

Р. М. РУДЫЙ

О ТОЧНОСТИ РАБОТЫ КОРРЕКЦИОННОГО УСТРОЙСТВА СПР

При исследовании аналоговых универсальных стереофотограмметрических приборов определяется точность, с которой они могут решать уравнения связи координат снимка и местности. В стереопроекторе Г. В. Романовского сначала выполняется трансформирование, то есть решаются уравнения трансформирования аэроснимков за наклон, а затем при помощи проектирующих рычагов строится и измеряется пространственная модель. Для более тщательного исследования прибора желательно исследовать отдельно трансформирующие устройства и моделирующую систему с отключенными корректорами.

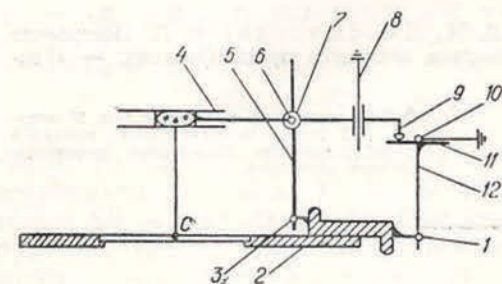


Рис. 1. Схема коррекционного устройства стереопроектора.

осных шарнирах 1, 10, 3, 6, 7, вертикальная каретка 8, относительно которой вдоль осей X и Y прибора перемещается спорный палец 9, скользящий своей сферической поверхностью по тарелке 11, а также свободно движущийся вдоль оси Z по направляющим вертикальной каретки; подвижный объектив, который перемещается вдоль осей X и Y прибора по направляющим 4.

Перечислим основные источники систематических ошибок, действующих в корректоре: а) погрешность в установке децентрации коррекционного механизма; б) непараллельность стержней 5 и 12; в) несовпадение при наблюдении точки C центров шарниров 6 и 7; г) погрешность в определении 1; д) неперпендикулярность коррекционной плоскости к стержню; е) отклонение вертикальной каретки от оси Z прибора; ж) непараллельность направляющих объективной каретки плоскости XU прибора; з) непересечение в каждом из шарниров двух осей шарнира и оси соответствующего стержня.

Таким образом, в каждом коррекционном устройстве на точность его работы влияют в основном 22 первичные ошибки (в каждом из шарниров действуют три первичные ошибки).

Анализ общего влияния всех указанных ошибок на точность работы корректора затруднителен, поэтому будем считать их независимыми и исследовать действие каждой ошибки в отдельности.

Действующие в приборе инструментальные погрешности не должны искажать измеряемую модель больше чем на 0,02 мм. Разделим инструментальные ошибки на три группы: ошибки, действующие в измерительной системе прибора, ошибки проектирования, ошибки трансформирующих устройств. В случае независимости действия ошибок в трех перечисленных системах допустимая доля ошибки в каждой системе будет $0,02 : \sqrt{3} = 0,12$ мм. Если потребовать, чтобы ошибка в коррекции не превышала 12 мкм, на каждую первичную ошибку одного трансформирующего устройства получаем $0,012 : \sqrt{44} = 0,002$ мм.

В дальнейшем увидим, что не все первичные ошибки корректора действуют в направлении оси Y прибора, но для установления допусков принимаем допустимую погрешность в коррекции, вызванную одной первичной ошибкой 2 мкм.

Анализируем работу корректора в координатной плоскости XZ . Формулу, выражающую величину коррекции, вводимую трансформирующим устройством, записываем в виде

$$\Delta x = utg \beta_x tg \beta_{1x}, \quad (1)$$

где u — смещение опорного пальца от центра вращения тарелки; β_x и β_{1x} — углы в плоскости XZ между осью прибора Z и соответственно стержнями 5 и 12.

Полагаем

$$tg \beta_x \approx tg \beta_{1x} = \frac{x}{l},$$

где l — постоянная корректора.

