

АЭРОФОТОСЪЕМКА

УДК 528.732;681.142

У. Д. САМРАТОВ, Г. Н. ЕФИМОВ

МЕТОД АНАЛИТИЧЕСКОЙ ФОТОПОЛИГОНОМЕТРИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭВМ «УРАЛ-2»

Для учета и планировки приусадебных земель сельских населенных пунктов в Среднеазиатском аэрофотогеодезическом предприятии «Сельхозаэрофотосъемка» Министерства сельского хозяйства СССР был освоен выпуск фотопланов масштаба 1:5000 с использованием аэронегативов залета масштаба 1:17500. Выпуск фотопланов данного масштаба осуществлялся на основе разработанного аналитического метода сгущения планового обоснования, который получил название метода аналитической фотополигонометрии.

Принцип сгущения планового обоснования заключается в измерении по аэронегативам фотограмметрических координат X, Y , параллаксов P, Q главных, связующих и опорных точек относительно левого центра стереопары, в построении фотополигонометрического хода по способу ЦНИИГАиК [3] и в аналитической засечке определяемых точек с вершин хода. Построенная таким образом сеть по опорным точкам может быть вычислена в геодезической системе координат.

Технология сгущения планового обоснования методом аналитической фотополигонометрии включает

1. Рабочее проектирование.
2. Измерение фотограмметрических координат и параллаксов главных, связующих точек и опознаков, а также измерение расстояний между координатными метками по оси xx аэроснимка.
3. Вычисление сетей аналитической фотополигонометрии в фотограмметрической или геодезической системе координат на электронной вычислительной машине «Урал-2».

1. В процессе рабочего проектирования подбирается материал, необходимый для последующей обработки: репродукции накидного монтажа с исполненным проектом привязки для выпуска фотопланов в масштабе 1:10000, аэроснимки с точками полевой подготовки и каталоги координат этих же точек, паспорта залетов и характеристики аэрофотоаппаратов (фокусное расстояние и расстояния между координатными метками прикладной рамки). На репродукции накидного монтажа составляется проект сгущения планового обоснования. Населенный пункт может располагаться на одном, двух и трех маршрутах. В каждом отдельном случае необходимо использовать все возможности для включения в проект сгущения планового обоснования не менее трех точек полевой подготовки. После этого все запроектированные точки накалываются на негативах. Наколка главных точек производится в пересечении линий, соединяющих координатные метки. Так как коэффициент редуцирования сетей равен 3,5, то к наклке точек предъявляются высокие требования. Стереоскопическое отождествление точек

на стереокомпараторе дает возможность достигнуть того, что ошибка переколки точек с маршрута на маршрут составляет не более 0,05 мм.

Если на населенный пункт нет точек полевой подготовки, то сеть развивается в фотограмметрической системе координат. При этом в показания радиовысотомера вводится коэффициент K , учитывающий его систематическую ошибку. Систематическая ошибка радиовысотомера определяется после обработки достаточно большого количества (10—15) населенных пунктов, имеющих точки полевой подготовки [7].

Для определения допустимого числа базисов в маршруте используется известная формула средней квадратической ошибки точки в середине сети:

$$M = \pm \frac{R}{\sqrt{2}} \sqrt{0,25 m_s^2 (n + 3,2) + 0,04 b^2 \frac{m_\epsilon^2}{\rho^2} (n^3 + 5,5n) + 4,22 b^2 \frac{m_\epsilon^2}{\rho^2}},$$

где n — число базисов хода; $m_s = \pm 1',4$ — средняя квадратическая ошибка начального направления; $m_\epsilon = \pm 1',9$ — средняя квадратическая ошибка направления на связующую точку при их стереоскопическом отождествлении и аналитическом вычислении; m_s — средняя квадратическая ошибка определения базиса.

Ошибки m_ϵ и m_s' получились в наших расчетах значительно меньшими ошибок, приводимых Н. П. Кожевниковым [4]. Это объясняется тем, что углы и направления при методе аналитической фотополигонометрии измеряются, а затем вычисляются по способу, изложенному проф. А. Н. Лобановым [5].

