

УДК: 528.71:528.9

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОСТРОЕНИЯ СЕТЕЙ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ
НА ЦИФРОВОЙ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

канд. техн. наук, доц. А.А. МИХЕЕВА, А.А. ЛУКЯН, канд. техн. наук В.В. ЯЛТЫХОВ
(Полоцкий государственный университет)

Выполнен анализ результатов построения сетей фототриангуляции на цифровой фотограмметрической станции.

В настоящее время на производстве сети фототриангуляции строят аналитическим способом на цифровых фотограмметрических станциях (ЦФС) с помощью программных комплексов PHOTOMOD и ORIMA.

Нами была рассмотрена сеть фототриангуляции, построенная на Кормянский район Витебской области. На данный район была запроектирована и выполнена аэрофотосъёмка с продольным перекрытием, равным 60 %, поперечным - 30 %. Всего было заснято 27 маршрутов. Полученные при аэрофотосъёмке (АФС) параметры приведены в табл. 1.

Параметры аэрофотосъёмки

Таблица 1

Название параметра	Условное обозначение	Значение параметра	
		полученное при АФС	принятое в обработку
Максимальная отметка местности, м	$A_{\max}$	176	176
Минимальная отметка местности, м	$A_{\min}$	123	123
Знаменатель масштаба аэрофотосъёмки	m	12500	16500
Тип аэрофотоаппарата	АФА	RC-30	ТАФА, TES
Фокусное расстояние аэрофотоаппарата, мм	f	153	100
Формат кадра аэрофотоснимка, см	$l_x \times l_y$	23×23	18×18
Высота фотографирования, м	H	1900	1650
Критерий рельефа	K_p	0, 03	0, 03
Продольное перекрытие аэрофотоснимков, %	p	60	60
Поперечное перекрытие аэрофотоснимков, %	q	30	30
Базис фотографирования, м	B_x	1060	1060
Расстояние между маршрутами, м	B_y	1850	1850
Количество маршрутов	n_m	27	27
Общее количество аэрофотоснимков	N	808	808

Перед уравниванием сетей должны быть заданы параметры аэрофотоаппарата (АФА). Однако была допущена ошибка - вместо параметров АФА RC-30, которым была выполнена аэрофотосъёмка, в обработку были приняты параметры аэрофотоаппаратов ТАФА и TES, величины которых также указаны в табл. 1.

Вначале сеть уравнивали по программе PHOTOMOD по способу независимых моделей (стереопар). Первоначально было задано стандартное количество опорных точек и получены неудовлетворительные результаты. Постепенно в уравнивание подключали новые опорные точки. Удовлетворительные результаты были получены при числе опорных точек, равном 92.

Данные, полученные в результате уравнивания по программе PHOTOMOD, являлись приближёнными, и дальнейшее уравнивание сети выполнялось с помощью программного комплекса ORIMA, в котором реализован способ связок с самокалибровкой, который позволяет найти поправки в координаты точек за влияние различных ошибок. Уравнивание выполнялось также с неверными параметрами АФА.

Как известно [2], АФА при изменении формата кадра l и фокусного расстояния f в соотношении с равенством (1), при одном и том же угле поля зрения 2β , вычисляемом через основные параметры АФА (2), при одном и том же масштабе фотографирования обеспечивают одинаковую точность:

$$\frac{l_{23 \times 23}}{l_{18 \times 18}} = \frac{f_{23 \times 23}}{f_{18 \times 18}} = k,$$

(1)

где k – коэффициент увеличения формата кадра (коэффициент пропорциональности);

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sqrt{l_x^2 + l_y^2}}{2f}.$$

(2)

Через угол поля зрения, соответствующий параметрам АФА RC, нами были рассчитаны фокусное расстояние АФА с форматом кадра 18х18 см, который был бы аналогом АФА RC и коэффициент пропорциональности k для этих АФА. Результаты вычислений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Название параметра	β	$f, \text{мм}$	k	$\Delta f, \text{мм}$
Значение параметра	44°22'32"	115,63	1,325	16

Таким образом, в процессе уравнивания масштаб уменьшился в k раз и составил 1: $m = 1:16500$, что и было получено в ходе уравнивания. Параметры аэрофотосъёмки, рассчитанные для этого масштаба, представлены в табл. 1.