При обработке на стереопроекторе снимков с различными фокусными расстояниями установлены предельные углы наклона, которые обусловлены конструктивными особенностями прибора, диапазоном установки величины u , диапазоном установки децентраций и другими факторами. Для примера будем вычислять допустимые ошибки при $f = 100,00$ мм, $x = 90,00$ мм, $l = 180,00$ мм, $u = 20,00$ мм.

Децентрация коррекционного механизма осуществляется смещением шарниров 1 и 3 (см. рис. 1) относительно каретки аэроснимков 2. Для выражения погрешности в установке децентрации из формулы (1) получаем

$$\delta x_d = 2u tg \beta_x \delta tg \beta_x. \quad (2)$$

Подставляя в выражение (2) указанные ранее значения, находим

$$\delta x_d = \frac{0,36}{u} = 0,018 \text{ мм.} \quad (3)$$

Из (3) видно, что точность установки децентрации коррекционного механизма зависит от величины u или от величины угла наклона. При угле наклона, равном нулю, децентрация может быть произвольной.

Непараллельность стержней при $u = 0$ приводит к тому, что только один из углов β_x или β_{1x} искаженный. Дифференцируя формулу (1) по $tg \beta_x$, получаем

$$\delta x_{np} = u tg \beta_x \delta tg \beta_x. \quad (4)$$

Отсюда $\delta tg \beta_x = 0,0002$, $\delta \beta_x = 0,7$. Допустимое смещение стержня одной первичной ошибкой можно принять равным 0,036 мм.

Несовпадение в исходном положении, то есть когда оба стержня вертикальны, центров шарниров 6 и 7 (рис. 1) приводит к систематической погрешности следующего характера. Если x — расстояние от

точки нулевых искажений до наблюдаемой точки, то можно сказать, что погрешность будет вводиться пропорционально x по формуле

$$\delta_{xH} = v \operatorname{tg} \beta_{1x}, \quad (5)$$

где v — несовпадение по высоте центров шарниров 6 и 7. Для $\delta_{xH} = 0,002$ мм, $v = 0,004$ мм. Эту погрешность выявляют довольно просто при юстировке прибора покачиванием направляющего стержня в то время, когда коррекционная плоскость горизонтальна.

Чтобы установить влияние погрешности при определении величины l на точность работы корректора, подставляем в формулу (1) значения для $\operatorname{tg} \beta_x$ и $\operatorname{tg} \beta_{1x}$.

$$\Delta x = u \frac{x}{l} \cdot \frac{x - \Delta x}{l}; \quad (6)$$

$$\delta_{x,l} = -\frac{ux^2 2l}{(l^2 + ux)^2} \delta l. \quad (7)$$

Для упомянутых ранее значений параметров из выражения (7) находим $\delta l = 0,40$ мм.

Так как в каждом корректоре имеется две величины l , соответственно определяемые расстояниями между шарнирами 1, 10 и 3, 6 (см. рис. 1), то аналогичным образом можно получить ошибку определения каждого l в отдельности.

Неперпендикулярность коррекционной плоскости и стержня при смещении опорного пальца на величину u вызовет подъем шарнира 1 относительно шарнира 6, а влияние этой погрешности определено в выражении (5). Для $u = 20,00$ мм тангенс угла $\epsilon_{п}$, выражающего отклонение от перпендикулярности,

$$\operatorname{tg} \epsilon_{п} = \frac{0,004}{u}, \quad \epsilon_{п} = 0',7. \quad (8)$$

Отклонение направляющих вертикальной каретки от оси Z прибора (угол ϵ_b) приводит к дополнительному наклону направляющего стержня и смещению подвижного объектива. Так как вертикальная каретка по направляющим передвинется на величину $u \operatorname{tg} \beta_x$, подвижный объектив дополнительно сместится на расстояние $u \operatorname{tg} \beta_x \sin \epsilon_b$, но задно и u уменьшится на такую же величину. Формулу коррекции записываем

$$\Delta x = (u - u \operatorname{tg} \beta_x \sin \epsilon_b) \frac{x}{l} \frac{x - \Delta x + u \operatorname{tg} \beta_x \cdot \sin \epsilon_b}{l}. \quad (9)$$

После несложных преобразований получаем

$$\delta x_b = \left(\frac{u \cdot x}{2l^2} - \frac{ux^2(x - \Delta x)}{2l^2} \right) \frac{\epsilon_b}{\rho}. \quad (10)$$

Допустимая величина угла $\epsilon_b = 2',5$.