При аэрофотосъемке с фокусным расстоянием аэрокамеры $f = 200$ мм, масштабе залета $m = 17500$, продольном перекрытии $P = 60\%$ и числе базисов n ошибки M характеризуются следующими величинами, приведенными ниже:

Тип радиовысотомера	РВД, РВД-А
Ошибка определения высоты фотографирования, $\pm m_H, \text{ м}$	$\pm 1,2$
Ошибка определения базиса, $\pm m_B, \text{ мм}$	$\pm 0,09$
Ошибки $M, \text{ мм}$ при числе базисов n	
2	0,20
4	0,25
6	0,31
8	0,43

Задаваясь величиной средней квадратической ошибки положения точки в середине сети, равной 0,35 мм, из приведенных данных можно вывести, что при развитии двух- и трехмаршрутных сетей количество базисов между опознаками не должно быть более 4, то есть на 2 базиса меньше допустимого [6, стр. 16], а при развитии одномаршрутного хода — не более 6. Кроме того, соответствующие расчеты показали, что использование показаний радиовысотомера РВ-10 не дает удовлетворительных результатов. Поэтому развитие сетей аналитической фотополигонометрии при коэффициентах увеличения $R = 3,5$ возможно только по показаниям радиовысотомеров РВД или РВД-А.

2. Измерения производятся на стереокомпараторе 1818 «Цейсс». Стереопара ориентируется по начальным направлениям, марка последовательно наводится на все спроектированные точки в порядке, соответствующем нумерации стандартных точек 1, 2, 3, 4, 5, 6 и затем на все остальные точки. Отсчеты V_x, V_1, V_P, V_Q по всем счетчикам прибора записываются в специальный бланк. Измерения выполняются дважды одним исполнителем на двух разных бланках. Результаты двукратных измерений сравниваются контролирующим лицом, и в случае допустимых расхождений между отсчетами (0,04 мм) на одном из

этих бланков выводятся средние значения результатов измерений, по которым и производится перфорирование информации на населенный пункт.

Координаты определяемых точек вычисляются по программе, составленной для электронной вычислительной машины «Урал-2». Процесс вычисления координат точек можно разбить на три этапа.

На первом этапе вычисляются фотограмметрические координаты всех точек в системе координат отдельного маршрута, началом которой принимается положение главной точки первого аэроснимка маршрута. Причем ось абсцисс xx совмещена с направлением базиса первой стереопары. Обработка текущей стереопары производится стандартно: фотограмметрические координаты точек приводятся к системе с началом в главной точке левого снимка стереопары, вычисляются центральные направления на определяемые точки, проведенные из главных точек левого и правого аэроснимков стереопары; эти направления исправляются за условие горизонта (начиная со второй пары маршрута), вычисляется угол поворота текущей пары относительно предшествующей. Рельеф, при котором за вершину направлений принимается главная точка аэроснимка, не должен превышать величин, вычисляемых по формуле [1].

$$h_m \leq t \cdot \frac{m}{\operatorname{tg} \alpha} \cdot 10^{-3},$$

где $t=0,05$ мм — ошибка стереоскопического согласования точек; α — угол наклона аэроснимков.

Пусть $\alpha = 1^\circ$, $m=17500$, тогда $h=50$ метров.

Если превышения на стереопару больше 50 метров, то за вершину направлений необходимо принимать условную точку надира.

Элементы взаимного ориентирования определяются по формуле:

$$\frac{xy'}{f} \tau_n - \frac{x'y}{f} \tau_n - \frac{yy'}{f} \omega + q = 0.$$

Левый и правый базисы исправляются за наклон, затем по показаниям радиовысотомера (РВД или РВД-А) базисы приводятся к заданному масштабу. Вычисляется дирекционный угол линии базиса, фотограмметрические координаты главной точки правого аэроснимка, а также координаты четырех связующих точек путем засечки их с концов базиса (по формуле котангенсов углов). Производится анализ расхождений в координатах связующих точек. В случае допустимых расхождений (0,5 мм в масштабе плана) выводятся средние значения координат связующих точек. Осуществляется переход к следующей стереопаре. По вышеуказанной схеме обрабатывается каждый маршрут. Одновременно накапливается сумма квадратов расхождений координат связующих точек, по которой вычисляется средняя квадратическая ошибка определения связующих точек.

