Отбраковка точек при определении элементов взаимного ориентирования снимков стереопары

Point rejection when determining elements for relative orientation of stereopair images

Хрущ / Khrusch R.
Роман Михайлович
(Chrusch@rambler.ru)
кандидат технических наук, доцент.
ФГКВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского» (ВКА им. А. Ф. Можайского) МО РФ, профессор кафедры фототопографии и фотограмметрии.
г. Санкт-Петербург

Гринь / Grin A.
Александр Николаевич
(al-grin1@yandex.ru)
кандидат физико-математических наук, доцент.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
профессор кафедры математики.
г. Санкт-Петербург

Соловьев / Soloviev A.
Алексей Владимирович
(solov19882008@mail.ru)
ВКА им. А. Ф. Можайского,
адъюнкт.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: модель местности – terrain model; элементы взаимного ориентирования – elements for relative orientation; одноименные точки – conjugate points; нормаль к базисной поверхности – reference surface normal; идентификация – identification; компланарность векторов – complanarity of vectors.

В статье предложен способ отбраковки грубо измеренных точек цифровых аэрокосмических снимков при построении по ним модели местности с использованием элементов взаимного ориентирования. В основе способа лежит коллинеарность нормалей, восстановленных в одноименных точках стереопары снимков к базисной плоскости, в которой они находятся.

The article offers method for rejection of coarsely measured points of digital aerospace images in the process of respective terrain model building using relative orientation elements. The method is based on collinearity of normals erected in image stereopair conjugate points to reference surface in which they are located.

Для построения модели местности необходимо, кроме измеренных координат точек снимков, если неизвестны их элементы внешнего ориентирования, определить элементы взаимного ориентирования (ЭВзО) стереопары. Для этого обычно измеряют плоские координаты точек снимков в шести стандартно расположенных зонах стереопары, а затем решают задачу строгим способом на основе известного условия компланарности одноименных проектирующих лучей, применив метод наименьших квадратов, последовательными приближениями. При этом в каждом приближении выполняется отбраковка точек с грубыми ошибками. Сама по себе методика определения элементов взаимного ориентирования является в настоящее время довольно ординарной задачей, способ решения которой в свое время был предложен видным советским геодезистом Н. А. Урмаевым еще на заре появления аналитической фотограмметрии [1]. Затем способ был развит другими учеными, среди которых, пожалуй, наибольшая заслуга принадлежит А. Н. Лобанову, показавшему в частности, что 2–3 точки в каждой стандартной зоне являются оптимальным количеством для точного решения задачи определения ЭВзО, следовательно и для построения геометрической модели местности по стереопаре снимков [2]. Поэтому в настоящей работе основное внимание уделено не собственно построению модели местности, а определению и отбраковке грубых измерений, которые оказывают существенное влияние на точность ее построения.

Одной из самых важных составляющих ошибок измерения координат точек снимков являются ошибки их отождествления. Поэтому отождествление (идентификация) одноименных (соответственных) точек снимков стереопары является важной задачей, так как неточности и промахи в идентификации приводят к грубым ошибкам измерения координат точек снимков. Задачу точного отождествления стараются решить на этапе определения соответственных точек стереопары. Особенно значимым является решение данного вопроса при автоматическом выполнении фотограмметрических процессов.

Чтобы убедиться в отсутствии грубых ошибок в измеренных координатах соответственных точек, используют дополнительный контроль. Такой контроль с целью отбраковки точек с грубыми ошибками производится уже непосредственно в процессе вычисления ЭВзО после каждого приближения. Для этого используется свойство идеальной стереопары, состоящее в том, что на идеальной стереопаре должны отсутствовать поперечные параллаксы. С этой целью трансформируют ординаты одноименных точек снимков стереопары [2, 3, 4]:

$$\left.\begin{aligned} y_1^0 &= -f\,\frac{b'_{11}x + b'_{12}y_1 - b'_{13}f}{c'_{11}x_1 + c'_{12}y_1 - c'_{13f}};\\ y_2^0 &= -f\,\frac{b'_{21}x + b'_{22}y_1 - b'_{23}f}{c'_{21}x_1 + c'_{22}y_1 - c'_{23f}}. \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

Здесь $y^0{}_1$ и $y^0{}_2$ –ординаты одноименных точек снимков P_1 и P_2 идеальной стереопары;

a'_{1i}, b'_{1i}, c'_{1i} – направляющие косинусы, вычисленные по ЭВзО α'_1 и κ'_1 левого снимка стереопары;

a'_{2i}, b'_{2i}, c'_{2i} – направляющие косинусы, вычисленные по ЭВзО α'_2, ω'_2 и κ'_2 правого фотоснимка стереопары, где i = 1, 2, 3 – номера направляющих косинусов.