Наклон направляющих объективной каретки относительно плоскости XY прибора приводит к тому, что коррекция будет вводиться по наклонной линии. Погрешность в коррекции записываем

$$\delta x_0 = \Delta x (1 - \cos \epsilon_0). \quad (11)$$

Допустимое значение при $\Delta x = 10$ мм $\epsilon_0 = 0',8$.

Непересечение осей шарниров между собой и с осью стержня вызывает дополнительное смещение стержня при его наклоне.

Двухосный шарнир схематически изображен на рис. 2.

OO_1 — первичная ось; $O'O_1'$ — вторичная ось; LL_1 — ось стержня. В точке O разместим координатную систему так, чтобы ось X была направлена вдоль первичной оси. Ошибка кардана: $OO_1 = \delta x$; $O_1O_1' = \delta y$; $OO' = \delta z$.

Из начала координат проводим два вектора \bar{r}_1 и \bar{r}_2 , которые будут фиксировать стержень. Положение вторичной оси определяется вектором \bar{d} .

Для нахождения величины смещения стержня при наклоне, вызванного первичными ошибками шарнира δ_x , δ_y и δ_z , находим значение векторов \bar{r}_1 и \bar{r}_2 после их поворотов сначала вокруг первичной оси на угол β_y , затем вокруг вторичной — на угол β_x . Через две точки, определяемые этими векторами, проводим прямую. Точка пересечения данной прямой с плоскостью XOY будет положением стержня после двух поворотов.

Как известно, между вектором r' после поворота вокруг оси и вектором r до поворота существует зависимость

$$\bar{r}' = A\bar{r}, \quad (12)$$

где A — матрица преобразования.

Пусть система координат $OXYZ$ (рис. 2) повернулась вокруг оси OX на угол β_y . Теперь в новой системе, допустим $OX'Y'Z'$, поворот векторов \bar{r}_1 и \bar{r}_2 вокруг вторичной оси шарнира $O'O_1'$ записывается:

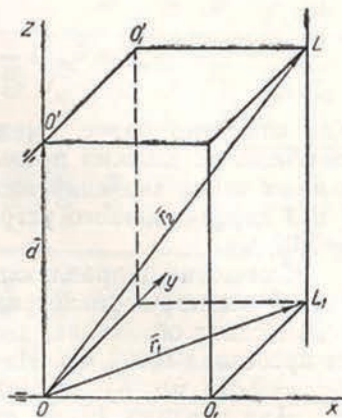


Рис. 2. Первичные ошибки двухосного шарнира.

$$\begin{aligned} r'_1 &= \bar{d} + A_2(\bar{r}_1 - \bar{d}); \\ r'_2 &= \bar{d} + A_2(\bar{r}_2 - \bar{d}). \end{aligned} \quad (13)$$

В результате общего поворота вокруг обеих осей значение векторов

$$\begin{aligned} r_1^* &= A_1 r'_1 = A_1 \bar{d} + A_1 A_2 \bar{r}_1 - A_1 A_2 \bar{d}; \\ r_2^* &= A_2 r'_2 = A_1 \bar{d} + A_1 A_2 \bar{r}_2 - A_1 A_2 \bar{d}. \end{aligned} \quad (14)$$

$$A_1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_y & -\sin \beta_y \\ 0 & \sin \beta_y & \cos \beta_y \end{vmatrix}; \quad A_2 = \begin{vmatrix} \cos \beta_x & 0 & -\sin \beta_x \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta_x & 0 & \cos \beta_x \end{vmatrix}; \quad (15)$$

$$\bar{r}_1 = \begin{vmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ 0 \end{vmatrix}; \quad \bar{r}_2 = \begin{vmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{vmatrix}; \quad \bar{d} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \delta_z \end{vmatrix}.$$

