

УДК 528.92: 778.4: 629.78

Создание трехмерных моделей местности с использованием материалов съемки космического аппарата типа «Ресурс-П»

А. А. Пешкун

НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы»

e-mail: peshkun_aa@ntsomz.ru

Аннотация. В настоящее время российская группировка космических аппаратов дистанционного зондирования Земли располагает двумя аппаратами типа «Ресурс-П», которые позволяют выполнять стереосъемку земной поверхности на одном орбитальном витке.

Для построения моделей были использованы материалы съемки аппаратурой «Геотон» в панхроматическом диапазоне с разрешением 1 м. Модели были созданы с использованием цифровой фотограмметрической станции PHOTOMOD в автоматическом режиме с применением методов автоматической фильтрации ошибочных измерений.

В статье рассматриваются трехмерные модели местности, созданные по стереопарам с разными углами конвергенции на одну территорию, и сравниваются между собой по точности и полноте отображения объектов. Целью сравнения является определение оптимальных параметров стереосъемки земной поверхности.

Ключевые слова: «Ресурс-П», стереосъемка, стереопара, цифровая модель местности

Creating of 3D Surface Models Using “Resurs-P” Spacecraft Images

A. A. Peshkun

Research Center for Earth Operative Monitoring of Joint Stock Company “Russian Space Systems”

e-mail: peshkun_aa@ntsomz.ru

Abstract. At the present time the Russian Earth remote sensing spacecraft group includes two spacecraft of “Resurs-P” type that allow to perform stereo survey of the Earth surface on one orbit circuit. “Geoton” sensor images (panchromatic band with 1 meter resolution) were used to create the models. These models were created automatically by means of the digital photogrammetric station PHOTOMOD. The article contains the information about 3D surface models created from stereo pairs with different convergence angles for the same territory. It is noted that these models are compared with each other from the accuracy and completeness of objects’ reflection. The purpose of the comparison is to determine the optimal parameters for the Earth surface stereo survey.

Key words: “Resurs-P”, stereo survey, stereo pair, digital surface model

В настоящее время на орбите эксплуатируются два космических аппарата типа «Ресурс-П» (№ 1 выведен на орбиту 25 июня 2013 г., № 2 — 26 декабря 2014 г.). Аппараты предназначены для обновления карт, обеспечения хозяйственной деятельности различных федеральных, областных, муниципальных ведомств и других потребителей, а также получения информации в области контроля и охраны окружающей среды.

Целевая аппаратура:

- оптико-электронный комплекс «ГЕОТОН-Л1» с СППИ «САНГУР-1У» («Ресурс-П» № 1, «Ресурс-П» № 2);
- гиперспектральная аппаратура — ГСА («Ресурс-П» № 1, «Ресурс-П» № 2);

Таблица 1. Основные характеристики аппаратуры «ГЕОТОН-Л1»

| Наименование характеристики | Значение |
|---|-----------|
| Фокусное расстояние, мм | 4000 |
| Диаметр входного зрачка, мм | 500 |
| Относительное отверстие | 1 : 8 |
| Угол поля зрения, ° | 5°18' |
| Размер фоточувствительного элемента, мкм: панхроматический | 6 × 6 |
| спектральный | 18 × 18 |
| Проекция пикселя на поверхность Земли, м: в панхроматическом диапазоне | 1,0 |
| в узких спектральных диапазонах | 3,0–4,0 |
| Ширина полосы захвата, км | 38 |
| Спектральные диапазоны, мкм: панхроматический | 0,62–0,79 |
| синий | 0,48–0,53 |
| зеленый | 0,54–0,59 |
| красный | 0,62–0,68 |
| красный 2 | 0,66–0,69 |
| крайний красный | 0,70–0,75 |
| ближний инфракрасный 1 | 0,72–0,80 |
| ближний инфракрасный 2 | 0,81–0,88 |
| Количество одновременно используемых спектральных диапазонов | 1–5 |
| Разрядность линейного кодирования видеоинформации, бит/пиксель | 10 |

- комплекс широкозахватной мультиспектральной съемочной аппаратуры (ШМСА) высокого и среднего разрешения: ШМСА-ВР, ШМСА-СР («Ресурс-П» № 1, «Ресурс-П» № 2).