Остаточные поперечные параллаксы на идеальной стереопаре для каждой пары одноименных точек равны разностям трансформированных ординат соответственных точек:

$$\delta q = y_1^0 - y_2^0. \qquad (2)$$

Недостатком данного способа является то, что для отбраковки грубо идентифицированных точек используются ошибки только одной из двух координат, определяющих положение соответственных точек, – ординат. Ошибки абсцисс, которые также влияют на положение точек снимков, не участвуют в этом процессе. Устранить этот недостаток можно, применив другой способ отбраковки одноименных точек снимков стереопары.

Сущность предлагаемого способа состоит в следующем. Если одноименные точки a_1 и a_2 стереопары снимков P_1 P_2 отождествлены безошибочно (рис. 1), то они будут находиться в одной базисной плоскости, что выражается условием компланарности трех векторов, смешанное произведение которых должно равняться нулю:

$$\mathbf{B}\cdot(\mathbf{m}_1 \times \mathbf{m}_2) = 0, \qquad (3)$$

где $\mathbf{B}$ (X_{S2},Y_{S2},Z_{S2})– вектор, задающий направление базиса в системе координат с началом в центре проекции левого снимка, $\mathbf{m}_1$(X_1,Y_1,Z_1) – вектор, задающий положение точки a_1 на левом снимке в этой же системе координат и вектор $\mathbf{m}_2$(X_2,Y_2,Z_2),определяющий положение точки a_2 правого снимка в системе координат с началом в центре проекции S_2 этого снимка.

Если одноименные точки отождествлены неверно, то компланорность векторов (3) будет нарушаться. Следовательно, нарушение компланарности можно использовать для отбраковки грубо идентифицированных точек.

Значение величины ошибки идентификации можно оценить следующим образом. Так как результатом векторного произведения каждого из двух векторов $\mathbf{m}_1$ и $\mathbf{m}_2$ на вектор базиса $\mathbf{B}$ являются нормали $\mathbf{N}_1$ и $\mathbf{N}_2$ к базисной плоскости, в которой они находятся, то обе нормали должны быть параллельны друг другу, а угол между ними, как и его тангенс, должен равняться нулю. Учитывая, что по определению скалярного произведения векторов [5]:

$$\vec{N}_1 \cdot \vec{N}_2 = \left|\vec{N}_1\right| \cdot \left|\vec{N}_2\right| \cdot \cos(\vec{N}_1, \vec{N}_2),$$

а векторное произведение вычисляется как

$$\left|\vec{N}_1 \times \vec{N}_2\right| = \left|\vec{N}_1\right| \cdot \left|\vec{N}_2\right| \cdot \sin(\vec{N}_1, \vec{N}_2),$$

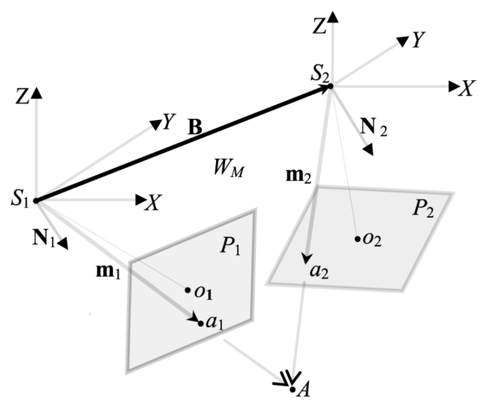

Рис. 1. Условие пересечения соответственных проектирующих лучей

то тангенс между нормалями $\mathbf{N}_1$ и $\mathbf{N}_2$, которые должны быть коллинеарными, вычисляется по формуле

$$\mathrm{tg}\alpha = \frac{\left|\vec{N}_1 \times \vec{N}_2\right|}{\vec{N}_1 \cdot \vec{N}_2}. \quad (4)$$

Следовательно, вычисляя для каждой пары одноименных точек значение тангенса угла α между нормалями, имеется возможность оценить ошибки идентификации и исключить из процесса обработки грубо определенные точки.