Как видно из таблицы, с уменьшением f и формата кадра базис фотографирования и расстояние между маршрутами не изменились. Изменились масштаб и высота фотографирования, что сразу бы заметили, если бы в ходе аэрофотосъёмки были бы получены координаты центров проекций по данным GPS и их включили бы в уравнивание.

Данная замена АФА уменьшила не только масштаб, но и точность.
Снижение точности для отмеченного случая было рассчитано нами по формулам предрасчета точности, приведенным в работе [8]:

$$\left. \begin{aligned} m_{x,y} &= 1,5\sigma_0 m, \\ m_z &= 2,0\sigma_0 m, \end{aligned} \right\}, \tag{3}$$

где $m_{x,y}$, m_z – средняя квадратическая погрешность определения плановых координат и высот соответственно; σ_0 – квадратическая погрешность измерения снимка (10 мкм) [8]; m – знаменатель масштаба фотографирования.

Расчеты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Масштаб фотографирования	Средняя квадратическая погрешность определения плановых координат и высот, см	
	$m_{x,y}$	m_z
1:12500	19	25
1:16500	25	33

Как видно из таблицы, замена АФА ($c\ f = 153$ мм и $l \times l = 23 \times 23$ см на $f = 115,63$ мм; $l \times l = 18 \times 18$ см) привела бы к снижению точности на 30 %.

Однако полученные данные предполагалось использовать для обновления карты масштаба 1:10000. Согласно требованиям инструкции [4], в зависимости от средней ошибки планового положения точек нами была рассчитана средняя квадратическая погрешность плановых координат, которая в масштабе обновляемой карты составила 4,2 м. То есть, если бы в обработку приняли $f = 115,63$ мм, то получили бы удовлетворительные результаты при стандартном числе опорных точек.

Вследствие замены параметров АФА была допущена ошибка $\Delta f = 16$ мм (см. табл. 2). Выполнив анализ теории построения сетей по способу независимых моделей, мы пришли к выводу, что эта ошибка приведёт к искажению пространственных координат (X , Y , Z) при взаимном ориентировании, которые вычисляются по формулам [6]:

$$\left. \begin{aligned} X &= a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) + a_3f, \\ Y &= b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) + b_3f, \\ Z &= c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) + c_3f, \end{aligned} \right\}, \tag{4}$$

где a_n , b_n , c_n – направляющие косинусы, которые вычисляются через элементы взаимного ориентирования (α , ω , φ); $z = -f$; f – фокусное расстояние аэрофотоаппарата; x_0 , y_0 – координаты главной точки снимка.

Продифференцировав эти формулы по величине f , мы получили формулы для нахождения ошибок ΔX , ΔY , ΔZ в пространственные координаты точек из-за ошибки Δf :

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= -a_3\Delta f, \\ \Delta Y &= -b_3\Delta f, \\ \Delta Z &= -c_3\Delta f, \end{aligned} \right\}, \tag{5}$$

где a_3, b_3, c_3 – направляющие косинусы, которые вычисляются по формулам [6]:

$$\left. \begin{aligned} a_3 &= -\sin\alpha \cdot \cos\omega, \\ b_3 &= -\sin\omega, \\ c_3 &= \cos\alpha \cdot \cos\omega. \end{aligned} \right\}.$$

(6)

Та как при аэрофотосъёмке гиросtabilизирующая установка не применялась, то углы наклона и поворота снимков достигали значительных величин. Средние значения этих углов, полученные по результатам уравнивания, и результаты вычислений ошибок координат точек местности $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$, полученные по формулам (5), представлены в табл. 4.

Таблица 4

Средние значения углов, полученные по результатам уравнивания,
и результаты вычислений ошибок координат точек местности

Ошибки в пространственные координаты X, Y, Z	Значение угловых элементов внешнего ориентирования	Ошибки в масштабе модели, мм			Ошибки на местности, м		
		ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX_m	ΔY_m	ΔZ_m
Из-за погрешности $\Delta f = 16$ мм	$\alpha_{cp} = \pm 0,5^\circ$ $\omega_{cp} = \pm 2^\circ$	$\pm 0,14$	$\pm 0,55$	$-15,99$	± 2	± 9	-264
	$\alpha = \omega = 15'$	$\pm 0,07$	$\pm 0,07$	-16	± 1	± 1	-264
Из-за погрешности $\Delta x_0 = -0,053$ мм	$\alpha_{cp} = \pm 0,5^\circ$ $\omega_{cp} = \pm 2^\circ$	$0,05$	0	0	$0,8$	0	0
Из-за погрешности $\Delta y_0 = 0,044$ мм	$\alpha_{cp} = \pm 0,5^\circ$ $\omega_{cp} = \pm 2^\circ$ $\varphi_{cp} = \pm 3^\circ$	0	$-0,04$	0	0	$-0,7$	0

Как видим из таблицы, ошибки в плановые координаты носят случайный характер, а ошибка по высоте – систематический.

