

Таблица 6. Ошибки измерения высоты и горизонтальной скорости по данным ТСНН

Расстояние до поверхности Фобоса	Ошибка измерения расстояния, м		Ошибка оценки горизонтальной скорости (ШТК), м/с
	УТК	ШТК	
30 км	—	—	—
10 км	1100	—	—
3 км	170	1900	0,82
1 км	43	210	0,28
300 м	11	20	0,084
200 м	—	9,1	0,056
100 м	—	2,5	0,029
30 м	—	0,32	0,0097
10 м	—	0,066	0,0042

Заключение

Проработка основных режимов работы телевизионной системы навигации и наблюдения подтвердила возможность решения стоящих перед ТСНН навигационных и научных задач в проекте «Фобос-Грунт».

Литература

1. Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Краснопецева Е.Б., Железнов М.М. Анализ задач и условий телевизионных наблюдений Фобоса и Марса с КА «Фобос-Грунт»: Препринт. Пр-2128. М.: ИКИ РАН, 2006.
2. Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Краснопецева Е.Б. Телевизионные средства навигации и наблюдения проекта «Фобос-Грунт» // Космич. приборостроение. Координатно-временные системы с использованием космич. технологий. Приборы для космич. исслед. Земли и планет: Сб. тр. по результатам выездного семинара / Под ред. Р.Р. Назирова. Россия, Таруса, 7–9 июня 2006. М.: ИКИ РАН, 2007. С. 226–231.
3. Жуков Б.С., Жуков С.Б., Гришин В.А., Гордеев Р.В. Бортовое программно-алгоритмическое обеспечение информационной поддержки посадки на Фобос. (Статья в настоящем сборнике, с. 294.)

ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЙ ФОБОСА И ИХ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА В ЗАДАЧАХ ПРИПЛАНЕТНОЙ НАВИГАЦИИ

Т.В. Кондратьева, А.В. Никитин

Институт космических исследований
Российской академии наук, Москва

Рассмотрены вопросы визуализации и построения цифровой модели поверхности (рельефа) Фобоса (ЦМР). Приведены особенности построения модельных снимков. Предложен алгоритм обработки стереопары, сформированной для широкоугольной камеры ТСНН, с целью восстановления ЦМР по результатам съемки поверхности Фобоса. Проверка работоспособности алгоритма проведена на модельных изображениях, при этом точность решения задачи составила 9 м по высоте и в плане.

Предложены рекомендации для конвергентной съемки поверхности Фобоса узкоугольной камерой с целью получения точности определения координат в плане и по высоте на уровне 0,5 м с квазисинхронной орбиты.

Problems of the Phobos digital terrain model (DTM) creation and visualization are considered. Features of the image modeling are listed. An algorithm for processing a stereo pair formed for the wide-angle camera of the TV System for Navigation and Observation in order to restore DTM based on the Phobos surface imaging data is proposed. The algorithm operation ability was tested on model images. The task solution accuracy was 9 m for height and plan.

Recommendations for the Phobos surface convergent imaging from the quasi-synchronous orbit by the narrow-angle camera to achieve coordinates determination accuracy of about 0.5 m for the height and plan are given.

Введение

Эффективность отработки задач припланетной навигации на этапах облета Фобоса на квазиспутниковой орбите может быть значительно повышена при использовании трехмерной модели Фобоса. Такая модель была создана в рамках проекта «Фобос-Грунт».

Трехмерная модель Фобоса была использована для построения модельных изображений Фобоса при исследовании

алгоритмов стереообработки изображений Фобоса, получаемых при его облете с квазиспутниковой орбиты.

Рассмотренные алгоритмы необходимы для более надежного выбора места посадки, построения цифровой модели рельефа района посадки и определения координат точек съемки.