Векторы $\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2$ и вектор $\mathbf{B}$ должны быть определены в системах координат со взаимно параллельными осями. Допустим, что используется внешняя система координат, а системы координат с началами в центрах проекций $\mathbf{S}_1$ и $\mathbf{S}_2$ будут иметь оси, параллельные соответствующим осям этой системы координат. Если векторы $\mathbf{m}_1$ и $\mathbf{m}_2$ определены во вспомогательных системах координат (системы координат камер) соответственно левого и правого снимков, т.е. $\mathbf{m}_1 = [x_1, y_1, -f]^T$ и $\mathbf{m}_2 = [x_2, y_2, -f]^T$, то для преобразования их необходимо использовать матрицы поворотов $\mathbf{R}_1$ и $\mathbf{R}_2$ соответственно. Применив первую (базисную) систему элементов взаимного ориентирования, матрицы поворотов $\mathbf{R}_1$ и $\mathbf{R}_2$ будут определять повороты векторов $\mathbf{m}_1$ и $\mathbf{m}_2$ на ЭВзО α'_1 и κ'_1 для левого снимка и $-\alpha'_2, \omega'_2$ и κ'_2 для второго снимка соответственно.

Если вектор базиса $\mathbf{B}(B_X, B_Y, B_Z)$, где $B_X = X_{S2} - X_{S1}$, $B_Y = Y_{S2} - Y_{S1}$ и $B_Z = Z_{S2} - Z_{S1}$, определен во внешней системе координат, то используя кососимметричную матрицу

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & -\mathrm{B_Z} & \mathrm{B_Y} \\ \mathrm{B_Z} & 0 & -\mathrm{B_X} \\ -\mathrm{B_Y} & \mathrm{B_X} & 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

найдем векторы $\mathbf{N}_1$ и $\mathbf{N}_2$:

$$\left.\begin{aligned} \mathbf{N}_1 &= \mathbf{B} \times \mathbf{m}_1 = \mathbf{B} \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{m}_1, \\ \mathbf{N}_2 &= \mathbf{B} \times \mathbf{m}_2 = \mathbf{B} \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{m}_2\,. \end{aligned}\right\} \quad (6)$$

В результате получим координаты векторов $\mathbf{N}_1$ и $\mathbf{N}_2$ в системах координат с началами в точках $\mathbf{S}_1$ и $\mathbf{S}_2$ и с осями, параллельными соответствующим осям внешней системы координат.

При этом следует иметь в виду, что для базисной системы координат (первой системы ЭВзО) кососимметричная матрица примет вид:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\mathrm{B} \\ 0 & \mathrm{B} & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

а так как длина базиса не влияет на взаимное ориентирование снимков, то его значение может быть произвольным.

Для проверки теоретических положений, составляющих суть предложенного способа определения грубых ошибок идентификации соответственных точек, проведен ряд экспериментов, результаты которых приведены в табл. 1. Для экспериментов использовалась стереопара макетных снимков P_1P_2 (рис. 2) с известными ЭВзО снимков [6]. Замысел экспериментов заключался в следующем. Так как ЭВзО известны, то вводя ошибки в координаты точек, находящихся в стандартно расположенных зонах стереопары, представлялось возможным оценить их влияние на точность определения соответственных точек, как по остаточным поперечным параллаксам, так и по значениям углов между нормалями к базисной плоскости для каждой пары одноименных точек. Ошибки в координаты точек снимков вводились с использованием генератора случайных чисел. Средние квадратические ошибки при этом составили 0,02 мм для абсцисс и ординат. Значения ошибок, которые вводи-

