

Эти полиномы полностью не устраняют погрешностей координат точек маршрута. Пик на большинстве графиков спектральной плотности расположен на частоте 0,45 рад/ст для графиков полинома третьей степени и 0,9 для полиномов второй степени и конформного полинома. Это соответствует всей длине маршрута (13 стереопар) для полинома третьей степени и 7 стереопарам для полиномов второй степени и конформного. Второй пик на графиках спектральной плотности для полинома третьей степени намечается на частоте 3,1 рад/ст, т. е. погрешности при исключении деформации остаются уже на каждой второй стереопаре.

Сравнивая спектры погрешностей маршрутов, исключение деформаций которых приведено при помощи полиномов (6) и (8), можно отметить, что периодические составляющие погрешностей координат  $X$  и  $Y$  значительно меньше при использовании конформного полинома.

**Список литературы:** 1. *Буриштынская Х. В.* Исследование статистическим методом влияния случайных ошибок в маршрутной сети пространственной фототриангуляции. — *Геодезия и картография*, 1973, № 12. 2. *Венцель Е. С.* Теория вероятностей. — М.: Наука, 1969. 3. *Сергеев В. И.* Основы инструментальной точности электромеханических цепей. — М.: Изд-во АН СССР, 1963.

Работа поступила в редколлегию 25 января 1980 года.

УДК 528.73

О. Г. ПОДОПРИГОРА

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БЛОЧНОЙ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ, ПОСТРОЕННОЙ МЕТОДОМ ПРОДОЛЖЕНИЯ

На кафедре аэрофотогеодезии Львовского политехнического института разработан и исследован на макетном материале новый метод блочной аналитической фототриангуляции, названный методом продолжения. В этом методе применяется особая схема передачи высот, предложенная в 1938 г. М. Д. Коншиным применительно к стереометру Ф. В. Дробышева [3]. Опорные высотные точки располагаются по периметру блока так, чтобы крайние стереопары были обеспечены двумя высотными точками (рисунок), а угловые стереопары — тремя.

Первая стереопара первого маршрута ориентируется по трем опорным высотным точкам. Из ее решения получаем высоту связующей точки, которая используется в качестве опорной во второй стереопаре второго маршрута. Благодаря такой схеме расположения опорных точек уравниваемые высоты определя-

нат  
ной  
по-  
и и  
ута  
ам  
на  
ле-  
ис-  
ео-  
ие  
и  
и-  
и

емых точек свободны от влияния систематических погрешностей. Предполагается, что плановые координаты опорных высотных точек определены из плановой фототриангуляции, например, по аэрофотоснимкам более мелкого масштаба.

Этот метод, ранее использовавшийся при работе со стереометрами, разработан и усовершенствован для аналитической пространственной фототриангуляции. Основное звено в аналитическом методе — построение и уравнивание одиночной модели.

Процесс сводится к двум этапам: определение элементов взаимного ориентирования (ЭВО) стереопары и геодезическое ориентирование модели.

Первый этап решается ставшим уже классическим методом [1] по 9—16 ориентирным точкам, измеренным на сте-

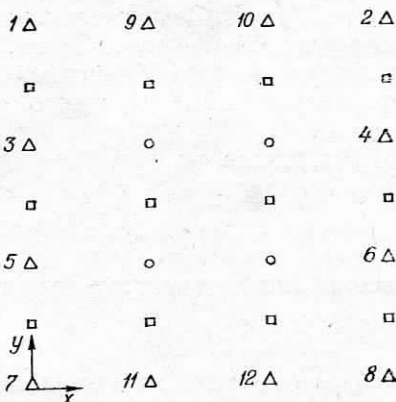


Схема блочной сети:

опорные (Δ) и связующие (○) точки в блоке размером 3×3 (три маршрута по три стереопары); □ — центры аэроснимков. Цифрами обозначены номера высотных точек.

реокомпараторе. Для этих точек составляют по одному уравнению погрешностей вида

$$a_i \delta \tau + b_i \delta \nu + c_i \delta \Delta \alpha + d_i \delta \Delta \omega + e_i \delta \Delta x + l_i = v_i, \quad (1)$$

где  $i$  — номер ориентирной точки;  $a, b, c, d, e$  — частные производные соответственно по неизвестным ЭВО [1].

Систему уравнений (1) решают методом наименьших квадратов, неизвестные ЭВО определяют из системы нормальных уравнений 5-го порядка:

$$AX + L = 0, \quad (2)$$

где  $A$  — матрица коэффициентов при неизвестных;  $X$  — вектор неизвестных ЭВО;  $L$  — вектор свободных членов.

