

В. А. ПОЛОЗНИКОВ, А. П. ТИЩЕНКО

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ ФОТОТЕЛЕВИЗИОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

Одним из методов получения видеоинформации с невозвращаемых космических аппаратов (КА) является фототелевизионная съемка. Ее основные технологические процессы заключаются в следующем: получение снимка фотокамерой и автоматическое проявление его; чтение полученного изображения оптико-механическим сканирующим устройством и преобразование его в серию электрических импульсов, передаваемых по радиоканалу на Землю; воспроизведение на Земле изображения с помощью устройств, аналогичных фототелеграфным. Важное достоинство фототелевизионных систем — менее жесткие требования к радикалу. Полученные снимки сохраняются на борту КА длительное время и могут передаваться на Землю неоднократно.

Для каждого технологического этапа фототелевизионной съемки характерны случайные и систематические искажения снимка, источниками которых являются внутренняя фотографическая рефракция и дисторсия объектива фотокамеры; деформации фотоматериала; особенности работы сканирующих устройств на борту КА; помехи в радиоканале; особенности работы приемных устройств наземного комплекса.

Внутренняя фотограмметрическая рефракция и дисторсия фотокамеры могут быть исключены калибровками съемочной аппаратуры. Для учета влияния остальных источников искажений используется нанесенная на прижимное стекло фотокамеры сетка эталонных крестов, фиксируемая на каждом снимке в момент съемки. В процессе проявления, считывания и передачи на Землю изображения крестов претерпевают те же искажения, что и остальные точки. Это дает возможность выявить закономерности искажений по полю снимка путем сравнения измеренных на полученном фототелевизионном снимке координат X_i , Y_i с их теоретическими значениями X_i^T , Y_i^T , вычисленными по эталонным координатам крестов на прижимном стекле x_i , y_i с учетом технологии получения снимка. Детальное исследование всех геометрических искажений, возникающих на различных этапах получения фототелевизионного снимка, представляется достаточно громоздкой задачей. В то же время, предполагая все преобразования снимка линейными, можно считать основными параметрами этих преобразований следующее: M_X , M_Y — масштабы по осям координат фототелевизионного снимка; $a = \operatorname{tg} \alpha$ — перекося осей координат, так что α — угол отклонения системы координат от прямоугольной. Тогда X_i^T и Y_i^T можно записать так:

$$X_i^T = x_i M_X + a y_i M_Y; \quad Y_i^T = y_i M_Y. \quad (1)$$

Измеренные значения координат крестов отличаются от их теоретических значений (1) на некоторые остаточные погрешности δX_i , δY_i , так что:

$$\delta X_i = X_i - x_i M_X - a y_i M_Y; \quad \delta Y_i = Y_i - y_i M_Y. \quad (2)$$

Параметры M_X , M_Y , a будем находить под условием минимума суммы квадратов остаточных погрешностей.

Введем приближенное значение масштаба по всему полю снимка M_0 :

$$M_X = M_0 + \Delta M_X; \quad M_Y = M_0 + \Delta M_Y. \quad (3)$$

Пренебрегая величинами второго порядка малости, перепишем выражение (1) в виде

$$\begin{aligned} \delta X_i &= (X_i - x_i M_0) - x_i \Delta M_X - y_i M_Y a; \\ \delta Y_i &= (Y_i - y_i M_0) - y_i \Delta M_Y. \end{aligned} \quad (4)$$

Поставленное выше условие приводит к функционалу (2)

$$\Phi(\Delta M_X, \Delta M_Y, a) = \sum_i (\delta X_i)^2 + \sum_i (\delta Y_i)^2 = \min, \quad (5)$$

который достигает своего минимума при

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \Delta M_X} = 0; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta M_Y} = 0; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial a} = 0. \quad (6)$$

С учетом (4) условия (5) запишем

$$\left. \begin{aligned} \Delta M_X \sum_i x_i^2 + a M_0 \sum_i x_i y_i &= \sum_i x_i (X_i - x_i M_0); \\ \Delta M_X M_0 \sum_i x_i y_i + a M_0^2 \sum_i y_i^2 &= M_0 \sum_i y_i (X_i - x_i M_0); \\ \Delta M_Y \sum_i y_i^2 &= \sum_i y_i (Y_i - y_i M_0). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Решая линейные уравнения (7), находим параметры ΔM_X , ΔM_Y , a , которые и дают возможность исправить координаты точек фототелевизионного снимка за линейную часть систематических искажений по формулам

$$X_j^{\text{испр}} = X_j - a X_j; \quad Y_j^{\text{испр}} = Y_j \cdot \frac{\Delta M_X - \Delta M_Y}{M_0 + \Delta M_Y}. \quad (8)$$

Реальная точность исправленных координат зависит от числа эталонных крестов и от их распределения по полю снимка, а также от степени справедливости гипотезы о линейном характере искажений.

Описанная методика была применена для обработки серии космических фототелевизионных снимков, полученных с АМС «Марс-3». На двух из них имеются изображения 45 эталонных крестов, равномерно распределенных по всему полю снимка (рис. 1), на других снимках — пяти-шести эталонных крестов.