Научная аппаратура:

- комплекс исследования галактических лучей сверхвысоких энергий — «Нуклон» («Ресурс-П» № 2).

Также на борту космического аппарата «Ресурс-П» № 2 установлен бортовой радиокomплекс БРК АИС, предназначенный для приема радиосигналов с морских судов и их автоматической идентификации.

Таблица 2. Основные характеристики комплекса ШМСА

| Наименование характеристики | Значения характеристик | |
|---|------------------------|---------|
| | ШМСА-СР | ШМСА-ВР |
| Оптическая система: фокусное расстояние, мм | 40 | 200 |
| относительное отверстие | 1 : 4 | 1 : 3 |
| угол поля зрения, ° | 54°30' | 11°70' |
| Ширина полосы захвата, км | 441,7 | 97,2 |
| Проекция пикселя на поверхность Земли, м: в панхроматическом диапазоне | 59 | 12 |
| в узких спектральных диапазонах | 118 | 23,8 |
| Спектральные диапазоны, мкм: панхроматический | 0,43–0,7 | |
| синий | 0,43–0,51 | |
| зеленый | 0,51–0,58 | |
| красный | 0,60–0,70 | |
| ИК1 | 0,7–0,9 | |
| ИК2 | 0,8–0,9 | |
| Размер фоточувствительного элемента, мкм: панхроматический | 5 × 5 | |
| спектральный | 10 × 10 | |
| Разрядность линейного кодирования видеоинформации, бит/пиксель | 12 | |

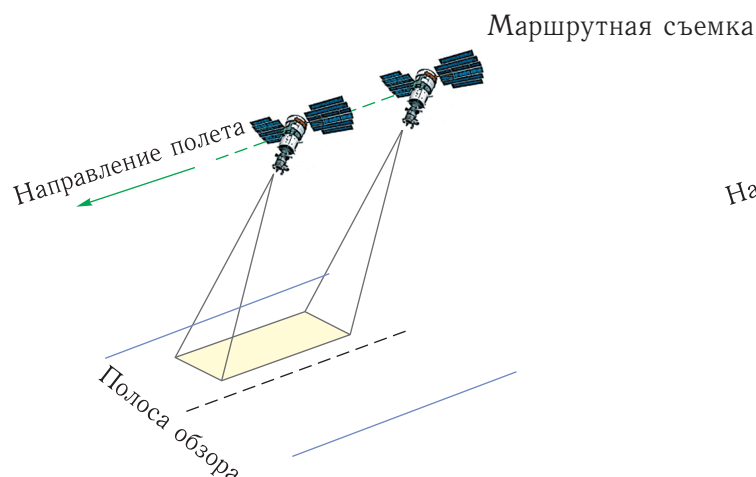


Рис. 1. Съемка с постоянным креном и тангажом

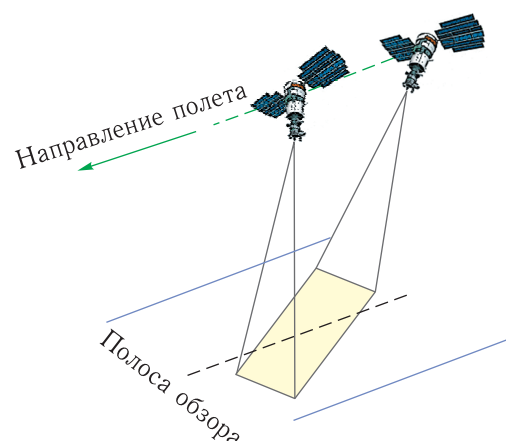


Рис. 2. Съемка с заданным азимутом

Таблица 3. Основные характеристики гиперспектральной аппаратуры

| Наименование характеристики | Значение |
|--|-------------|
| Полоса захвата, км | 30 |
| Проекция пикселя на поверхность Земли, м | 25–30 |
| Спектральные диапазоны, мкм | 0,4–1,1 |
| Количество каналов | не менее 96 |
| Спектральное разрешение, нм | 5–10 |

