

Л. И. ПЕРМИТИНА, Б. Б. СЕРАПИНАС, А. П. ТИЩЕНКО

## ПЕРВИЧНАЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ЛИМБОВ ПЛАНЕТЫ

При изучении фигуры физической поверхности и рельефа планеты по космическим снимкам ее видимого горизонта исходными данными являются измеренные координаты точек лимба. Прежде чем решать задачу определения параметров фигуры планеты, необходимо подготовить исходную информацию и представить ее в виде, удобном для специальной фотограмметрической обработки. Подготовка, или первичная фотограмметрическая обработка, исходных данных заключается в измерении координат точек лимбов в системе координат прибора, отбраковке ошибочных координат, приведении измерений в систему координат снимка, введении поправок за деформацию фотоматериала, дисторсию объектива, атмосферную рефракцию.

Измерение одиночного снимка лимба выполняется на многоизмерительном приборе, либо на стереоприборе с использованием одного снимка. Количество измеряемых точек зависит от масштаба снимка, длины дуги лимба и его расчлененности. Точки должны располагаться на наиболее характерных элементах рельефа линии лимба: впадинах, подъемах, перегибах местности. При обработке фототелевизионных снимков берут не более одной точки на элемент. Если съемка планеты из космоса производилась с участка орбиты и съемочная аппаратура включалась через короткие промежутки времени, то смежные снимки можно рассматривать как стереопару и выполнять стереоизмерения координат точек лимба. При этом повышается надежность определения принадлежности измеряемой точки к

линии горизонта. Узнать, лежит ли измеряемая точка на линии горизонта, можно несколькими способами. Один из них — работа со снимками лимбов, трансформированными к плоскости горизонта. Для трансформирования снимков угловые элементы внешнего ориентирования необходимо найти из решения обратной фотограмметрической засечки по координатам опорных точек. Это приемлемо для хорошо изученных планет, имеющих развитую сеть опорных пунктов. Затем для преобразованного снимка производится измерение на стереоприборе, причем плоскость одного из снимков считается основной, а второй снимок доворачивается до совпадения плоскостей. При небольших углах наклона можно на стереометре, приведя снимки к общей плоскости, наметить точки, принадлежащие плоскости горизонта одного из снимков, а затем измерить их на стереокомпараторе. Найденные координаты вводят в память ЭВМ для дальнейших вычислений по алгоритмам фотограмметрической обработки лимбов планет.

Принадлежность измеряемых точек снимка к линии горизонта позволяет составить алгоритм отыскания грубых ошибок, допущенных при измерении координат точек лимба, при их переписывании из журнала на бланки исходной информации ЭВМ или при набивке значений на перфокарты. Под грубыми ошибками понимают отклонения значений измеренных координат от некоторой теоретической величины, превышающие заданную константу  $\varepsilon$ . Величину константы  $\varepsilon$  находят, исходя из максимального перепада рельефа планеты в масштабе снимка. При отбраковке исходных данных для точек лимба можно считать, что они лежат на окружности, уравнение которой в общем виде в декартовых прямоугольных координатах имеет вид

$$x^2 + y^2 + Ax + By + C = 0. \quad (1)$$

Окружность, аппроксимирующую лимб на этом снимке, можно провести через любые три точки лимба, координаты которых  $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$  не содержат грубых ошибок. Используя уравнение (1) и условие прохождения окружности через три выбранные точки, вычислим коэффициенты

$$A = -[(x_1^2 + y_1^2)(y_2 - y_3) + (x_2^2 + y_2^2)(y_3 - y_1) + (x_3^2 + y_3^2)(y_1 - y_2)];$$

$$B = (x_1^2 + y_1^2)(x_2 - x_3) + (x_2^2 + y_2^2)(x_3 - x_1) + (x_3^2 + y_3^2)(x_1 - x_2); \quad (2)$$

$$C = -[(x_1^2 + y_1^2)(x_2 y_2 - x_3 y_3) + (x_2^2 + y_2^2)(x_3 y_3 - x_1 y_1) + (x_3^2 + y_3^2)(x_1 y_1 - x_2 y_2)].$$

Координаты центра окружности определяются из формул

$$x_0 = -\frac{A}{2}; \quad y_0 = -\frac{B}{2}. \quad (3)$$

Радиус окружности

$$r_0 = \frac{1}{2} \sqrt{A^2 - B^2 - 4C}. \quad (4)$$

Расстояние каждой  $i$ -й точки лимба от центра окружности

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (5)$$

не должно отличаться от радиуса окружности  $r_0$  на величину, большую  $\varepsilon$ . Для трех точек, через которые проводилась аппроксимирующая лимб окружность,  $r_i = r_0$ . Точки, у которых разность  $r_i - r_0$  превышает по абсолютной величине  $\varepsilon$ , исключают из массива измеренных координат.