Для решения данной задачи, а также для построения цифровой модели Фобоса с высоким разрешением (до 1 м) необходимо проводить стереосъемку поверхности с углами засечки, достаточными для фотограмметрической обработки полученных материалов. При планировании стереосъемки необходимо указывать такие параметры как: высота съемки, интервал между моментами экспонирования, фокусное расстояние камеры (18 мм — широкоугольная телевизионная камера (ШТК) или 500 мм — узкоугольная телевизионная камера (УТК)), угол визирования между направлением на центр Фобоса и съемочной камерой, процент перекрытия стереоизображений.

В статье для узкоугольной и широкоугольной камер представлены формулы и результаты расчета следующих из указанных выше параметров: высота, интервал и процент перекрытия.

Особое место занимает выбор угла между направлением на центр Фобоса и съемочной камерой. С этой целью были построены изображения с вычисленными параметрами для стереосъемки со значениями угла визирования в диапазоне от $\pm 10^\circ$.

Решена задача определения элементов взаимного ориентирования снимков и проведена оценка точности результатов. На основе анализа данных получены требуемые углы разворота и расстояние до поверхности Фобоса при визировании на центр с помощью ШТК.

В статье представлены алгоритм и математические основы решения задачи стереообработки изображений и построения стереомодели участка поверхности.

1. Трехмерная модель поверхности Фобоса

Исходными данными для трехмерной модели (рис. 1) послужила цифровая модель Фобоса, разработанная Томасом

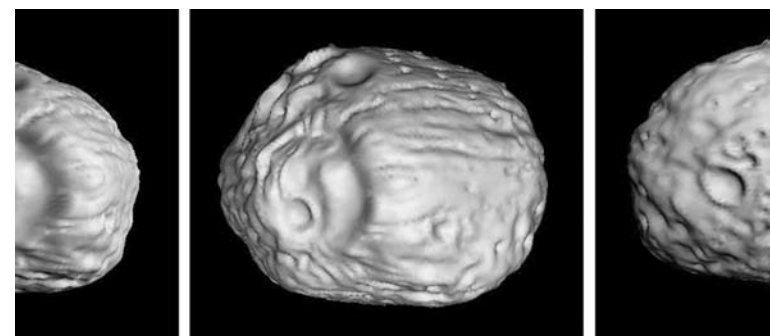


Рис. 1. Трехмерная модель Фобоса в разных ракурсах

[1] с шагом 1° по широте и долготе. При создании модели были использованы средства трехмерной компьютерной графики — 3DSMax, DeepExploration и DirectX. Рабочий интерфейс программы представлен в среде Borland Delphi. Интерфейс позволяет моделировать на экране монитора трехмерное изображение Фобоса под заданными углами наблюдения и на заданных расстояниях, задавать вращение Фобоса вокруг его осей, положение камеры наблюдения, направление освещения и регулировать яркость источника света.

2. Использование стереосъемки на различных участках траектории полета к Фобосу

Основными этапами полета КА к Фобосу являются [2]:

- трасса перелета: расстояние до Марса 3...6 млн км;
- полет по орбитам:
 - эллиптической вокруг Марса: расстояние до Марса 30...40 тыс. км, расстояние до Фобоса 25...45 тыс. км;
 - наблюдения, расстояние до Марса 9900 км, расстояние до Фобоса 500...20 000 км;
 - квазиспутниковой, расстояние до Фобоса 30...70 км;
- посадка;
- отлет;
- возвращение на Землю.

Космический аппарат стартует с Земли и летит в сторону Марса примерно в течение года. На подлете к Марсу проводятся необходимые навигационные наблюдения Марса, Фобоса, и аппарат выходит на эллиптическую орбиту вокруг Марса, плоскость которой совпадает с плоскостью орбиты Фобоса. Затем аппарат переходит на круговую орбиту наблюдения, высота которой превышает высоту орбиты Фобоса на 500 км и совпадает с периодом обращения Фобоса вокруг Марса. Проводится коррекция орбиты с тем, чтобы выйти на квазиспутниковую орбиту с расстояниями 30...70 км до Фобоса. На следующем этапе осуществляется посадка с высоты 30 км до касания поверхности. Выполняется основная цель миссии — забор грунта, и аппарат возвращается на Землю.