Решение идет по методу итераций с автоматической отбраковкой ошибочных измерений.

Геодезическое ориентирование одиночной модели выполняется отдельно для плановых координат и высот точек.

Элементы внешнего ориентирования (ЭВнО), определяющие плановое положение модели, находят из системы шести уравнений погрешностей для трех опорных точек:

$$\begin{cases} a_{xi} \delta X_s + 0 + f_{xi} \delta \theta + g_{xi} \delta t + l_{xi} = v_{xi} \\ 0 + b_{yi} \delta Y_s + f_{yi} \delta \theta + g_{yi} \delta t + l_{yi} = v_{yi} \end{cases} \quad (3)$$

где  $i=1, 2, 3$  — номер опорной точки;  $\delta X_s, \delta Y_s, \delta \theta, \delta t$  — поправки в определяемые ЭВнО.

Определим коэффициенты условных уравнений:

$$a_X = 1; f_X = (a_2 X - a_1 Y) t; g_X = X_{\text{тр}};$$

$$b_Y = 1; f_Y = (b_2 X - b_1 Y) t; g_Y = Y_{\text{тр}};$$

$$l_X = X_S + X_{\text{тр}} - X_r; l_Y = Y_S + Y_{\text{тр}} - Y_r;$$

$$X_{\text{тр}} = (a_1 X + a_2 Y + a_3 Z) t; Y_{\text{тр}} = (b_1 X + b_2 Y + b_3 Z) t.$$

Направляющие косинусы  $a_i, b_i$  вычисляют по угловым ЭВНО модели  $\zeta, \eta, \theta$ . Вектор неизвестных находят из системы нормальных уравнений 4-го порядка. Процесс решения итерационный с автоматической браковкой ошибочных плановых координат опорных точек. Для первого приближения принимается, что  $\xi = \eta = 0$ .

Влияющие на высотное ориентирование модели ( $Z_S, \zeta, \eta$ ) ЭВНО определяют из решения уравнений погрешностей вида

$$c_{zi} \delta Z_S + d_{zi} \delta \zeta + e_{zi} \delta \eta + l_{zi} = v_{zi}, \quad (4)$$

составляемых для трех опорных точек, где коэффициенты:

$$c_Z = 1; d_Z = X_{\text{тр}}; e_Z = Y_{\text{тр}} \cos \zeta; l_Z = Z_S + Z_{\text{тр}} - X_r.$$

Для определения входящих в эти формулы величин используют уже определенные в первом приближении плановые ЭВНО. Вектор неизвестных получают из системы нормальных уравнений 3-го порядка. Найденные в первом приближении  $Z_S, \zeta, \eta$  используют для повторного планового ориентирования модели, в котором уточняют элементы  $X_S, Y_S, \theta, t$ . Уточненные плановые ЭВНО участвуют во втором приближении высотного ориентирования, из которого вычисляют окончательные значения элементов  $Z_S, \zeta, \eta$ .

Такой метод геодезического ориентирования модели обеспечивает высокую точность определения высот точек в одиночной модели, исключает влияние погрешностей плановых координат опорных и связующих точек на нахождение высот, так как плановые координаты обычно определяются грубее.

Таким образом строят все стереопары первого маршрута. В последней стереопаре получают невязку на опорной точке № 4. Невязку распределяют вдоль маршрута пропорционально отстоянию  $i$ -й точки от точки № 3 по формуле

$$v_i' = \frac{t'}{(X_4 - X_3)(Y_2 - Y_4)} [(X_i - X_3)(Y_i - Y_4)], \quad (5)$$

где  $v_i'$  — поправка в точку с координатами за продольное уравнение;  $t'$  — невязка на конечной точке маршрута;  $X_3, X_4, Y_2, Y_4$  — координаты опорных точек уравниваемого маршрута.

После построения и продольного уравнивания последнего маршрута получим невязки на опорных точках № 11 и 12. Не-

вязки распределяем поперек блока пропорционально отстоянию уравниваемых точек от северного края блока (точки № 9, 12) по формуле

$$v_i'' = \frac{t''}{(X_{12} - X_{11})(Y_9 - Y_{11})} [(X_i - X_{11})(Y_9 - Y_i)], \quad (6)$$

где  $v_i''$  — поправка в текущую точку с координатами  $X_i, Y_i$ ;  $t''$  — невязка на соответствующей опорной точке из южного ряда;  $X_{11}, X_{12}, Y_9, Y_{11}$  — координаты соответствующих точек (индексация соответствует уравниванию вдоль линии № 9—11, рисунок).

Координаты  $X, Y$  относятся к фотограмметрической системе координат блока (рисунок).