На втором этапе вычислений решается задача по приведению всех маршрутов сети к единой фотограмметрической системе координат и одному масштабу. Система координат общей сети совмещена с системой координат верхнего (северного) маршрута. В связи с тем, что истинный масштаб сетей приближителен, вероятное отношение масштабов между маршрутами принимаем равным 1 при условии, что сумма отклонений этих отношений от 1 должна быть равна нулю. Такой переход может быть осуществлен благодаря наличию связующих точек между маршрутами. При этом должно быть выполнено условие:

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= (x \cdot \cos \Theta - y \cdot \sin \Theta) \cdot r + a = (x' \cdot \cos \Theta' - y' \cdot \sin \Theta') \cdot r' + a' \\ \bar{y} &= (x \cdot \sin \Theta + y \cdot \cos \Theta) \cdot r + b = (x' \cdot \sin \Theta' + y' \cdot \cos \Theta') \cdot r' + b' \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где Θ , r — соответственно угол поворота и коэффициент изменения масштаба условной системы предшествующего хода относительно общей системы сетей; Θ' , r' — те же величины условной системы текущего хода относительно общей системы; $\bar{x}$, $\bar{y}$; x , y ; x' , y' — координаты одной и той же точки соответственно в общей системе координат, в системе координат предшествующего и текущего маршрутов; a , b ; a' , b' — постоянные поправки в координаты соответственно предшествующего и текущего маршрутов при переходе к общей системе координат.

Однако условие (1) не может быть использовано из-за громоздкости решения задачи. Поэтому следует применить метод последовательных приближений. Для этого видоизменим условие (1):

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \bar{x}_0 + d\bar{x}_0 = \bar{x}_0' + d\bar{x}_0', \\ \bar{y} &= \bar{y}_0 + d\bar{y}_0 = \bar{y}_0' + d\bar{y}_0', \\ \left. \begin{aligned} d\bar{x}_0 - d\bar{x}_0' + \bar{x}_0 - \bar{x}_0' &= v_x, \\ d\bar{y}_0 - d\bar{y}_0' + \bar{y}_0 - \bar{y}_0' &= v_y, \end{aligned} \right\} \quad (2)\end{aligned}$$

или

где

$$\begin{aligned}\bar{x}_0 &= \bar{x}_0 \cdot r_0 + a_0; \\ \bar{y}_0 &= \bar{y}_0 \cdot r_0 + b_0, \\ \bar{x}_0' &= \bar{x}_0' \cdot r_0' + a_0' \\ \bar{y}_0' &= \bar{y}_0' \cdot r_0' + b_0'; \\ \bar{x}_0 &= x \cdot \cos \Theta_0 - y \cdot \sin \Theta_0; \\ \bar{y}_0 &= x \cdot \sin \Theta_0 + y \cdot \cos \Theta_0; \\ \bar{x}_0' &= x' \cdot \cos \Theta_0' - y' \cdot \sin \Theta_0'; \\ \bar{y}_0' &= x' \cdot \sin \Theta_0' + y' \cdot \cos \Theta_0' .\end{aligned}$$

После дифференцирования и перехода к обозначениям уравнение (2) может быть записано в виде условных уравнений:

$$\begin{aligned}A_x \cdot da + B_x \cdot db + C_x \cdot d\Theta + D_x \cdot dr + A_x' \cdot da' + B_x' \cdot db' + C_x' \cdot d\Theta' + \\ + D_x' \cdot dr' + L_x = v_x; \\ A_y \cdot da + B_y \cdot db + C_y \cdot d\Theta + D_y \cdot dr + A_y' \cdot da' + B_y' \cdot db' + C_y' \cdot d\Theta' + \\ + D_y' \cdot dr' + L_y = v_y,\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}A_x &= -1, \quad B_x = 0, \quad A_y = 0, \quad B_y = -1; \\ A_x' &= 1, \quad B_x' = 0, \quad A_y' = 0, \quad B_y' = 1; \\ C_x &= \bar{y}_0 \cdot r_0 \cdot 2\pi, \quad C_x' = -\bar{y}_0' \cdot r_0' \cdot 2\pi, \\ C_y &= -\bar{x}_0 \cdot r_0 \cdot 2\pi; \quad C_y' = \bar{x}_0' \cdot r_0' \cdot 2\pi, \\ D_x &= -\bar{x}_0, \quad D_y = -\bar{y}_0, \quad D_x' = \bar{x}_0', \quad D_y' = \bar{y}_0', \\ L_x &= \bar{x}_0' \cdot r_0' + a_0' - \bar{x}_0 \cdot r_0 - a_0, \quad L_y = \bar{y}_0' \cdot r_0' + b_0' - \bar{y}_0 \cdot r_0 - b_0.\end{aligned}$$

Практически после трех приближений наблюдается сходимость итеративного процесса.

