

В. В. ВАЙНАУСКАС

ТОЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ АЛГОРИТМОВ УРАВНИВАНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ СТЕРЕОПАРЫ

В фотограмметрии при решении многочисленных научных и практических задач основным исходным процессом является построение и уравнивание цифровой модели пары снимков. На практике для обработки пары снимков используются различные алгоритмы и программы, которые отличаются своей точностью и надежностью. При этом немаловажное значение имеет и объем совместно решаемых уравнений, предопределяющий возможность применения мини- или микроЭВМ. Поэтому анализ и выявление наиболее устойчивых, точных и надежных алгоритмов построения и уравнивания цифровых моделей, построенных по двум снимкам (стереопаре), имеют большое научное и практическое значение.

Точность и надежность. Всегда нужно различать точность и надежность. Если $\dot{X}$ является истинным значением некоторого физического количества и $\bar{X}$ его оценкой, полученной на основании использования измерительной системы S , то всегда имеет место неравенство между математическим ожиданием и истинным значением $M(\bar{X}) \neq \dot{X}$.

Отсюда определяем ошибку величины $\bar{X}$:

$$e = \bar{X} - \dot{X} = (\bar{X} - M(\bar{X})) + (M(\bar{X}) - \dot{X}) = \epsilon + \beta, \quad (1)$$

где $e = \bar{X} - M(\bar{X})$; $M(\epsilon) = 0$; $\beta = M(\bar{X}) - \dot{X}$.

Величина ϵ — остаточная случайная ошибка измерительной системы S , которая подчиняется нормальному распределению.

Надежность $\bar{X}$ в измерительной системе S указывает на близость $\bar{X}$ к $M(\bar{X})$ и характеризуется стандартным отклонением $\sigma(\bar{X}) = \sigma_{\bar{X}}$.

Величина β является смещением. Основные причины смещения — систематические эффекты, четкость контуров измеряемых объектов и разрешающая способность измерительных процедур.

Точность оценки $\bar{X}$ показывает близость $\bar{X}$ к $\dot{X}$. Она характеризуется средним квадратическим отклонением $\sqrt{M(e)}$, т. е.

$$M(e_x^2) = M(\epsilon + \beta)^2 = M(\epsilon^2) + \beta M(\epsilon) + \beta^2 = \sigma_x^2 + \beta^2.$$

Если предположить, что все измерительные процедуры выполняются с одинаковой надежностью (например, все стереокомпараторы одной фирмы и все программы вычисления являются строгими), то будем иметь

$$M(e_x^2) = \sigma_x^2 + M(\beta^2). \quad (2)$$

Величину $\sqrt{M(\beta^2)}$ можно назвать стандартным случайным смещением.

Из (2) следует, что среднее квадратическое отклонение статистически всегда по величине будет больше среднего квадратического смещения. Таким образом, $\sigma(\bar{X}) = \sigma_{\bar{X}}$ характеризует надежность величины $\bar{X}$, а $\sqrt{M(\beta^2)}$ — среднее квадратическое смещение измерительной системы.

Метод исследования. При обработке пары снимков с точки зрения геометрии нужно рассмотреть два сильно отличающихся варианта: плановый случай фотосъемки с оптимальным размещением опорных и определяемых точек; общий случай фотосъемки с неблагоприятным расположением этих точек по причине различных препятствий. Следовательно, необходимо проследить точностную эффективность различных алгоритмов при обработке нормальных стереопар в случае интерполяции определяемых точек и ненормальных — в случае экстраполяции.

В основном для обработки пары снимков применяются функциональные модели компланарности и коллинеарности проектирующих лучей, причем с калибровкой или без калибровки снимков, т. е. с введением дополнительных параметров. В целях уменьшения объема совместно решаемых уравнений применяются видоизмененные алгоритмы, которые разработаны на базе использования принципов центра тяжести, арифметической средней и равновесия [1].

Для решения поставленной задачи применим опытно-эмпирический метод, так как в этом случае теоретические выкладки очень сложны и неэффективны. Сначала рассмотрим вариант обработки нормальной стереопары снимков, параметры которой представляются следующими характеристиками: масштаб залета приблизительно 1:10000, $f=150$ мм, $\omega=\varphi=\kappa=5^\circ$, $Z/B=1.3$, $\sigma(xy)=5$ мкм и продольное перекрытие снимков 60 %. Обработка результатов измерений выполнена по алгоритмам, реализованным в виде вычислительных программ на миниЭВМ СМ-4 на языке Фортран. Оценки точности вычисленных параметров проведены по ковариационным матрицам и топологическими приемами [2]. Следует заметить, что при оценке точности элементов внешнего ориентирования снимков топологическими приемами использованы следующие формулы:

$$\sigma(\Omega) = \sigma(\omega) = \sigma(XYZ) / \Delta Y, \quad \sigma(\Phi) = \sigma(\varphi) = \sigma(XYZ) / \Delta X,$$

$$\sigma(K) = \sigma(\kappa) = \sigma(XYZ) / \Delta R, \quad \sigma(X_0) = Z\sigma(\Phi) = Z\sigma(\varphi),$$

$$\sigma(Y_0) = Z\sigma(\Omega) = Z\sigma(\omega), \quad \sigma(Z_0) = \sigma(Z), \quad (3)$$