Таблица 4. Параметры орбиты

| Наименование характеристики | Значение |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| Тип | околокруговая солнечно-синхронная |
| Высота, км | 470–480 |
| Наклонение, ° | 97,28 |
| Периодичность наблюдения, сут | не более 3 |

Режимы съемки

Маршрутная съемка. Съемку в маршрутном режиме можно выполнять как с постоянным значением углов крена и тангажа (см. рис. 1), так и с заданным азимутом (рис. 2). Отклонение КА по крену и тангажу от надира возможно до $\pm 45^\circ$, по рысканию — до $\pm 60^\circ$. Длительность маршрутов — от 2 до 300 с.

Стереосъемка. Стереосъемка — это получение стереопары¹ изображений фотографическим способом. Стереосъемка выполняется на одном витке с отклонением аппарата по тангажу. Длина маршрутов — до 115 км.

Построение трехмерной модели местности

Материалы стереосъемки стали исходными данными для создания трехмерных моделей местности, которые рассматриваются в настоящей статье.

Ключевой характеристикой стереопары является отношение базиса фотографирования² к высоте фотографирования — B/H .

При значениях соотношения B/H , близких к 1, угол конвергенции³ составляет около 54° . Если стереосъемку выполнять с равными отклонениями по тангажу, то углы отклонения в таком случае составят около 27° . Плюсы таких параметров стереосъемки: большой угол конвергенции позволяет повысить точность измерений по стереопаре, большая площадь стереопары. Минусы: теневые зоны

¹Стереопара — совокупность двух изображений одного и того же объекта, полученных с двух различных точек съемки.

²Базис фотографирования — расстояние между двумя соседними точками фотографирования.

³Угол конвергенции стереопары — угол, который образуют пересекающиеся проектирующие лучи снимков стереопары в базисных плоскостях для одноименных точек.