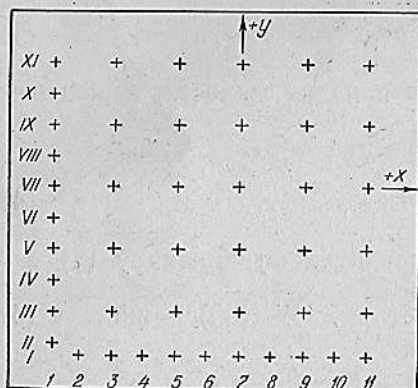


Рис. 1. Схема расположения эталонных крестов.

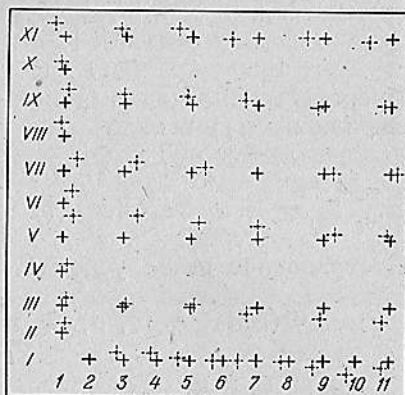


Рис. 2. Схема отклонений контрольных крестов от их эталонного положения после исключения линейной части систематических искажений.

Измерения выполнялись на стереокомпараторе с точностью отсчитывания до 0,01 мм. Координаты крестов измерялись дважды при одной установке снимка на приборе. Средняя квадратическая ошибка положения креста, вычисленная по разности двойных измерений, составила $\pm 0,026$. Определенные в системе прибора координаты крестов приводились к системе прибора с началом в центральном кресте VII-7 и направлением оси абсцисс VII-7 и VII-11. Сравнение приведенных координат одноименных крестов на двух снимках привело к среднему квадратическому расхождению их положений порядка $\pm 0,05$ мм.

Для отыскания параметров, характеризующих линейную часть искажений снимка, использовались осредненные по двум снимкам координаты крестов. Окончательные значения искомых величин после уравнивания и их средние квадратические ошибки следующие: $M_X = 8,349 \pm 0,003$; $M_Y = 8,271 \pm 0,003$; $a = -0,0141 \pm 0,0003$.

Полученные параметры M_X , M_Y , a были использованы для вычисления исправленных координат крестов на снимке в соответствии с формулами (8). При этом поправки в измеренные

координаты достигли величин порядка 1,5 мм. Остаточная погрешность, складывающаяся из нелинейной части систематических искажений и случайных ошибок, получилась равной $\pm 0,14$ мм. Учитывая, что разрешающая способность исследуемых снимков составила 5 линий/мм, можно считать основные систематические искажения исключенными. На рис. 2 показаны остаточные погрешности в положении крестов, увеличенные для наглядности в 50 раз. При этом отчетливо видно преобладание в остаточной погрешности нелинейной части порядка 0,1 мм. Эти искажения могут быть объяснены особенностями работы оптико-механического сканирующего устройства на борту КА [1].

Результаты обработки снимков с неполным составом крестов приведены ниже:

Параметры ср. кв. ош.	Номера снимков					
	1	2	4	5	6	
M_X	8,268	8,268	8,138	8,266	8,263	8,242
m_{M_X}	$\pm 0,008$	$\pm 0,010$	$\pm 0,014$	$\pm 0,009$	$\pm 0,015$	$\pm 0,005$
M_Y	8,302	8,285	8,314	8,309	8,329	8,306
m_{M_Y}	$\pm 0,034$	$\pm 0,022$	$\pm 0,031$	$\pm 0,021$	$\pm 0,004$	$\pm 0,004$
a	-0,043	-0,010	-0,025	-0,013	-0,010	-0,021
m_a	$\pm 0,007$	$\pm 0,004$	$\pm 0,006$	$\pm 0,003$	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$
$M_X - M_Y$	-0,034	-0,017	+0,004	-0,043	-0,066	-0,064
$m_{(M_X - M_Y)}$	$\pm 0,035$	$\pm 0,024$	$\pm 0,034$	$\pm 0,023$	$\pm 0,016$	$\pm 0,006$

Из этих данных видно, что уменьшение эталонных крестов существенно снижает точность определения параметров геометрических искажений фототелевизионных снимков. На основании всего сказанного можно сделать следующие выводы: фототелевизионные снимки содержат существенные геометрические искажения, включающие как случайную, так и систематическую часть, причем последняя носит в основном линейный характер; предлагаемая методика позволяет исключить основную часть этих систематических искажений; для надежного определения параметров искажений желательно иметь достаточное количество впечатанных в снимок эталонных крестов, равномерно расположенных по его полю.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нараева М. К. Работа зеркала качания в развертывающих устройствах автоколлимационного типа. М., 1967.
2. Мазмишвили А. Н. Способ наименьших квадратов. М., «Недра», 1968.

Работа поступила 17 сентября 1975 года.
Рекомендована лабораторией аэрофото-методов Московского государственного университета.