Точность алгоритмов при интерполяции

Метод оценки	Стандарты определяемых параметров										Единица измерения	Алгоритм программы	Число параметров	Повышение точности
Топ.	$\sigma(X)$	147	$\sigma(Y)$	49	$\sigma(Z)$	33	$\sigma(XYZ)$	92	Компланарность классическая			Компланарность классическая	5+7=12	
Ков.	$\sigma(X_0)$	201	$\sigma(Y_0)$	101	$\sigma(Z_0)$	111	$\sigma(X_0Y_0Z_0)$	145						
Топ.	$\sigma(X_0)$	180	$\sigma(Y_0)$	80	$\sigma(Z_0)$	90	$\sigma(X_0Y_0Z_0)$	125						
Ков.	$\sigma(\Omega)$	12	$\sigma(\Phi)$	27	$\sigma(K)$	11	$\sigma(\Omega\Phi K)$	18						
Топ.	$\sigma(\Omega)$	12	$\sigma(\Phi)$	23	$\sigma(K)$	10	$\sigma(\Omega\Phi K)$	16						
Топ.	$\sigma(X)$	137	$\sigma(Y)$	49	$\sigma(Z)$	34	$\sigma(XYZ)$	86	Компланарность Внешнее ор. при исп. центр. тяжести			Компланарность Внешнее ор. при исп. центр. тяжести	5+7=12	6 %
Ков.	$\sigma(X_0)$	170	$\sigma(Y_0)$	80	$\sigma(Z_0)$	80	$\sigma(X_0Y_0Z_0)$	118						
Топ.	$\sigma(\Omega)$	11	$\sigma(\Phi)$	22	$\sigma(K)$	10	$\sigma(\Omega\Phi K)$	15						
Топ.	$\sigma(X)$	63	$\sigma(Y)$	60	$\sigma(Z)$	94	$\sigma(XYZ)$	73				Коллинеарность классическая	6+6+13	26 %
Ков.	$\sigma(X_0)$	210	$\sigma(Y_0)$	220	$\sigma(Z_0)$	80	$\sigma(X_0Y_0Z_0)$	182						
Топ.	$\sigma(X_0)$	130	$\sigma(Y_0)$	190	$\sigma(Z_0)$	70	$\sigma(X_0Y_0Z_0)$	139						
Ков.	$\sigma(\Omega)$	22	$\sigma(\Phi)$	28	$\sigma(K)$	9	$\sigma(\Omega\Phi K)$	21						
Топ.	$\sigma(\Omega)$	18	$\sigma(\Phi)$	26	$\sigma(K)$	13	$\sigma(\Omega\Phi K)$	20						
Топ.	$\sigma(X)$	54	$\sigma(Y)$	41	$\sigma(Z)$	81	$\sigma(XYZ)$	61	Коллинеарность Чередование обр. и прямых засечек			Коллинеарность Чередование обр. и прямых засечек	6+6=12	35 %
Ков.	$\sigma(X_0)$	180	$\sigma(Y_0)$	130	$\sigma(Z_0)$	80	$\sigma(X_0Y_0Z_0)$	136						
Топ.	$\sigma(\Omega)$	17	$\sigma(\Phi)$	24	$\sigma(K)$	13	$\sigma(\Omega\Phi K)$	19						

Примечание. Априорная (ожидаемая) точность $\sigma(XYZ)=80$ мм. Топ. — топологический прием; ков. — ковариационная матрица.

где $\Delta X = X_{\max} - X_{\min}$; $\Delta Y = Y_{\max} - Y_{\min}$; $\Delta R = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}$.

Результаты исследования представлены в табл. 1.

На основании анализа приведенных данных табл. 1 можно заключить, что уменьшение порядка совместно решаемых уравнений повышает точность окончательных результатов на 6 и 17 % при использовании алгоритмов компланарности и коллинеарности соответственно, а оценка точности вычисляемых параметров по ковариационному и топологическому методам практи-

Таблица 2

Точность алгоритмов при экстраполяции

$\sigma(X)$, мм	$\sigma(Y)$, мм	$\sigma(Z)$, мм	$\sigma(XYZ)$, мм	Алгоритмы программы	Число параметров
24	9	15	17	Компланар-	5+ 7=12
16	19	32	23	ность	
31	30	59	42	Коллинеар-	6+ 6=12
9	11	18	13	ность	
60	66	96	76	То же	9+ 9=18
				—,—	11+11=22
				Коллинеар-	11+11=22
				ность без ква-	
				зиточек	

Примечание. Априорная (ожидаемая) точность $\sigma(XYZ) = 26$ мм.