Описанный алгоритм реализован в программе блочной пространственной фототриангуляции в кодах ЭВМ «М-222», применяемой для сгущения опорной высотной сети при крупномасштабном картографировании небольших по площади участков местности (преимущественно для мелиоративного строительства).

Теоретические и макетные статистические исследования блочной фототриангуляции свидетельствуют, что в уравненных высотах точек отсутствуют систематические погрешности, а остаточные погрешности представляют собой случайную последовательность, близкую к нормальной [2]. Параметры остаточных погрешностей имеют лучшие показатели в блоках квадратной формы. Это обусловлено, во-первых, видом корреляционной функции, характером зависимости погрешностей связующих точек вдоль и поперек блока. Во-вторых, тем, что при вытянутом блоке на продольные маршруты влияет прогиб маршрута, не устранимый при поперечном уравнивании.

Апробирование методики на производственном материале проводили на опытном полигоне размером  $4 \times 3$  км<sup>2</sup>, на котором определены и замаркированы 140 высотных опознаков, расположенных в углах прямоугольников со сторонами  $B_x$  и  $B$  и базисов аэросъемки, покрывающей опытный полигон. Аэросъемка выполнена АФА-ТЭ с  $f_k = 100$  мм с высоты  $H = 500$  м. Масштаб аэросъемки 1 : 5000. Участок покрыт шестью маршрутами по десять стереопар с продольным перекрытием 65% и поперечным 35%. Местность на участке работ всхолмленная, перепад высот на стереопаре составляет 10...15 м.

На этот участок разбивали три сети блочной фототриангуляции размерами  $3 \times 3, 4 \times 4, 5 \times 5$ . Высотные опознаки, расположенные по краям блока, использовали как опорные точки, остальные — как контрольные. Точность высот опознаков составляла  $\pm 1$  см, поэтому высоты опорных и контрольных точек считали безошибочными. Стереопары измеряли на СК 1818 с точностью измерения поперечных параллаксов  $m_q = \pm 0,007$  мм. Точность отождествления связующих точек составила  $m_c =$

Характеристики рядов остаточных погрешностей уравненных

| Размер блока | Количество контрольных точек | Центральные моменты, м |         |         |         |
|--------------|------------------------------|------------------------|---------|---------|---------|
|              |                              | $\mu_1$                | $\mu_2$ | $\mu_3$ | $\mu_4$ |
| 3×3          | 22                           | -0,03                  | +0,02   | 0,00    | 0,00    |
| 4×4          | 26                           | +0,10                  | +0,04   | +0,01   | 0,00    |
| 5×5          | 43                           | 0,00                   | +0,06   | 0,00    | +0,01   |

$= \pm 0,025$  мм. В табл. 1 приведены статистические характеристики рядов погрешностей в каждом из блоков.

Анализируя эти результаты, видим, что ряд погрешностей из пентаплета наиболее соответствует нормальному закону. Здесь полностью отсутствуют систематические погрешности ( $\mu_1 = \mu_3 = 0$ ), отношение стандарта к средней погрешности строго равно теоретическому (1,25), а эксцесс и асимметрия практически равны нулю.

Ряд погрешностей из триплета также близок к нормальному распределению.

Наибольшие отклонения от нормального закона наблюдаются в блоке 4×4, что объясняется видом корреляционной матрицы, полученной из макетных исследований. На расстоянии четырех базисов фототриангулирования еще имеется значительная корреляция между первой и последней связующими точками, что при продольном и поперечном уравнивании приводит к смещению оценок ряда погрешностей.

При размере блока 5×5 и более такие корреляционные связи отсутствуют, что и видно из проведенных исследований.

Сравним полученные значения средних квадратических ошибок с теоретическими. Последние вычислим по формулам проф. Романовского [3]

$$m_H = \pm \frac{\sqrt{2}}{4} n m_h; \quad (7)$$

$$m_h = \pm \frac{Z}{b} m_q, \quad (8)$$

где  $m_H$  — средняя квадратическая погрешность построения блока по высоте;  $n$  — размер квадратного блока;  $m_h$  — средняя квадратическая погрешность определения превышения в пределах стереопары.

Для нашего случая  $Z = 500$  м,  $b = 65$  мм,  $m_q = 0,015$  мм, тогда  $m_h = \pm 0,115$  м.