Подставляя (15) в (14), находим:

$$\begin{aligned} \bar{r}_1^* &= \begin{vmatrix} \delta_x \cos \beta_x + \delta z \sin \beta_x \\ -\delta_x \sin \beta_x \sin \beta_y + \delta_y \cos \beta_y + \delta z (\cos \beta_x \sin \beta_y - \sin \beta_y) \\ \delta_x \sin \beta_x \sin \beta_y + \delta_y \sin \beta_y + \delta_z (\cos \beta_y - \cos \beta_y \cos \beta_x) \end{vmatrix}. \quad (16) \\ \bar{r}_2^* &= \begin{vmatrix} \delta_x \cos \beta_x \\ -\delta_x \sin \beta_x \sin \beta_y + \delta_y \cos \beta_y - \delta z \sin \beta_y \\ \delta_y \sin \beta_x \sin \beta_y + \delta_y \sin \beta_y + \delta z \cos \beta_y \end{vmatrix}. \end{aligned}$$

Записывая уравнение прямой, проходящей через две точки, и подставляя в него компоненты векторов r_1'' и r_2'' при $z=0$, получаем

$$y = \delta y : \cos \beta_y; \quad (17)$$

$$x = \delta x : \cos \beta_x + \delta_y \operatorname{tg} \beta_x \operatorname{tg} \beta_y + \delta_z \operatorname{tg} \beta_x.$$

Сдвиг стержня, вызванный первичными ошибками шарнира, записываем так:

$$\delta_{y_{\text{ш}}} = \delta_y \left(1 - \frac{1}{\cos \beta_y} \right);$$

$$\delta_{x_{\text{ш}}} = \delta_x \left(1 - \frac{1}{\cos \beta_x} \right) + \delta_y \operatorname{tg} \beta_x \operatorname{tg} \beta_y + \delta_z \operatorname{tg} \beta_x. \quad (18)$$

Как отмечено ранее, смещение стержня, вызванное одной первичной ошибкой, не должно превышать 0,036 мм. Из формулы (18) для указанных выше значений находим допуски первичных ошибок шарниров 1 и 3 коррекционного устройства $\delta_{x_{1,3}} = 0,32$ мм; $\delta_{y_{1,3}} = 0,14$ мм; $\delta_{z_{1,3}} = 0,07$ мм.

Смещение направляющего стержня из-за погрешностей в шарнирах 6 и 7 вызывают непосредственные смещения объектива. Потребуем, чтобы сдвиг объектива, вызванный одной первичной ошибкой кардана, не превышал 0,002 мм. Из второго выражения (18) получаем:

$$\delta_{x_{6,7}} = 0,018 \text{ мм}, \quad \delta_{y_{6,7}} = 0,008 \text{ мм}, \quad \delta_{z_{6,7}} = 0,004 \text{ мм}.$$

Для кардана 10, на вторичной оси которого жестко крепится коррекционная тарелка, есть основания потребовать, чтобы компоненты вектора \bar{r}_2'' (рис. 2) не отличались от компонент вектора \bar{r}_2 больше следующих значений: $x=y=0,008$ мм, $z=0,004$ мм. Из (16) определяем, что допуски на юстировку шарнира 2 можно принять такими же, как для шарниров 6 и 7.

Исследование точности работы коррекционного устройства стереопроектора можно выполнять по методике, предложенной Лаптевым [1]. В представленной таблице даны результаты исследования коррекционного механизма СПР-3м № 68. Приводятся значения коррекции, определенной при помощи индикатора с точностью отсчета $\pm 0,01$ мм для исправного трансформирующего устройства и значения Δ_x и Δ_y для того же корректора, когда в кардане 1 (рис. 1) была генерирована ошибка $\delta_y = -2,00$ мм. Погрешность в шарнире привела, во-первых, к непараллельности стержней в плоскости ZY и, во-вторых, к непересечению оси стержня со вторичной осью шарнира. Искажения коррекции, вызванные данной ошибкой, рассчитанные по формулам (4), (18) и определенные экспериментально, хорошо согласуются.