На эллиптической орбите, орбите наблюдения и квазиспутниковой орбите существует возможность проводить наблюдение участков поверхности Фобоса и Марса с помощью телевизионных средств.

Можно решать следующие задачи:

- навигационные наблюдения Марса и Фобоса;
- картирование поверхности Фобоса;
- оценивание высот рельефа выбранного участка посадки с высокой точностью.

Для отработки решения указанных задач создается стенд, моделирующий различные этапы траектории полета космического аппарата.

В статье, в частности, рассматривается стенд, который позволяет с помощью средств трехмерной компьютерной графики моделировать полет КА по орбите наблюдения и квазиспутниковой орбите на экране цифрового монитора.

Стереосъемка может быть использована при решении таких задач как картирование поверхности Фобоса, а также высокоточное определение высот рельефа места посадки и выбор наиболее безопасного участка для посадки КА. При решении указанных задач требуется достаточно высокая точность определения координат точек снимаемой поверхности.

В качестве телевизионных средств используются две узкоугольные камеры с фокусным расстоянием 500 мм и две

широкоугольные камеры с фокусным расстоянием 18 мм. Камеры имеют одинаковые ПЗС-матрицы 1004×1004 пикселей, размер пиксела 7,4×7,4 мм. В статье рассматривается алгоритм определения координат точек поверхности, снимаемой обеими камерами.

3. Управление параметрами стенда при формировании модельных стереоизображений поверхности Фобоса

Для формирования стереоизображений необходимо в системе координат объекта съемки задавать координаты центра съемочных камер.

Система отображения стенда, моделирующего поверхность Фобоса (рис. 2), позволяет задавать:

- поворот Фобоса вокруг осей планетоцентрической системы координат на заданные углы;
- координаты центра съемки камеры S;
- координаты центра источника света и направление освещения;
- яркость источника света;
- координаты точки пересечения камеры со снимаемой поверхностью N.

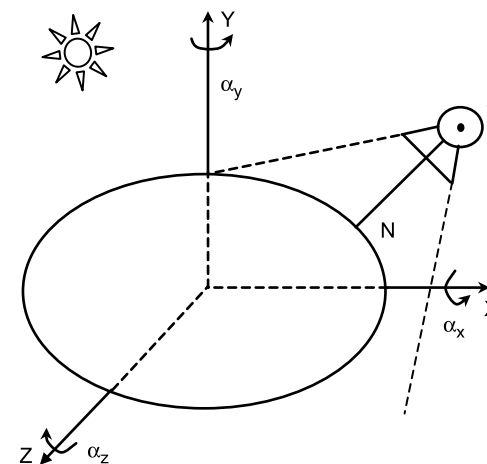


Рис. 2. Система отображения стенда, моделирующего поверхность Фобоса

При построении стереоизображений необходимо задавать координаты центров камер, образующих стереопару, так, чтобы перекрытие изображаемой поверхности было не менее 60 %.

4. Определение параметров съемки для различных способов получения стереоизображений

Стереосъемка, как правило, выполняется двумя способами:

- 1) нормальный случай съемки — направления съемки перпендикулярны направлению, соединяющему центры съемки;
- 2) конвергентная съемка — направления съемки пересекаются в одной точке, находящейся на поверхности объекта съемки.

Основным параметром, необходимым для формирования стереоизображений, является длина базиса съемки, т. е. расстояние между задними узловыми точками объективов камер.

Нормальный случай съемки (рис. 3) используется для широкоугольных камер.

При этом базис съемки рассчитывается по следующей формуле:

$$B = \frac{\left(1 - \frac{P}{100}\right) l}{f} H, \quad (1)$$

где B — базис съемки, км; P — процент перекрытия изображений; l — размер изображения, мм; H — высота съемки, км; f — фокусное расстояние камеры, мм.