Если бы при аэрофотосъёмке применялась гиросtabilизирующая установка, то величины углов наклона снимков не превысили бы $\pm 15'$, и плановые координаты точек определились бы в 2...9 раз точнее (см. табл. 4).

В процессе уравнивания были также неверно заданы координаты главной точки. В аэрофотоаппаратах RC и TES они были равны нулю, а в TAFA – отличные от нуля ($x_0 = -0,053$ мм, $y_0 = 0,044$ мм).

Продифференцировав формулы (4) по величинам x_0 и y_0 , получим выражения для нахождения ошибок в пространственные координаты из-за неверно заданных координат главной точки:

$$\left. \begin{aligned} \delta X_{x_0} &= -a_1 \cdot \Delta x_0, \\ \delta Y_{x_0} &= -b_1 \cdot \Delta x_0, \\ \delta Z_{x_0} &= -c_1 \cdot \Delta x_0, \end{aligned} \right\},$$

(7)

$$\left. \begin{aligned} \delta X_{y_0} &= -a_2 \cdot \Delta y_0, \\ \delta Y_{y_0} &= -b_2 \cdot \Delta y_0, \\ \delta Z_{y_0} &= -c_2 \cdot \Delta y_0, \end{aligned} \right\}.$$

(8)

где $\Delta x_0, \Delta y_0$ – допущенные ошибки в координатах главной точки.

Результаты вычислений ошибок представлены в табл. 4. Как видим из таблицы, эти ошибки носят систематический характер и сказываются только на плановых координатах точек.

Перечисленные ошибки войдут во все последующие вычисления: при создании и присоединении моделей, при внешнем ориентировании; вплоть до устранения деформаций по полиномам [7]:

$$\left. \begin{aligned} X_{испр} &= X_r + A_0 + A_1 X_r + A_2 Y_r + A_3 X_r Y_r + A_4 X_r^2 + A_5 X_r^3 + A_6 X_r^2 Y_r + ..., \\ Y_{испр} &= Y_r + B_0 + B_1 X_r + B_2 Y_r + B_3 X_r Y_r + B_4 X_r^2 + B_5 X_r^3 + B_6 X_r^2 Y_r + ..., \\ Z_{испр} &= Z_r + C_0 + C_1 X_r + C_2 Y_r + C_3 X_r Y_r + C_4 X_r^2 + C_5 X_r^3 + C_6 X_r^2 Y_r + ... \end{aligned} \right\}$$

(9)

и будут учтены этими полиномами.

В доказательство этого нами была создана макетная сеть фототриангуляции, деформации которой исключались по пяти стандартно расположенным точкам аналитическим способом.

Во все отметки точек была введена систематическая ошибка, равная -264 м. Мы ограничились длиной полинома (9) первыми пятью членами.

Обработка производилась с использованием математического пакета MATLAB в соответствии с формулами [3]:

$$AX+L=V,$$

(10)

где A - матрица коэффициентов уравнений поправок; X - вектор неизвестных коэффициентов полиномов; L - вектор коэффициентов свободных членов; V - вектор поправок.

$$A=\begin{bmatrix}1&X_1&Y_1&X_1Y_1&X_1^2\\1&X_2&Y_2&X_2Y_2&X_2^2\\1&X_3&Y_3&X_3Y_3&X_3^2\\1&X_4&Y_4&X_4Y_4&X_4^2\\1&X_5&Y_5&X_5Y_5&X_5^2\end{bmatrix};\quad X=\begin{bmatrix}C_0\\C_1\\C_2\\C_3\\C_4\end{bmatrix};\quad L=\begin{bmatrix}\delta Z_1\\\delta Z_2\\\delta Z_3\\\delta Z_4\\\delta Z_5\end{bmatrix},$$

(11)

$$X=-B^{-1}C=-(A^TA)^{-1}A^TL,$$

(12)

где B – матрица нормальных уравнений.

В результате вычислений данная ошибка, равная –264 м, была полностью учтена коэффициентом полинома c_0 .

Кроме того, нами была обработана по этой же программе реальная сеть фототриангуляции, построенная на универсальном приборе.