чески приводит к тождественным результатам. Следовательно, при различных способах обработки пары снимков нет необходимости загружать память ЭВМ ковариационными матрицами, необходимыми для оценивания определяемых параметров. Следует отметить, что в данном случае наблюдается хорошая сходимость априорных и апостериорных оценок.

Дальше рассмотрим точность и надежность различных алгоритмов и программ при обработке пары снимков наземной фотосъемки с неблагоприятным расположением опорных и определяемых точек для экстраполяции. Параметры фотосъемки: масштаб снимков приблизительно 1:250, $f=100$ мм, $\omega=\varphi=15^\circ$, $B/Z=1/10$, коэффициент экстраполяции $B_x/B_{\bar{x}}=2,5$, $\sigma(xy)=7$ мкм и продольное перекрытие снимков 100 % (конвергентная фотосъемка). Точностные результаты приведены в табл. 2, из которых следует, что средние стандарты координат определяемых точек значительно больше предрасчетных за исключением результатов, полученных при алгоритме проективной коллинеарности с одиннадцатью неизвестными параметрами. Однако тот же самый алгоритм без включения квазиопорных точек дал наиболее худшие результаты (последняя строка табл. 2), что еще раз подтверждает эффективность квазиопорных точек, которые имеют решающее значение при высокоточном пространственном фототриангулировании [3—5].

Для определения точности и надежности различных алгоритмов при обработке стереопары метрических и неметрических снимков произведена обработка следующих фотоматериалов: масштаб залета 1:5000, $f=100$ мм, $\omega=\varphi=\kappa=5^\circ$, $Z/B=1,6$ (АФА) и масштаб фотосъемки 1:1000, $f=65$ мм, $\omega=\varphi=\kappa=20^\circ$, $Z/B=1,4$ (Салют). Точностные характеристики, вычисленные по разностям координат точек для сравниваемых алгоритмов и программ и приведенные в табл. 3, показывают, что при исполь-

Таблица 3

Надежность алгоритмов

$\sigma(X)$, мм	$\sigma(Y)$, мм	$\sigma(Z)$, мм	$\sigma(XYZ)$, мм	Сравниваемые алгоритмы	Число параметров	Априор- ные стан- дарты, мм
23	38	136	83	Компланар- ность	5+7=12	Метрическая фотокамера АФА
				Коллинеар- ность	6+6=12	
16	28	45	32	Компланар- ность	5+7=12	
				Коллинеар- ность	9+9=18	
12	25	35	26	То же	6+6=12	
				—, —	9+9=18	
2	2	8	5	Компланар- ность	5+7=12	Неметрическая фотокамера «Салют»
				Коллинеар- ность	6+6=12	
4	3	16	10	Компланар- ность	5+7=12	
				Коллинеар- ность	9+9=18	
5	6	14	10	То же	6+6=12	
				—, —	9+9=18	

зовании большого числа опорных и квазиопорных точек (10+10) для построения и уравнивания цифровой модели стереопары средние стандарты надежности координат определяемых точек (смещение вычислительных систем — программ) получаются меньшими предрасчетных. Это подтверждает практическую равноценность используемых математических функциональных моделей, если не требуется ультравысокая точность для решаемой конкретной задачи. В лаборатории архитектурной фотограмметрии Института проектирования реставрации памятников, как правило, обработка измерительной информации производится при использовании программ «Компланарность» и «Коллинеарность» и тщательно оценивается фактор смещения вычислительных систем, вследствие чего строго обеспечивается надежность окончательных результатов. Таким образом, практические опыты убедительно показали, что при ре-

шении многочисленных технических задач нужно иметь полный пакет различных программ, так как иногда возникают такие варианты, которые можно решить правильно только при использовании конкретной программы, пригодной для данного случая.

В заключение необходимо подчеркнуть, что на производстве при решении многообразных задач успешно можно использовать все математические функциональные модели, т. е. алгоритмы и программы, которые при большом объеме измерительной информации практически приводят к одинаково точным и надежным результатам, особенно в случае применения метрических фотокамер.

1. Вайнаускас В. В., Плескачаускас А. А. К разработке алгоритмов для решения некоторых фотограмметрических задач // Геодезия и картография. 1985. № 12. С. 26—30. 2. Вайнаускас В. В. Вопросы точности аналитической фотограмметрии при съемке с небольших отстояний // Геодезия и картография. 1985. № 3. С. 35—39. 3. Вайнаускас В. В., Ярутис Р. А. Пространственное фототриангулирование по неметрическим снимкам // Геодезия и картография. 1987. № 10. С. 34—38. 4. Вайнаускас В. В. Пространственное фототриангулирование под условием коллинеарности // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1988. Вып. 47. С. 105—109. 5. Вайнаускас В. В. Пространственное фототриангулирование при совместном использовании условий компланарности и коллинеарности // Геодезия и фотограмметрия в горном деле. 1988, Свердловск. С. 45—51.

Статья поступила в редакцию 10.12.89