Так, для широкоугольной телевизионной камеры при $f = 18$ мм с квазиспутниковой орбиты ($H = 22,8$ км) базис съемки должен иметь длину 3,75 км. При этом элемент разрешения будет составлять 9 м. Интервал между экспонированиями при высоте орбиты 22,8 км — 9 мин.

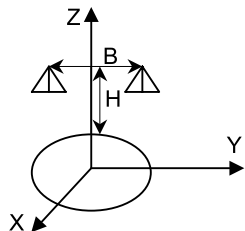


Рис. 3. Схема нормальной съемки

Рис. 4. Схема конвергентной съемки

Если применить эту формулу для узкоугольных камер, то получится слишком малый базис и, как следствие, низкая точность определения высот точек снимаемой поверхности. Поэтому для узкоугольных камер необходимо использовать конвергентную съемку (рис. 4):

$$B = \frac{2H}{\operatorname{tg}(90 - \gamma)}, \quad (2)$$

где B — базис съемки; γ — угол наклона камеры к базису; H — высота съемки.

Результаты расчета параметров конвергентной съемки приведены в табл. 1.

Исходя из данных табл. 1 оптимальным для съемки заданного участка будет угол конвергенции 30° при длине базиса 32 км. Отсюда интервал между получениями снимков стереопары будет составлять 1,3 ч при обороте по квазиспутниковой орбите вокруг Фобоса на данной высоте за 8,3 ч.

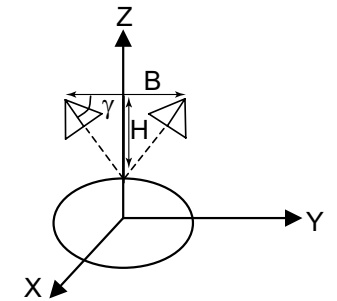


Таблица 1. Параметры конвергентной съемки

Продольный угол наклона камеры к базису γ , град	Базис съемки B , км	Расстояние до заданного участка съемки L , км	Разрешение камеры с $f = 500$ мм $r(500)$, м	Разрешение камеры с $f = 18$ мм $r(18)$, м
1	0,981	37,483	0,6	15,4
5	4,918	37,561	0,6	15,4
10	9,913	37,806	0,6	15,5
20	20,462	38,851	0,6	16,0
30	32,458	40,842	0,6	16,8
40	47,174	44,284	0,7	18,2
50	67,000	50,269	0,7	20,7
60	97,375	61,443	0,9	25,3
70	154,463	85,845	1,3	35,3

5. Оценка эквивалентного фокусного расстояния камеры стенда

Оценка фокусного расстояния камеры стенда проводится по фронтальному (рис. 5а) и торцевому (рис. 5б) изображениям Фобоса. Торцевое изображение Фобоса соответствует стороне Фобоса, наблюдаемой с Марса. Так как известны диаметры трех осей эллипсоида, то, задаваясь одной высотой съемки, можно построить таблицу определения эквивалентного фокусного расстояния (табл. 2). Расчет фокусного расстояния производится по формуле

$$f = \frac{l}{L} H, \quad (3)$$

где f — фокусное расстояние камеры стенда, пиксел; l — число элементов изображения объекта съемки, пиксел; H — высота съемки, км, L — расстояние на объекте съемки, км (рис. 5в).

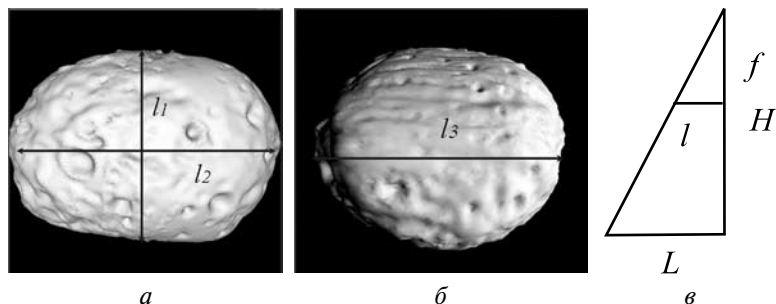


Рис. 5. Оценка эквивалентного фокусного расстояния камеры: а — фронтальное изображение Фобоса; б — торцевое изображение Фобоса; в — схема связи линейных размеров объекта съемки с линейными размерами его изображения