Полученные в результате измерений координаты точек лимба измерены в системе координат прибора.

В системе координат оси  $x$  и  $y$  определяются положением меток на снимке, а  $z$  направлена вдоль оптической оси камеры. Для приведения координат точек из системы координат прибора в систему снимка вычитаем из каждой координаты соответствующую координату центрального креста снимка, измеренную в системе прибора ( $x_0^K, y_0^K$ ):

$$x'_i = x_i - x_0^K; \quad y'_i = y_i - y_0^K. \quad (6)$$

Затем умножаем  $x'_i$  и  $y'_i$  на соответствующую строку матрицы поворота осей на угол  $\gamma$ :

$$x''_i = x'_i \cos \gamma + y'_i \sin \gamma; \quad y''_i = -x'_i \sin \gamma + y'_i \cos \gamma. \quad (7)$$

Угол  $\gamma$  вычисляется как угол между осью  $x$  прибора и прямой, проходящей через крайний правый крест на оси  $x$  и центральный крест:

$$\gamma = \arctg \frac{y^K - y_0^K}{x^K - x_0^K}. \quad (8)$$

Координаты точек лимба можно исправить за линейные масштабные искажения, обусловленные деформацией фотоматериала. Эти поправки находят по разностям между калиброванными и измеренными значениями координат крестов. Калиброванные значения, вычисляемые по координатам соответствующих крестов сетки на прижимном столе фотоаппарата, могут быть исправлены также за дисторсию объектива и рефракцию атмосферы. В этом случае их влияние будет учтено.

Поправки и измеренные значения координат точек снимка, в том числе и координат эталонных крестов, можно представить в виде полинома первой степени:

$$\Delta x_i = a_{11}x_i'' + a_{12}y_i'' + a_{13}; \quad \Delta y_i = a_{21}x_i'' + a_{22}y_i'' + a_{23}. \quad (9)$$

Коэффициенты полинома (9) определяют по разностям между калиброванными и измеренными координатами крестов:

$$\Delta x_i^K = x_{ih}^K - x_i^K; \quad \Delta y_i^K = y_{ih}^K - y_i^K, \quad (10)$$

где  $x_{ih}^K, y_{ih}^K$  — калиброванные значения;  $x_i^K, y_i^K$  — измеренные.

Вычисленные разности (10) используют для отыскания коэффициентов уравнений (9). Задача решается по способу наименьших квадратов. Находят минимум выражения

$$\Phi = \sum_{i=1}^n (\Delta x_i^K - a_{11}x_i^K - a_{12}y_i^K - a_{13})^2 + \\ + \sum_{i=1}^n (\Delta y_i^K - a_{21}x_i^K - a_{22}y_i^K - a_{23})^2,$$

откуда получают две системы нормальных уравнений:

$$\begin{bmatrix} [x_i^K x_i^K] & [x_i^K y_i^K] & [x_i^K] \\ [x_i^K y_i^K] & [y_i^K y_i^K] & [y_i^K] \\ [x_i^K] & [y_i^K] & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\Delta x_i^K x_i^K] \\ [\Delta x_i^K y_i^K] \\ [\Delta x_i^K] \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} [x_i^K x_i^K] & [x_i^K y_i^K] & [x_i^K] \\ [x_i^K y_i^K] & [y_i^K y_i^K] & [y_i^K] \\ [x_i^K] & [y_i^K] & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{21} \\ a_{22} \\ a_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\Delta y_i^K x_i^K] \\ [\Delta y_i^K y_i^K] \\ [\Delta y_i^K] \end{bmatrix}$$

$n$  — число измеренных крестов.