Для однозначного решения уравнений накладывается условие

$$\sum_{i=1}^{i=n} dr_i = 0.$$

От условных уравнений переходим к нормальным, решая которые, получаем:

в первом приближении

$$a_{0_i} = 0; \quad b_{0_i} = 0; \quad r_{0_i} = 1; \quad \Theta_{0_i} = 0,$$

где $i=1, 2, \dots, n$; n — количество ходов (причем для $i=1$: $a_1=0$, $b_1=0$, $\Theta_1=0$), в пятом приближении находим:

$$a_i = a_{0_i} + \sum_{\kappa=1}^{\kappa=5} da_{\kappa},$$

$$b_i = b_{0_i} + \sum_{\kappa=1}^{\kappa=5} db_{\kappa},$$

$$r_i = r_{0_i} + \sum_{\kappa=1}^{\kappa=5} dr_{\kappa},$$

$$\Theta_i = \Theta_{0_i} + \sum_{\kappa=1}^{\kappa=5} d\Theta_{\kappa}.$$

Точки каждого маршрута перевычисляются в общую систему фотограмметрических координат:

$$\bar{x} = (x_i \cdot \cos \Theta_i - y_i \cdot \sin \Theta_i) \cdot r_i + a_i,$$

$$\bar{y} = (x_i \cdot \sin \Theta_i + y_i \cdot \cos \Theta_i) \cdot r_i + b_i.$$

Координаты связующих между маршрутами точек получаются дважды, из них выводятся средние значения. Величины расхождения координат этих точек характеризуют точность построения ходов.

На третьем этапе производится плановое геодезическое ориентирование фотограмметрической системы координат по опорным точкам. Предварительно с помощью прямых засечек с концов базисов вычисляются фотограмметрические координаты опознаков. Геодезическое ориентирование производится по формулам:

$$X = (\bar{x} \cdot \cos \Theta_r + \bar{y} \cdot \sin \Theta_r) \cdot R + A,$$

$$Y = (\bar{x} \cdot \sin \Theta_r - \bar{y} \cdot \cos \Theta_r) \cdot R + B,$$

или

$$X = \bar{X}_0 + d\bar{X}_0,$$

$$Y = \bar{Y}_0 + d\bar{Y}_0.$$

где

$$\bar{X}_0 = (\bar{x} \cdot \cos \Theta_{0r} + \bar{y} \cdot \sin \Theta_{0r}) \cdot R_0 + A_0,$$

$$\bar{Y}_0 = (\bar{x} \cdot \sin \Theta_{0r} - \bar{y} \cdot \cos \Theta_{0r}) \cdot R_0 + B_0,$$

Перейдем к условным уравнениям:

$$A_X \cdot dR + B_X \cdot dA + C_X \cdot dB + D_X \cdot d\Theta_r + L_X = v_x,$$

$$A_Y \cdot dR + B_Y \cdot dA + C_Y \cdot dB + D_Y \cdot d\Theta_r + L_Y = v_y,$$

где

$$A_X = \frac{X_0 - A_0}{R_0}, \quad A_Y = \frac{Y_0 - B_0}{R_0},$$

$$B_X = 1, \quad B_Y = 0,$$

$$C_X = 0, \quad C_Y = 1,$$

$$D_X = (B_0 - Y_0) \cdot 2\pi, \quad D_Y = (X_0 - A_0) \cdot 2\pi,$$

$$L_X = \bar{X}_0 - X, \quad L_Y = \bar{Y}_0 - Y.$$

Величины A_0 , B_0 , Θ_{0r} определяются с помощью первой пары опознаков:

$$A_0 = X_1 - (\bar{x}_1 \cdot \cos \Theta_{0r} + \bar{y}_1 \cdot \sin \Theta_{0r}),$$

$$B_0 = Y_1 - (\bar{x}_1 \cdot \sin \Theta_{0r} - \bar{y}_1 \cdot \cos \Theta_{0r}),$$

$$\Theta_{0r} = \arctg \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} + \arctg \frac{\bar{y}_2 - \bar{y}_1}{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}.$$

Перейдем от условных уравнений к нормальным, решив которые, получим дифференциальные поправки к величинам A_0 , B_0 , R_0 , Θ_{0r} . После третьего приближения получим окончательные значения неизвестных:

$$A = A_0 + \sum_{\kappa=1}^{\kappa=3} dA;$$

$$B = B_0 + \sum_{\kappa=1}^{\kappa=3} dB;$$

$$\Theta_r = \Theta_{0r} + \sum_{\kappa=1}^{\kappa=3} d\Theta_r;$$

$$R = R_0 + \sum_{\kappa=1}^{\kappa=3} dR,$$

где K — номер приближения.