На производстве, как правило, юстируют все шарниры стереопроектора с одинаковой точностью (первичные ошибки не должны превышать 0,01 мм).

На основании изложенного выше можно сделать следующие выводы:

1. Нет необходимости юстировать шарниры 1 и 3 (рис. 1) коррекционных устройств СПР с такой высокой точностью, как шарниры 6, 7, 10 и карданы проектирующей системы. Это приводит к экономии рабочего времени и к уменьшению затрат на изготовление высокоточных деталей.

2. Для повышения инструментальной точности прибора следует больше уделять внимания устранению источников первичных ошибок, допуски на которые сравнительно меньше — пересечение первой и второй осей шарниров 6, 7, 10, совпадение в исходном положении центров шарниров 7, 6 и параллельность стержней 5 и 12.

Исследование коррекционного устройства СПР

$x=70,00$ мм; $y=70,00$ мм; $l=182,5$ мм; $\delta_{y_1}=2$ мм

ka	Значение коррекции Δx			Искажение коррекции ошибкой $\delta_{y_1}=2,00$ мм			Значение коррекции Δy			Искажение коррекции ошибкой $\delta_{y_5}=-2,00$ мм		
	теоретическое	практическое	практическое $\delta_{y_1}=2$ мм	теоретическое			кю	практическое	практическое $\delta_{y_1}=2$ мм	экспериментальное	теоретическое	
				экспериментальное	непараллельность стержней	пересечение осей шарнира					непараллельность стержней	пересечение осей шарнира
10,00	-3,07	-3,07	-3,09	0,00	-0,01	10,00	3,06	3,07	3,01	-0,06	-0,08	+0,03
15,00	-2,28	-2,29	-2,30	0,00	-0,01	15,00	2,28	2,29	2,24	-0,05	-0,06	+0,02
18,00	-1,81	-1,81	-1,82	0,00	-0,01	18,00	1,81	1,82	1,78	-0,04	-0,05	+0,02
21,00	-1,35	-1,35	-1,36	0,00	0,00	21,00	1,35	1,35	1,32	-0,03	-0,04	+0,01
24,00	-0,89	-0,89	-0,90	0,00	0,00	24,00	0,89	0,89	0,88	-0,01	-0,02	0,00
27,00	-0,44	-0,44	-0,44	0,00	0,00	27,00	0,44	0,44	0,43	-0,01	-0,01	0,00
30,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
33,00	0,44	0,45	0,45	0,00	0,00	33,00	-0,44	-0,45	-0,44	+0,01	+0,01	0,00
36,00	0,87	0,87	0,87	0,00	0,00	36,00	-0,87	-0,88	-0,86	+0,02	+0,02	0,00
39,00	1,30	1,30	1,30	0,00	0,00	39,00	-1,30	-1,31	-1,28	+0,03	+0,04	-0,01
42,00	1,72	1,73	1,73	0,00	+0,01	42,00	-1,72	-1,73	-1,70	+0,03	+0,05	-0,02
45,00	2,14	2,15	2,16	+0,01	+0,01	45,00	-2,14	-2,15	-2,10	+0,05	+0,06	-0,02
50,00	2,82	2,83	2,85	+0,02	+0,01	50,00	-2,82	-2,83	-2,76	+0,07	+0,08	-0,03

3. Из формул (18) видно, что при расположении двухосного шарнира первичной осью вдоль оси X прибора сдвиг стержня вдоль оси X вызывается тремя первичными ошибками шарнира, а вдоль оси Y действует только первичная ошибка δ_y , поэтому выгоднее размещать шарниры прибора так, чтобы половина погрешностей действовала вдоль оси X , а половина — вдоль оси Y , это также будет способствовать повышению точности инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. «Тр. ЦНИИГАиК», 1967, № 172.

Работа поступила в редколлегию 17 мая 1973 г. Рекомендована кафедрой аэрофотогеодезии Львовского политехнического института.