta X_0 + X_i' = \varepsilon_{X_i}; \\ X_i b_1 + Y_i b_2 + Z_i b_3 + \Delta Y_0 - Y_i' = \varepsilon_{Y_i}; \\ X_i c_1 + Y_i c_2 + Z_i c_3 + \Delta Z_0 - Z_i' = \varepsilon_{Z_i}; \\ a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 = 1; \\ b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 = 1; \\ c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 = 1; \qquad i = (1, 2, 3, 4) \\ a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3 = 0; \\ a_1 c_1 + a_2 c_2 + a_3 c_3 = 0; \\ b_1 c_1 + b_2 c_2 + b_3 c_3 = 0. \end{gathered} \tag{4}$$

По физическому смыслу появление величин ε_{X_i}, ε_{Y_i}, ε_{Z_i} объясняется прежде всего деформацией прямоугольной системы координат, возникшей из-за ошибок в принятых значениях

элементов внешнего и внутреннего ориентирования камер в момент съемки. Эти ошибки носят систематический характер, а формулы (1) позволяют найти изменение фотограмметрических координат из-за этих ошибок (или, другими словами, из-за деформации системы). Кроме того, величины ε_{X_i}, ε_{Y_i}, ε_{Z_i} будут включать в себя случайные ошибки определения фотограмметрических координат контрольных точек.

К случайным ошибкам относятся, главным образом, ошибки измерения снимка на приборе, и если измерение снимка производится с очень высокой точностью (1—2 *мкм*), то этими ошибками можно пренебречь, считая, что фотограмметрические координаты включают в себя только систематические ошибки. Используя вышеуказанное, приравняем ошибки к поправкам, и замечая, что ΔX_0, ΔY_0 и ΔZ_0 уже входят в систему (4), будем считать, что

$$\varepsilon_X = -(\Delta X - \Delta X_0);$$

$$\varepsilon_Y = -(\Delta Y - \Delta Y_0);$$

$$\varepsilon_Z = -(\Delta Z - \Delta Z_0)$$

и согласно (4)

$$\begin{aligned} X' &= Xa_1 + Ya_2 + Za_3 + \Delta X; \\ Y' &= Xb_1 + Yb_2 + Zb_3 + \Delta Y; \\ Z' &= Xc_1 + Yc_2 + Zc_3 + \Delta Z. \end{aligned} \qquad (5)$$

Для решения систему (5) записывают в развернутом виде, подставляя значения ΔX, ΔY и ΔZ из выражения (1).

Введение условий (3) в эту систему дало бы возможность найти случайные ошибки, появление которых неизбежно, но, как сказано выше, мы их не учитываем и поэтому не вводим эти условия. Иными словами, мы считаем допустимым, что условия (3) не будут точно удовлетворяться за счет случайных ошибок.

Если система (5), записанная в развернутом виде, представляет собой три уравнения одной контрольной точки, то, очевидно, для определения 21 неизвестного необходимо, как минимум, наличие 7 контрольных точек на объекте.

Для решения задачи на ЭСМ систему удобней записать в виде произведения квадратной матрицы на вектор, где элементами матрицы будут коэффициенты при неизвестных

в системе уравнений (1) и (5), а вектором — неизвестные a_i, b_i, c_i, ΔX_0, ΔY_0, ΔZ_0, Δf, Δb, $\Delta\varphi$, $\Delta\varphi_1$, $\Delta\omega$, $\Delta\omega_1$, $\Delta\varkappa$, $\Delta\varkappa_1$, Δx_0.

Величина деформации будет представлять собой разность координат идентичных точек объекта, приведенных к одной системе координат.

Очевидно, в полученное значение деформации будут входить случайные ошибки. Это могут быть либо физические погрешности построения фотоизображения, либо ошибки оператора и измерительного устройства. Действие этих погрешностей на точность определения деформаций можно установить только экспериментально. Для этого необходимо иметь на объекте избыточное число контрольных точек.

Анализируя физический смысл системы (5), можно сделать следующие замечания.

Решение системы в таком виде дает возможность производить перевычисление фотограмметрических координат всех последующих съемок в систему первой (т. е. нулевой) съемки при условии, что последующие съемки производятся любым случаем съемки, обеспечивающим параллельность оптических осей камер. Здесь имеется в виду, что контрольные точки, изображенные на снимках стереопары первой съемки, изображаются в каждой последующей.