Уравнивание велось в двух вариантах: по результатам построенной сети и после добавления во все точки систематической ошибки, равной –264 м. В результате были получены одинаковые результаты, которые свидетельствуют о том, что систематическая ошибка была полностью устранена.

Если бы местность была абсолютной равниной, то получились бы удовлетворительные результаты независимо от ошибки Δf . Но так как перепад между экстремальными отметками составил 50 метров, то высоты точек были искажены на величину, которую мы определим на основании формулы [5]:

$$h=\frac{H\cdot\Delta p}{b+\Delta p}=\frac{f\cdot m\cdot\Delta p}{b+\Delta p},$$

(13)

где Δp – разность продольных параллаксов; h – превышение точек местности над средней плоскостью снимаемого участка; b – базис фотографирования на снимке.

Продифференцировав выражение (13) по величине f , мы получили формулу для нахождения ошибки определения превышений в зависимости от ошибки Δf :

$$\Delta h=\frac{\Delta f\cdot m\cdot\Delta p}{b+\Delta p},$$

(14)

где $\Delta p=\frac{b\cdot h}{H-h}.$

Ошибка Δh для экстремальных точек объекта не превысит ± 4 м. Эта ошибка носит случайный характер.

Так как полиномы имеют члены как чётных, так и нечётных степеней, то последние из них частично учтут случайные ошибки.

Сводные данные по объекту приведены в табл. 5, из которой видно, что были получены хорошие результаты.

Таблица 5

Сводные данные по объекту

Наименование точек	Средняя квадратическая погрешность, м		
	m_x	m_y	m_z
Опорные	0,0686	0,1223	0,1681
Связующие	0,3028	0,3315	0,5613

Проанализировав окончательные результаты, мы заметили, что из общего числа связующих точек лишь 1 % имеет среднюю квадратическую погрешность от 1 до 3 м.

Допустимая средняя квадратическая погрешность, рассчитанная нами ранее, составляет 4,2 м.

То есть, несмотря на некачественную аэрофотосъемку и подмену параметров АФА, в результате уравнивания были получены удовлетворительные результаты. Подтверждением чего являются также положительные сводки с соседними районами.

Данный факт можно объяснить тем, что в программах PHOTOMOD и ORIMA вычислительный процесс построен таким образом, чтобы обеспечить получение максимально возможной точности результата, т.е. в процессе обработки информации учитывается максимум отклонений физической модели снимка от его идеализированной геометрической модели.

Программные комплексы PHOTOMOD и ORIMA имеют руководства пользователей, которые позволяют исполнителям освоить работу на компьютере. Однако в отличие от описания к программе PHOTOMOD (Россия), где приведена только последовательность выполнения операций, в описании к программе ORIMA (США) имеются и теоретические положения по построению сетей фототриангуляции, что позволило нам оценить ход решения задачи и сделать выводы о пригодности полученных результатов.

Предполагаемые теоретические положения, реализованные в программе PHOTOMOD, созданы нами в результате изучения многих литературных источников. Но мы можем их только предполагать из-за конфиденциальности многих процессов, выполняемых программой, что не позволяет пользователям в полной мере оценить достоинства и недостатки покупаемых программных средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агапов С.В. Фотограмметрия сканерных снимков. - М.: Картгеоцентр - Геодезиздат, 1996. - 176 с.
2. Афремов В.Г., Нехин С.С. Влияние формата кадра аэрофотоаппарата на технико-экономические показатели аэрофотосъёмочного процесса // Геодезия и картография. - 1987. - № 6. - С. 34 - 39.
3. Большаков В.Д., Маркузе Ю.И. Практикум по теории математической обработки геодезических измерений. - М.: Недра, 1984. - 351 с.
4. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. ГКИНП (ОНТА) 02-...-03. - Мн., 2003. - 78 с.
5. Лобанов А.Н. Фотограмметрия. - М.: Недра, 1984. - 552 с.
6. Лобанов А.Н., Буров М.И., Краснопевцев Б.В. Фотограмметрия. - М.: Недра, 1987. - 309 с.
7. Аналитическая пространственная фототриангуляция / А.Н. Лобанов, В.А. Дубиновский, М.М. Машимов, Р.П. Овсянников. - М.: Недра, 1993. - 254 с.
8. Ackermann F., Schade H. // Photogrammetric Engineering and remote sensing. - 1993. - Vol. 59. - № 11.