Таблица 2. Оценка эквивалентного фокусного расстояния

H , км	l , пиксел	L , км	f , пиксел
21,39	553	18,6	635,95
21,39	800	26,6	643,30
21,39	680	22,2	655,19
			644,81

6. Построение стереоизображений Фобоса

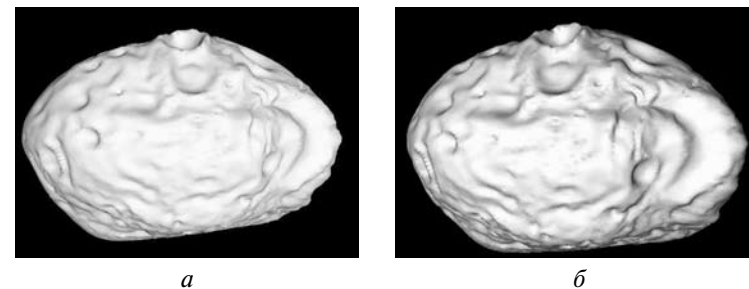


Рис. 6. Сформированные снимки стереомодели Фобоса: а — снимок, полученный первой камерой (левый), в синем спектральном канале; б — снимок, полученный второй камерой (правый), в красном спектральном канале

При построении стереоизображений были сформированы два снимка трехмерной модели поверхности Фобоса. Оба снимка с углом наклона 10° . Длина базиса съемки 9,9 км. Каждый снимок имеет три спектральных канала RGB.

Для построения анаглифического стереоизображения левый снимок представляется синим спектральным каналом, правый — красным.

Совместив изображения спектральных каналов и сделав одно из них полупрозрачным, получим анаглифическое стереоизображение поверхности при конвергентной съемке (рис. 7).

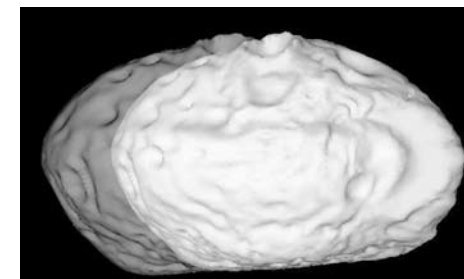


Рис. 7. Анаглифическое стереоизображение поверхности Фобоса при конвергентной съемке

Просмотр полученного изображения в анаглифических очках выявил наличие визуального стереоэффекта и, как следствие, принципиальную возможность построения стереоизображений с целью их последующей обработки для оценки расстояний до снимаемой поверхности и ее картирования.

7. Алгоритм фотограмметрической обработки полученных изображений

Обработку полученных изображений предлагается вести по следующей схеме:

- выравнивание яркости и контраста изображений;
- выбор контурных точек на обоих изображениях (по наибольшей дисперсии);
- определение соответственных точек;
- составление и решение системы уравнений компланарности по способу наименьших квадратов и оценка точности избыточной системы;
- определение координат модели для каждой соответственной точки методом двойной обратной фотограмметрической засечки в системе координат левого снимка;
- внешнее ориентирование модели по опорным точкам;
- построение сети маршрутной триангуляции.

Выравнивание яркости и контраста изображения выполняется с целью получения идентичных по фотометрическому критерию областей для последующей обработки.

Выбор контурных точек осуществляется на обоих изображениях с целью определения наиболее пригодных областей с точки зрения алгоритма идентификации точек и локализации их центров.

Определение соответственных точек выполняется с помощью алгоритмов идентификации с целью получения координат соответственных точек на обоих изображениях.