Уклонение реальных средних квадратических погрешностей от теоретических в пределах 25% объясняется тем, что в качестве опорных высотных точек в реальных сетях использовали не только геодезические высотные точки с точностью  $m_H =$

Таблица 1

высот точек блочных сетей фототриангуляции

| Стандарт<br>$\sigma$ , м | Погреш-<br>ность<br>стандар-<br>та, м | Средняя<br>погреш-<br>ность $\delta$ , м | $\alpha/\delta$ | Эксцесс | Погреш-<br>ность<br>эксцесса | Асимметрия | Погреш-<br>ность асим-<br>метрии |
|--------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|-----------------|---------|------------------------------|------------|----------------------------------|
| $\pm 0,15$               | $\pm 0,03$                            | $\pm 0,12$                               | 1,27            | $+1,05$ | $\pm 1,0$                    | $+1,08$    | $\pm 1,04$                       |
| $\pm 0,20$               | $\pm 0,04$                            | $\pm 0,16$                               | 1,23            | $-0,21$ | $\pm 1,0$                    | $+2,18$    | $\pm 1,48$                       |
| $\pm 0,25$               | $\pm 0,04$                            | $\pm 0,20$                               | 1,25            | $-0,17$ | $\pm 0,77$                   | $+0,01$    | $\pm 0,08$                       |

$= \pm 0,01$  м, но и опознаки, высоты которых определяли фотограмметрическим путем  $m_H = \pm 0,15$  см. Поэтому наблюдается незначительное снижение точности относительно теоретической.

Таким образом, результаты фотограмметрического сгущения методом блочной фототриангуляции на производственном материале подтвердили достоверность теоретических и макетных исследований данного метода.

Блочную фототриангуляцию методом продолжения можно применять при создании карт крупных масштабов на небольшие участки местности, например, для целей мелиорации.

Таблица 2

Сравнение теоретических и эмпирических погрешностей блочных сетей

| Размер блока | Теоретические значения погрешностей   |                           | Экспериментальные данные              |                           |
|--------------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
|              | средняя квадратическая погрешность, м | относительная погрешность | средняя квадратическая погрешность, м | относительная погрешность |
| 3×3          | $\pm 0,12$                            | $\frac{1}{4100}$          | $\pm 0,15$                            | $\frac{1}{3300}$          |
| 4×4          | $\pm 0,16$                            | $\frac{1}{3100}$          | $\pm 0,20$                            | $\frac{1}{2500}$          |
| 5×5          | $\pm 0,20$                            | $\frac{1}{2500}$          | $\pm 0,25$                            | $\frac{1}{2000}$          |

Уравненные высоты точек сети свободны от влияния систематических погрешностей, ряд остаточных погрешностей по распределению близок к нормальному закону.

Наиболее выгодны квадратные блоки размером пять маршрутов по пять стереопар.

Резерв повышения точности определения высот точек сети — повышение точности отождествления связующих точек. Если последние замаркировать специальными маркирующими приборами на диапозитивах с  $m_c = \pm 0,01$  мм, то высоты точек определяются в два раза точнее.

Список литературы: 1. Лобанов А. Н. Аналитическая фотограмметрия. — М.: Недра, 1972. 2. Подопригора О. Г. Об одном из методов исключения систематических погрешностей из высот точек блочной фототриангуляции № 3092—79 Деп. 3. Романовский Г. В. Способ неискаженной модели. — М.: Воениздат, 1948.

Работа поступила в редколлегию 12 октября 1979 года.

УДК 528.711.1

В. М. СЕРДЮКОВ, Г. Б. ЛЫСОВ

## ОСОБЕННОСТИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ С БЛИЗКИХ РАССТОЯНИЙ

Применение фототеодолитов с постоянным фокусным расстоянием для съемки объектов с близких расстояний ограничивается границами и глубиной разности изображения.

Минимальное расстояние, при котором изображение еще получается резким, для измерительных целей определяют обычно по известной формуле

$$D = F/\delta \cdot d/F, \quad (1)$$

где  $\delta$  — диаметр допустимого кружка нерезкости;  $d/F$  — относительное отверстие объектива фотокамеры.

Расстояние  $D$  называют гиперфокальным, оно соответствует расстоянию до точки на оптимальной оси фотокамеры, начиная от которого изображение считается резким при заданном диаметре кружка нерезкости.

Уменьшить минимальное расстояние можно путем диафрагмирования с изменением (увеличением) фокусного расстояния фотокамеры, выдвигая объектив или перемещая прикладную рамку фототеодолита. Как правило, в этих случаях требуется специальное переоборудование фототеодолита.

Расстояние до объекта можно также уменьшить, сокращая фокусное расстояние объектива, что достигается или его заменой на другой, или применением насадочных линз\*.

\* При киносъемке применяют объективы с переменным фокусным расстоянием, основанные на принципе изменения оптического интервала линз линзами объектива, однако они все узкоугольные и не могут быть использованы для фототеодолитов.