После трех приближений процесс итерации сходится. После этого фотограмметрические координаты точек перевычисляются в геодезическую систему:

$$X_i = (\bar{x}_i \cdot \cos \theta_r + \bar{y}_i \cdot \sin \theta_r) R + A,$$

$$Y_i = (\bar{x}_i \cdot \sin \theta_r - \bar{y}_i \cdot \cos \theta_r) R + B.$$

По величинам уклонений вычисленных геодезических координат от исходных можно судить об окончательной точности построения сетей. На этом процесс вычислений заканчивается.

Программа предусматривает выдачу на печать: количества расхождений между приведенными к заданному масштабу базисами, величин незамыкания горизонта, количества расхождений между координатами связующих точек, полученных из двух стереопар, расхождений между координатами одноименных точек смежных маршрутов. На печать выдаются коэффициенты масштабирования сетей при переходе от фотограмметрической системы координат к геодезической, по которым можно получить коэффициент систематической ошибки радиовысотомера. И, наконец, на печать выдаются геодезические координаты определяемых точек.

По вышеописанной технологии нами было обработано 13 населенных пунктов. Масштаб залета аэронегативов 1 : 17 500, масштаб выпуска фотопланов 1 : 5000. На данный массив имелись показания радиовысотомера РВТД. Проект сгущения планового обоснования методом фотополигонометрии был составлен таким образом, чтобы каждый населенный пункт обеспечивался не менее чем тремя плановыми опознаками. Ниже приведены данные об основных ошибках сетей по отдельным этапам обработки ходов аналитической фотополигонометрии, анализ которых показывает, что метод аналитической фотополигонометрии обеспечивает достаточную точность положения определяемых точек.

Количество расхождений между приведенными к масштабу плана базисами

Всего	50
В том числе до 1,5 м	43
1,5—2,0 м	7

Количество незамыканий горизонта

Всего	34
В том числе до 5'0	31
5'0—6,0	3

Количество расхождений в двойных засеках

Всего	68
В том числе до 2,5 м	66
2,5—3,0 м	2

Количество расхождений в положении общих точек между маршрутами

Всего	29
В том числе до 3,0 м	20
3,0—3,5 м	4
3,5—4,0 м	5

Количество расхождений между вычисленными и заданными координатами опознаков

Всего	19
В том числе до 1,5 м	10
1,5—2,0 м	7
2,0—2,5 м	2

По данным планово-финансового отдела предприятия, стоимость 1 кв. км при изготовлении фотопланов сельских населенных пунктов в масштабе 1 : 5000 предлагаемым методом составляет 150 рублей по третьей категории сложности, а стоимость этой же площади при горизонтальной теодолитной съемке — 245 рублей [8, стр. 43].

Результаты выполненных производственных работ показывают, что метод аналитической фотополигонометрии позволяет:

- а) использовать аэронегативы масштаба 1:17 500 для выпуска фотопланов 1:5000 масштаба;
- б) обрабатывать сети протяженностью до 6 базисов, причем схема расположения опознаков может быть произвольной;
- в) масштабировать сети только по показаниям радиовысотометров РВТД или РВТД-А, если не имеется геодезической опоры; кроме того, метод аналитической фотополигонометрии не требует наличия высотных опознаков, необходимых для горизонтирования модели при аналитическом фототриангулировании;
- г) использовать сравнительно простые и дешевые приборы (стереокомпараторы);
- д) обрабатывать в короткий срок значительные объемы работ;
- е) повысить производительность труда и сократить стоимость работ по сгущению планового обоснования примерно в 1,5 раза .

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобир Н. Я. Фотограмметрия. Изд-во «Недра», М., 1965.
2. Дейнеко В. Ф. Изготовление точных фотопланов при использовании больших коэффициентов увеличения. Труды МИИЗ, вып. 20, 1963.
3. Кожевников Н. П. Фотополигонометрия. Труды ЦНИИГАиК, вып. 100. Геодезиздат, М., 1954.
4. Кожевников Н. П. [и др.]. Фотограмметрия. Геодезиздат, М., 1960.
5. Лобачев А. Н. Фототопография. Изд. ВИА. М., 1957.
6. Наставление по топографической съемке в масштабах 1:10 000 и 1:25 000. Часть 2. Геодезиздат, М., 1957.
7. Наставление по топографическим съемкам в масштабах 1:10 000 и 1:25 000. Часть 2. Камеральные работы. Изд-во «Недра», М., 1965.
8. Сборник цен на проектные и изыскательные работы для строительства. Часть 1. М., 1967.

Работа поступила
11 декабря 1967 г.