По координатам соответственных точек определяются векторы-направления на одноименные точки съемки. С использованием двух углов направления базиса съемки и трех углов ориентирования правого снимка относительно левого

снимка *составляется и решается по способу наименьших квадратов система уравнений компланарности* для изображений каждой контурной точки.

После определения относительного расположения съемочных камер вычисляются трехмерные координаты точек в системе координат левого снимка. При этом задается априорное значение длины базиса съемки.

На основе координат опорных точек в системе координат Фобоса осуществляется переход от координат точек модели к координатам точек в системе координат снимаемой поверхности. Таким образом, абсолютизируется полученная модель.

Объединяя модели между собой, *строят сеть маршрутной триангуляции в системе координат снимка*, полученного левой камерой.

Далее можно аппроксимировать построенную сеть при помощи эллипсоида вращения и определить его параметры и координаты каждой точки сети в системе координат эллипсоида.

7.1. Выравнивание яркости и контраста изображений

Выравнивание выполняется в два этапа:

1. Определение минимальной и максимальной яркости (рис. 8) на правом и левом изображениях.

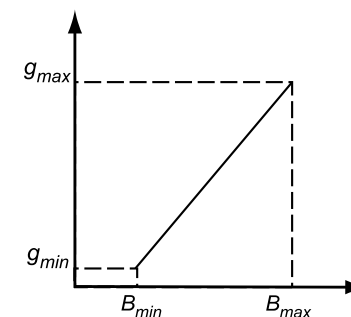


Рис. 8. Выравнивание яркости изображения

2. Коррекция каждой яркости правого изображения по формуле

$$g_{ij} = \frac{B_{ij} - B_{\min}}{B_{\max} - B_{\min}} (g_{\max} - g_{\min}) + g_{\min}, \quad (4)$$

где B — яркость левого изображения, g — яркость правого изображения.

7.2. Выбор соответственных точек на стереоснимках поверхности Фобоса

Выбор соответственных точек (рис. 9) осуществляется двумя путями — интерактивным при участии оператора и автоматическим.

Интерактивный путь используется только при существенной разнице между яркостями изображения. При этом оператор визуально выбирает идентичные точки на изображениях и фиксирует их координаты относительно верхнего левого угла на изображении с точностью до 0,5 элемента разрешения.

Автоматический путь используется при близких яркостях изображений и выполняется по следующему алгоритму.

1. Изображение разбивается на фрагменты размером 11×11 элементов. В каждом фрагменте рассчитывается дисперсия яркости. Затем фрагменты упорядочиваются по убыванию дисперсии и отбираются первые 20 фрагментов.

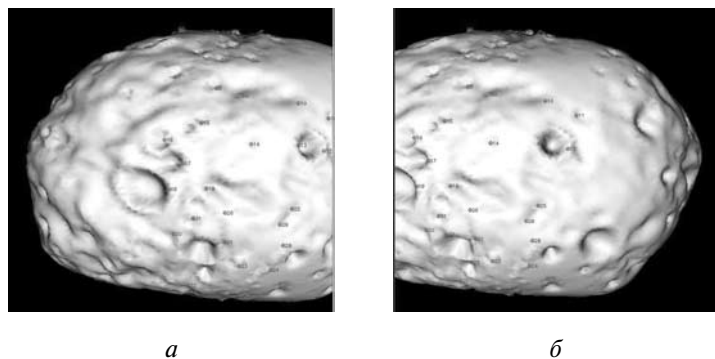


Рис. 9. Выбор соответственных точек на стереоснимках поверхности Фобоса: a — левый стереоснимок; b — правый стереоснимок

2. Внутри каждого фрагмента определяются координаты локального максимума разностного изображения с субпиксельной точностью с помощью метода пороговой отсечки и центрального взвешенного.
3. С использованием размера элемента разрешения, координат главной точки и координат центра фрагмента определяются координаты точки изображения по формулам

$$\begin{aligned} x &= (i - x_0)ps, \\ y &= (y_0 - j)ps, \end{aligned} \quad (5)$$

где ps — размер пиксела, мм.