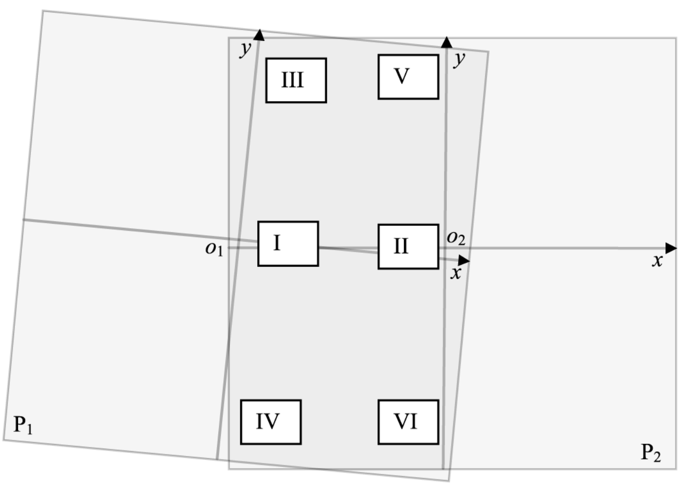

Рис. 2. Стереопара снимков и стандартно расположенные зоны

Таблица 1

Номера точек	Номера зоны	Ошибки координат точек		Введение ошибок в координаты					
		δx, мкм	**δy**, мкм	***x*** и ***y***		***x***		***y***	
				δq, мкм	угол α,″	**δq**, мкм	угол α,″	**δq**, мкм	угол α,″
1	I	10	20	-1	3,9	-1	2,0	-1	1,9
2	I	0	10	0	1,0	0	0,0	0	1,0
3	I	30	30	-4	9,9	-1	6,0	-2	3,9
4	II	20	10	-1	3,4	0	3,9	-1	0,6
5	II	10	30	0	0,0	1	2,0	-1	1,9
6	II	10	20	0	0,4	1	2,0	-1	1,6
7	III	10	30	-3	3,7	-2	0,2	0	3,5
8	III	30	10	-1	1,6	-1	0,4	0	1,2
9	III	0	20	-2	2,3	-2	0,0	0	2,3
10	IV	20	10	-2	3,6	0	3,7	3	0,1
11	IV	10	0	-1	1,8	0	1,8	1	0,0
12	IV	30	30	-4	4,2	0	4,7	4	0,4
13	V	10	20	-1	0,9	0	0,2	0	0,7
14	V	30	10	-1	0,8	0	0,4	0	0,3
15	V	20	10	0	0,2	0	0,1	0	0,3
16	VI	30	10	-3	4,6	1	5,5	4	1,0
17	VI	10	30	1	1,1	2	1,8	1	2,8
18	VI	20	0	-3	3,1	0	3,1	3	0,0
ср.кв.ошибки		20,0	20,0	2,1	3,6	1,0	2,9	1,9	1,8

лись в координаты точек, а также значения остаточных поперечных параллаксов (в микрометрах) и углов α между нормалями (в секундах) представлены табл.1.

Из анализа данных, приведенных в таблице,следует, что:

1. Ср. кв. ошибка остаточных поперечных параллаксов δq при совместном влиянии ошибок абсцисс и ординат точек снимков равна 2,1 мкм, а при раздельном их влиянии −1,0 мкм и 1,9 мкм для абсцисс и ординат соответственно. Если подсчитать по этим значениям общую ср. кв. ошибку поперечного параллакса δq, то она будет также равна 2,1 мкм. Это означает, что в целом влияние ошибок координат точек снимков на значения остаточных поперечных параллаксов δq соответствует зависимостям (1) и (2). Однако на точность идентификации влияют не только ошибки трансформированных ординат, но и ошибки абсцисс точек снимков, которые при использовании в качестве критерия δq не учитываются.

2. С другой стороны, максимальное значение угла α будет при совместном учете ошибок абсцисс и ординат (ср. кв. ошибка угла α при этом равна 3,6″, а при раздельном их влиянии –2,9″и 1,8″ соответственно). Если по раздельным ср.кв. ошибкам 2,9″ и 1,8″ подсчитать общую ср. кв. ошибку угла α, то она будет примерно равна 3,6″(в пределах точности ошибок округления). Это значит, что экспериментально подтверждены теоретические положения для вычисления угла α, который адекватно отражает влияние ошибок обеих координат на положение соответственных точек снимков стереопары.

3. Как следует из полученных результатов, влияние ошибок абсцисс может в 1,6 раз превышать влияние ошибок ординат (по оценке ср. кв. ошибок, см. табл. 1) на значение угла α. Следовательно, это обстоятельство должно обязательно учитываться при отбраковке соответственных точек. Предлагаемый способ позволяет это делать.

Таким образом, критерий отклонения от нуля значения угла α для отбраковки соответственных точек снимков стереопары, является более объективным и точным, так как позволяет учитывать влияние ошибок не только ординат, но и ошибки абсцисс на точность их измерений соответственных точек.

В заключение отметим, что для определения допустимых отклонений угла между нормалями к базисной плоскости от нулевого значения, необходимо связать его с измеряемыми по снимкам координатами точек. Это вопрос является предметом дальнейших теоретических и экспериментальных исследований и будет рассмотрен в следующей статье.

Литература

1. Урмаев, Н. А. Элементы фотограмметрии / Н.А. Урмаев. – М: Геодезиздат, 1941. – 220 с.
2. Лобанов, А. Н. Фотограмметрия / А.Н. Лобанов. – М.: «Недра», 1984. – 552 с.
3. Хрущ, Р. М. Фотограмметрия / Р.М. Хрущ. – СПб.: Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, 2011. – 542 с.
4. Назаров, А. С. Фотограмметрия : учеб. пособие для студентов вузов / А.С. Назаров. – Мн.: ТетраСистемс, 2006. – 368 с.
5. Ильин, В. А. Аналитическая геометрия / В.А. Ильин, Э.Г. Позняк. – М.: Наука, 2004. – 66 с.
6. Аналитические модели местности и снимков (макетные снимки) / А.Н. Лобанов [и др.] – М.: «Недра», 1973. – 96 с.