Равнонаклоненный случай (вверх или вниз) можно привести к «нормальному» разворотом фотограмметрической системы координат вокруг оси X (на угол ω) с помощью коэффициентов a_i, b_i, c_i, которые определяются из решения системы. В случае разности высот съемочных камер с левого и правого концов базиса переход к «нормальному» случаю обеспечивается разворотом фотограмметрической системы координат вокруг оси Y с одновременным введением поправок за углы крена $\Delta\varkappa$ и $\Delta\varkappa_1$ двух снимков. Равноотклоненный случай — введением поправок $\Delta X_0 \Delta Y_0 \Delta Z_0$ и Δb. Причем надо отметить, что определение фотограмметрических координат точек каждой такой съемки можно производить по формулам «нормального» случая, что значительно упрощает процесс вычислений.

Одним из основных резервов повышений точности стереофотограмметрического метода является уменьшение ошибок при измерении фотоизображений.

Современные фотограмметрические измерительные приборы рассчитаны на стереоскопическое рассматривание снимков, так как в основном все приборы служат для измерения снимков земной поверхности с последующей рисовкой рельефа.

Кроме того, наличие стереоэффекта облегчает идентификацию точек при дешифрировании снимков или при наведении измерительной марки на недостаточно хорошо маркированный объект. Принято утверждать превосходство стереоскопического измерения снимков над монокулярным, причем считается, что точность стереоскопического измерения выше.

Это утверждение можно считать справедливым только при затруднении в идентификации измеряемых объектов на левом и правом снимках.

Опыт работ показывает, что раздельное измерение левого и правого снимков с последующим вычислением горизонтального параллакса, как разности фотокоординат, приводит к более точным результатам при достаточно хорошем качестве фотоизображения и соответствующей маркировке объекта.

Раздельное измерение стереопары, кроме повышения точности, дает возможность вносить поправки за «неприжим» в фотокоординаты левого и правого снимков. Неприжим часто встречается в практике фототеодолитной съемки и в некоторых случаях не позволяет обрабатывать снимки на стереоскопических измерительных приборах. Кроме того, при раздельном измерении стереопары отпадает вообще необходимость в использовании стереоскопических приборов, которые не всегда есть и требуют специальных навыков в обслуживании и эксплуатации. С другой стороны, раздельное измерение снимков требует, как уже сказано, тщательной маркировки объекта (для надежной идентификации измеряемых точек) и несколько увеличивает время измерений.

Можно считать, что возможность раздельного измерения стереопары является одной из особенностей использования стереофотограмметрии для определения деформаций.

Для измерения негативов лучше всего подходят универсальные измерительные микроскопы (УИМ-21, УИМ-23, УИМ-24), которые удобны в эксплуатации, имеют достаточно большой предел измерений и обладают высокой точностью ($\pm 0{,}1$ *мкм*), что в десятки раз выше точности любых стереоскопических приборов.

В таких случаях особое значение приобретает вопрос качества эмульсионного покрытия (зернистость, разрешающая способность), недостатки которого снижают точность наведения измерительной марки и, соответственно, измерения снимка.

Однако, исходя из опыта измерений негативного материала на УИМ-21 и УИМ-24, можно считать, что точность наведения на центр даже размытого (вследствие крупнозернистости

эмульсионного слоя) изображения марки объекта не хуже ± 2 *мкм*. Это объясняется тем, что человеческий глаз оценивает положение середины объекта гораздо легче его размытых краев. Необходимо отметить, что наведение измерительной маркой прибора в форме креста лучше производить на марку объекта в форме концентрических окружностей и наоборот, поэтому маркировку объекта следует производить с учетом типа измерительной марки микроскопа.

Дальнейшие разработки в области эмульсионных покрытий позволят измерять снимки с точностью, приближающейся к цене деления отсчетного устройства измерительного микроскопа (0,1 *мкм*).

В настоящее время точность определения деформации при масштабе изображения около 1 : 100 не поднимается выше $\pm 1{,}0$—$1{,}2$ *мм* [2]. Можно предположить, что при увеличении масштаба изображения до 1 : 15—1 : 20 точность определения величины деформации возрастет до $\pm 0{,}2$—$0{,}3$ *мм*.

Обрабатывая результаты фототеодолитной съемки масштаба 1 : 15—1 : 18 по методике, изложенной выше, автору удалось добиться точности определения деформации по трем ортогональным векторам $m_X = \pm 0{,}063$ *мм*, $m_Y = \pm 0{,}099$ *мм*, $m_Z = \pm 0{,}061$ *мм*.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аллам Мохамед Мосад. Стереофотограмметрия в архитектуре и возможности ее применения в строительстве. Автореферат канд. диссертации. МИИГАИК, 1967.

2. Безухов К. И. Испытание строительных конструкций и сооружений. Госстройиздат, 1954.

3. Брайт П. И. и др. Измерение осадок и деформаций сооружений геодезическими методами. Геодезиздат, 1959.