Коэффициенты уравнений (9) можно вычислить для всего снимка, используя разности для всех крестов. Практически коэффициенты линейных полиномов определяют для каждой точки снимка по разностям ближайших к ней крестов. Это дает возможность лучше исключить особенности местных деформаций снимка. Чаще всего выбирают четыре креста, ближайших

к измеренной точке лимба. Найденные из решения систем уравнений (11) коэффициенты  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{13}$ ,  $a_{21}$ ,  $a_{22}$ ,  $a_{23}$  используют для вычисления поправок в координаты точки лимба по формуле (9). Исправленные за деформацию координаты точки лимба определяют как

$$x_i^i = x_i'' + \Delta x_i; \quad y_i^i = y_i'' + \Delta y_i. \quad (12)$$

При калибровке аэрофотоаппарата можно получить табличные данные величины  $\Delta r_i$  радиальной дисторсии, являющейся функцией расстояния  $r_i$  от главной точки снимка [4]. Если значение  $\Delta r_i$  введем в память ЭВМ в виде таблицы, то, вычислив для каждой измеренной точки лимба ее расстояние от начала координат, получим исправленные за дисторсию координаты по формулам:

$$x_i^d = x_i^i - \frac{x_i^i}{r_i} \Delta r_i; \quad y_i^d = y_i^i - \frac{y_i^i}{r_i} \Delta r_i. \quad (13)$$

При отсутствии данных о дисторсии объектива поправки определяют по алгоритму введения поправок за деформацию фотоматериала. Вместо координат крестов используют координаты звезд или опорных точек, изобразившихся на снимке.

Если атмосфера фотографируемой из космоса планеты изучена хорошо, необходимо вводить поправки за смещение изображения точек местности на снимке в направлениях от точки надира в результате искривления светового луча в атмосфере (фотограмметрическая рефракция). Во многих случаях влиянием фотограмметрической рефракции можно пренебречь, но иногда (особенно для точек горизонта снимаемой из космоса планеты) учет рефракции представляет практический интерес. Формулы введения поправок за рефракцию в работах [1] и [3] получены для ориентации вертикальной оси  $z$  отвесно с направлением на точку надира, так как обычно нужен переход от наклонного снимка к горизонтальному. Ниже приведены формулы учета фотограмметрической рефракции для аэрокосмических снимков, не требующие такого перехода. Для вычисления поправок необходимо знать элементы внешнего ориентирования снимка относительно планетоцентрической системы координат, то есть радиус-вектор центра проектирования

$\vec{R}_s$  и матрицу ориентации  $D$ :

$$D = (\vec{d}_1, \vec{d}_2, \vec{d}_3), \quad (14)$$

где  $\vec{d}_i$  — вектор,  $i$ -й столбец матрицы  $D$ .

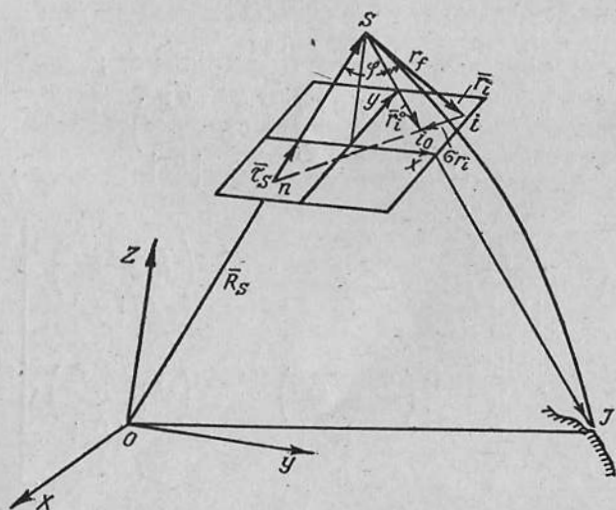
Положением точки надира на снимке при приближенном учете сжатия планеты можно считать пересечение радиус-вектора  $\vec{R}_s$  с плоскостью снимка. Произведение  $D^T \vec{R}_s$  определяет радиус-вектор центра проектирования  $S$  в системе снимка.

Вектор, составленный из направляющих косинусов  $D^T \vec{R}_S$ , обозначим  $\vec{\tau}_S$ :

$$\vec{\tau}_S = \frac{D^T \vec{R}_S}{|D^T \vec{R}_S|} = \begin{bmatrix} \tau_{Sx} \\ \tau_{Sy} \\ \tau_{Sz} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Учитывая, что  $|\vec{\tau}_S| = 1$  и  $|D^T \vec{R}_S| = |\vec{R}_S|$ , можно написать

$$\vec{\tau}_S = \begin{bmatrix} \left( \vec{d}_1, \frac{\vec{R}_S}{|\vec{R}_S|} \right) \\ \left( \vec{d}_2, \frac{\vec{R}_S}{|\vec{R}_S|} \right) \\ \left( \vec{d}_3, \frac{\vec{R}_S}{|\vec{R}_S|} \right) \end{bmatrix}. \quad (16)$$



Смещение изображения точки поверхности планеты вследствие влияния фотограмметрической рефракции атмосферы.