4. Рассчитываются все сочетания разностей между абсциссами и ординатами точек левого и правого изображений.
5. Определяется число пар точек, соответствующих каждой разности, с точностью до трех элементов разрешения.
6. Разность, имеющая наибольшее число пар, считается оптимальной.
7. По оптимальной разности номера пар идентифицируются координаты точек и определяется таблица координат соответственных точек на левом и правом снимках.

Составляется и решается система уравнений взаимного ориентирования снимков.

Для каждой соответственной точки требуется составить одно уравнение компланарности трех векторов (рис. 10) [3].

Три вектора стереосъемки — вектор базиса съемки, вектор направления на изображение соответственной точки на левом снимке, вектор направления на изображение соответственной точки на правом снимке — должны лежать в одной плоскости.

Чтобы выполнить условие стереосъемки, необходимо повернуть правый снимок относительно левого на три угла: продольный, поперечный и разворота, — а также изменить направление базиса съемки.

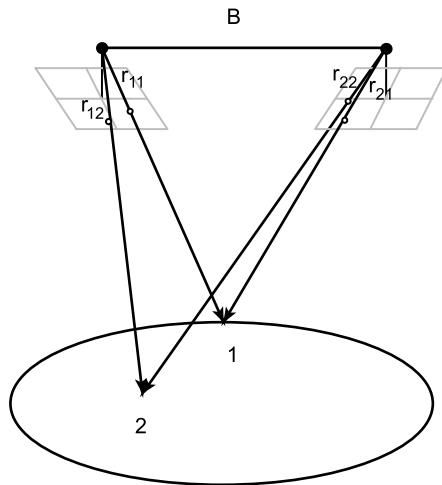


Рис. 10. Схема получения изображения точек поверхности Фобоса на стереопаре: r_{11} — радиус-вектор на изображение точки 1 в системе координат левого снимка; r_{12} — радиус-вектор на изображение точки 2 в системе координат левого снимка; r_{21} — радиус-вектор на изображение точки 1 в системе координат правого снимка; r_{22} — радиус-вектор на изображение точки 2 в системе координат правого снимка

Координаты базиса съемки могут быть получены исходя из длины базиса B и двух углов его направления τ и ν по формулам

$$\begin{aligned} B_x &= B \cos \tau \cos \nu, \\ B_y &= B \sin \tau \cos \nu, \\ B_z &= B \sin \nu. \end{aligned} \tag{6}$$

Направления на изображения левого и правого снимков могут быть вычислены по формулам:

$$r_1 = \begin{pmatrix} x_1 - x_0 \\ y_1 - y_0 \\ -f \end{pmatrix}; r_2 = \begin{pmatrix} x_2 - x_0 \\ y_2 - y_0 \\ -f \end{pmatrix}; r_2' = Ar_2, \tag{7}$$

где x_0, y_0, f — элементы внутреннего ориентирования снимков, A — матрица поворота системы координат правого снимка относительно системы координат левого снимка.

Тогда уравнение компланарности для каждой соответственной точки будет выглядеть следующим образом:

$$F = \begin{vmatrix} B_x & B_y & B_z \\ r_{1x} & r_{1y} & r_{1z} \\ r'_{2x} & r'_{2y} & r'_{2z} \end{vmatrix} = 0; \tag{8}$$

$$F = 0;$$

$$\sum_{i=0}^N \frac{dF}{dX} \Delta X = -F_0. \tag{9}$$

Вычислив частные производные и решая полученную систему методом последовательных приближений, получим искомые пять неизвестных: три угла наклона правого снимка и два угла направления базиса съемки.

В качестве начальных приближений задаются направление и априорная длина базиса съемки, нулевые углы наклона направления базиса и нулевые углы наклона правого снимка относительно левого.