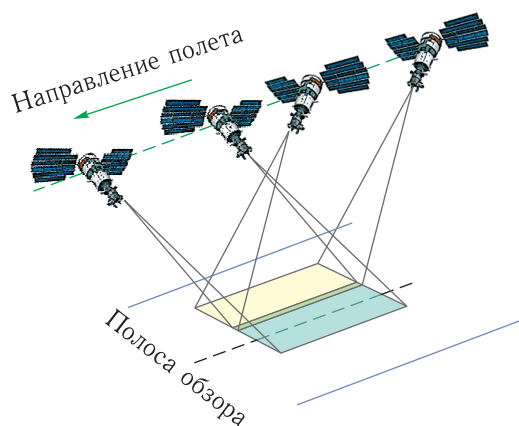


Рис. 3. Площадная съемка

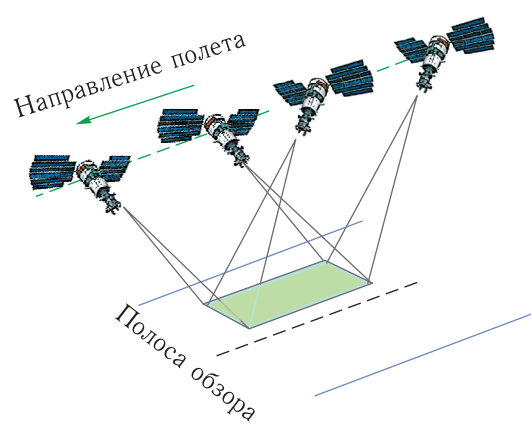


Рис. 4. Стереосъемка

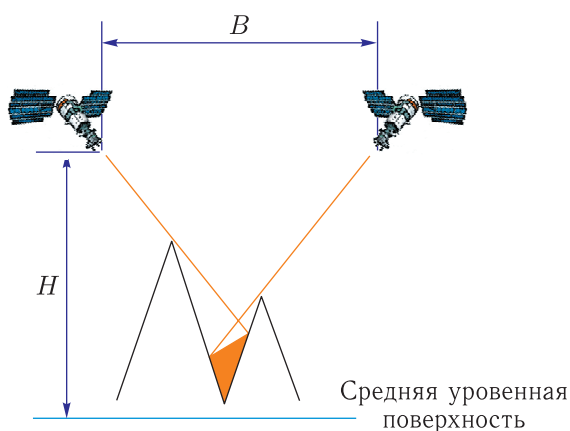


Рис. 5. Большее отношение B/H

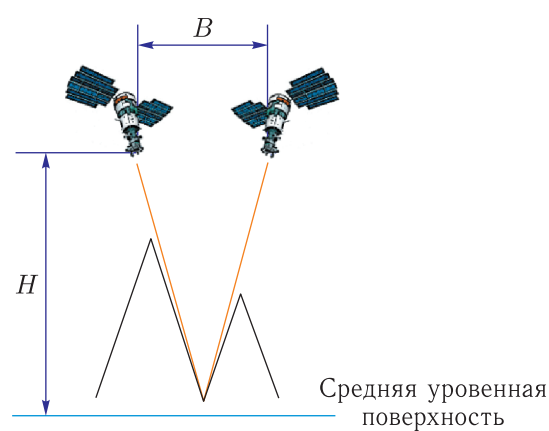


Рис. 6. Меньшее отношение B/H

на горные районы и районы с высокоэтажной застройкой; для построения ортофотоплана нужно выполнять дополнительную съемку с малыми углами отклонения от надира или использовать снимок стереопары с отклонением от надира более 20° .

В мировой практике при сканерной стереосъемке на одном витке (с отклонениями по тангажу) соотношение B/H подбирают в зависимости от перепада высот на снимаемой территории. Так, оптимальными соотношениями B/H являются значения около 0,5. Для горных районов это соотношение уменьшают, а для равнинных увеличивают. Таким образом, углы конвергенции варьируются в пределах от 30° до 45° . Для создания ортофотоплана стереосъемку можно выполнить с разными углами отклонения оптической оси от надира по тангажу (например, $+20^\circ$ и -10°), с тем чтобы для орто-трансформирования использовать снимок с меньшим углом отклонения от надира.

Для создания трехмерных моделей местности были выполнены стереосъемки космическим аппаратом «Ресурс-П» № 1 аппаратурой «ГЕОТОН-Л1» в панхроматическом диапазоне на тестовый участок с различными углами отклонений по тангажу.

По результатам съемки были сформированы четыре основных стереопары (по критерию съемки на одном витке — A, B, C, D) и четыре дополнительные (подобраны по углу конвергенции). В результате получилось 8 стереопар на одну территорию, но с разными углами конвергенции и соотношениями B/H . Для фотограмметрической обработки были использованы материалы уровня обработки 1А.

Как видно из рис. 7 и табл. 5, по своим параметрам есть схожие стереопары: A и B, C и D, G и H . Образующие их снимки имеют схожие по величине углы отклонения от надира по тангажу.

Фотограмметрическая обработка выполнена с использованием PHOTOMOD. В процессе обра-