Геометрическая сторона влияния фотограмметрической рефракции поясняется на рисунке, где  $r_f$  — угол фотограмметрической

ской рефракции. Изображение точки местности  $y$  смещается из точки  $i_0$  в точку  $i$  вдоль линии  $n_i$  по направлению от точки ка-  
дира. Измеренный вектор  $\vec{r}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ -f \end{bmatrix}$  после учета угла  $r_f$  пре-

образуется в неискаженный рефракцией вектор  $\vec{r}_i^0$  введением вектора поправок

$$\delta \vec{r}_i = \begin{bmatrix} \delta y_i \\ \delta x_i \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

$$\vec{r}_i^0 = \vec{r}_i + \delta \vec{r}_i.$$

Вследствие компланарности векторов  $\vec{r}_i$ ,  $\vec{r}_i^0$  и  $\vec{\tau}_s$  из векторных произведений  $\vec{r}_i \times \vec{r}_i^0$ ,  $\vec{\tau}_s \times \vec{r}_i^0$  получим

$$\vec{r}_i^0 = \vec{r}_i + \alpha_i A_{\vec{r}_i}, \quad (18)$$

$$\text{где} \quad \alpha_i = \frac{-\frac{\sin r_{fi}}{\sin \varphi_i}}{\frac{f}{|\vec{r}_i|} + \frac{\sin r_{fi}}{\sin \varphi_i} \left( \vec{d}_3, \frac{\vec{R}_s}{|\vec{R}_s|} \right)}; \quad (19)$$

$$A = \begin{bmatrix} \left( \vec{d}_3, \frac{\vec{R}_s}{|\vec{R}_s|} \right) & 0 & -\left( \vec{d}_1, \frac{\vec{R}_s}{|\vec{R}_s|} \right) \\ 0 & \left( \vec{d}_3, \frac{\vec{R}_s}{|\vec{R}_s|} \right) & -\left( \vec{d}_2, \frac{\vec{R}_s}{|\vec{R}_s|} \right) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Угол  $\varphi$  можно определить следующим образом:

$$\sin (\varphi + r_f)_i = \frac{|\vec{R}_s \times \vec{r}_i|}{|\vec{R}_s| \cdot |\vec{r}_i|}; \quad \varphi_i = \arcsin (\varphi + r_f)_i - r_{fi}. \quad (21)$$

В большинстве случаев космической съемки угол фотограмметрической рефракции  $r_f$  мал [1], поэтому для вычисления скаляра  $d_i$  принимаем:

$$\sin \varphi_i \approx \sin (\varphi + r_f)_i; \quad \sin r_{fi} = \frac{r_{fi}''}{\rho''}. \quad (22)$$

Угол рефракции  $r_f$  получают на основе изучения строения атмосферы планеты. При нахождении угла рефракции для Земли может быть использована формула И. Ф. Куштина [2]:

$$r_f'' = 0'',6369 \frac{P}{H} \operatorname{tg} \{ \varphi_i + [0,8094H - 0,0398T] \operatorname{tg} \varphi_i \}, \quad (23)$$

где  $P$  — давление воздуха на поверхности планеты, мм рт. ст.;  $T$  — температура воздуха на поверхности,  $K$ ;  $H$  — высота центра проектирования над поверхностью планеты. На основании изложенного алгоритма можно вычислить поправки в координаты космического снимка за влияние фотограмметрической рефракции.

Приведенные выше алгоритмы предварительной фотограмметрической обработки снимков лимбов планет (кроме поправок за рефракцию) были реализованы в ряде программ и использованы при обработке фототелевизионных снимков Марса, полученных с космического аппарата Марс-3 в 1972 г. Координаты точек лимбов Марса после предварительной фотограмметрической обработки были использованы как исходная информация для последующей обработки, проводимой с целью определения углов внешнего ориентирования снимков, параметров сечения планеты, построения высотных профилей и изучения фигуры физической поверхности планеты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гонин Г. Б. Искажение координат аэроснимков и модели вследствие влияния атмосферной рефракции и кривизны земной поверхности. — В сб.: Фотограмметрическая обработка и дешифрование аэроснимков. М., «Наука», 1967.
2. Куштин И. Ф. Рефракция световых лучей в атмосфере. М., «Недра», 1971.
3. Лобанов А. Н. Аналитическая фотограмметрия. М., «Недра», 1972.
4. Пособие по фотограмметрии. Перевод с англ. М., «Недра», 1970.

Работа поступила 25 декабря 1975 года.  
Рекомендована лабораторией аэрофото-  
методов Московского государственного  
университета.