7.3. Определение координат точек цифровой модели объекта съемки

Координаты цифровой модели снимаемой поверхности можно определить следующим образом:

$$N = \frac{B_x + \frac{r'_2}{f} B_z}{r_{1x} - r'_{2x}}, \tag{10a}$$

$$X = Nr_{1x},$$

$$Y = Nr_{1y}, \tag{10б}$$

$$Z = Nf.$$

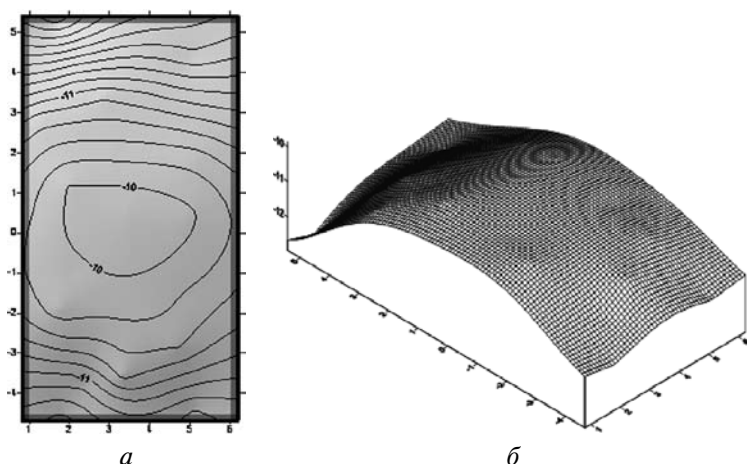


Рис. 11. Цифровая модель рельефа (ЦМР) участка поверхности Фобоса: *а* — горизонтали относительной ЦМР на участке снимаемой поверхности; *б* — объемное представление относительной ЦМР снимаемой поверхности

В результате использования вышеизложенной схемы обработки изображений трехмерной модели поверхности была построена цифровая модель рельефа участка поверхности Фобоса (рис. 11).

7.4. Внешнее ориентирование модели

Внешнее ориентирование модели выполняется по опорным точкам на основании решения системы уравнений для каждой опорной точки с известными координатами X , Y , Z из предварительно составленной сети опорных точек:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + A \begin{pmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{pmatrix} t. \quad (11)$$

Неизвестными в данной задаче являются: масштабный коэффициент t , углы наклона системы координат левого снимка относительно геодезической системы координат (α , ω , κ) и координаты начала системы координат опорных точек X_0 , Y_0 , Z_0 .

Заключение

При работе с цифровой моделью поверхности Фобоса выявлены и решены вопросы формирования и обработки стереоизображений.

1. Определены основные расчетные соотношения для получения стереоизображений поверхности Фобоса.
2. На основании созданной 3-D-модели поверхности Фобоса сформированы модельные стереоизображения.
3. Выполнена фотограмметрическая обработка снимков модели поверхности Фобоса. По результатам обработки снимков за счет соотношения базиса 2,5 км и высоты съемки 25 км, а также значения среднеквадратической ошибки единицы веса можно сделать вывод о том, что точность построения цифровой модели в плоскости XU левого снимка 9 м, по высоте — 90 м.
4. При использовании конвергентной съемки района посадки за счет соотношения базиса и высоты 1:1 и разрешения узкоугольной камеры на уровне 0,5 м предполагается достичь точности построения цифровой модели рельефа 0,5 м по всем трем координатам.
5. Подтверждена пригодность трехмерной модели для отработки стереосъемки при выборе участка посадки.

Литература

1. Телевизионные исследования Фобоса [Текст] / Г.А. Аванесов, Б.С. Жуков, Я.Л. Зиман и др. М.: Наука, 1994.
2. Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Краснопевцева Е.Б., Железнов М.М. Анализ задач и условий телевизионных наблюдений Фобоса и Марса с космического аппарата «Фобос-Грунт»: Препринт. Пр-2128. М.: ИКИ РАН, 2006.
3. Антипов И.Т. Математические основы пространственной аналитической фототриангуляции. М.: Картогеоцентр-Геодиздат, 2003.