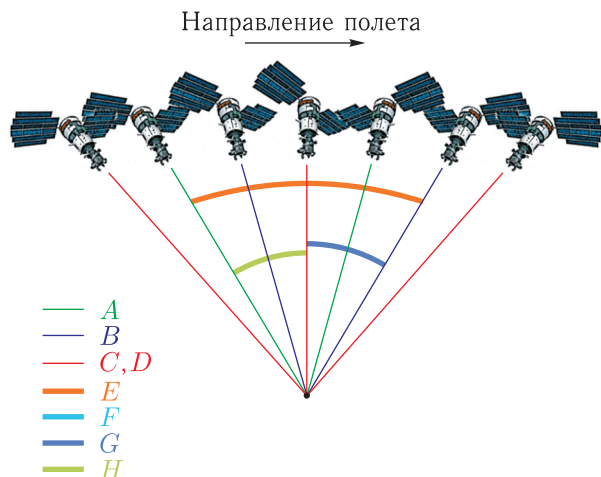


Рис. 7. Сформированные стереопары

Таблица 5. Параметры сформированных стереопар

| Стереопара | Угол отклонения от надира, ° | | Угол конвергенции, ° |
|---------------------------|------------------------------|------------|----------------------|
| | Снимок № 1 | Снимок № 2 | |
| A | 32,5 | 12,0 | 44,2 |
| B | 12,9 | 36,5 | 46,3 |
| Триплет | | | |
| C | 47,2 | 2,5 | 46,6 |
| D | 2,5 | 44,1 | 44,4 |
| Дополнительные стереопары | | | |
| E | 32,5 | 36,5 | 68,4 |
| F | 12,9 | 12,0 | 22,7 |
| G | 2,5 | 36,5 | 37,3 |
| H | 32,5 | 2,5 | 32,5 |

ботки был сформирован блок из 7 снимков. Для выполнения блочного уравнивания и уточнения внешнего ориентирования снимков использованы 7 опорных и 76 контрольных точек (см. рис. 8).

После уравнивания выполнено построение 5 цифровых моделей местности (далее — ЦММ). Четыре ЦММ построены по стереопарам с наименьшими ошибками по высоте при уравнивании (выделены зеленым в табл. 6). Одна дополнительная ЦММ (см. рис. 9) построена с применением нового алгоритма фотограмметрической станции РНОТОМОД построения плотных ЦММ (с использованием многократных перекрытий) с использованием всех семи снимков.

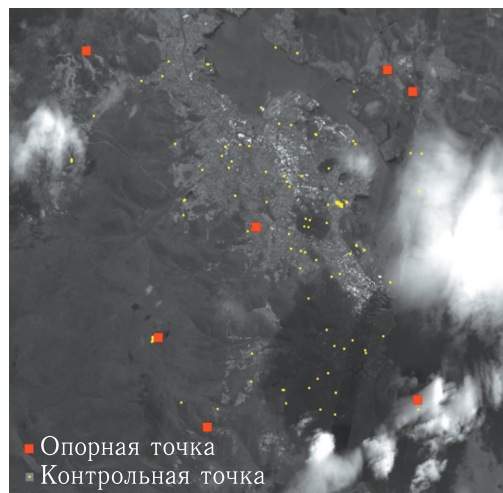


Рис. 8. Схема расположения опорных и контрольных точек

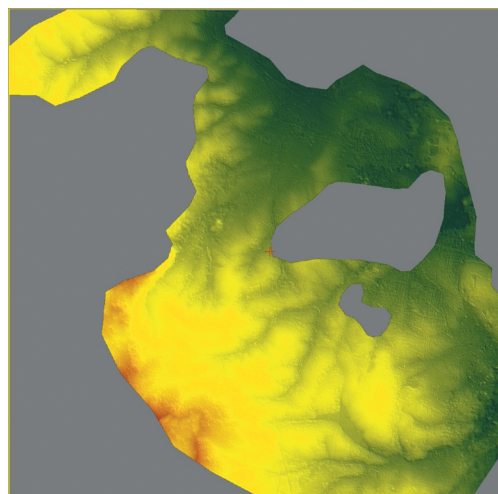


Рис. 9. Фрагмент цифровой модели местности № 5

Заключение

Как видно из табл. 6 и 7, для построения ЦММ использовались стереопары с углами конвергенции около 45° (отношение B/H составляет около 0,8) и около 33° (отношение B/H составляет около 0,5). При этом их точностные характеристики сопоставимы. В данной ситуации наиболее предпочтительной является стереопара H, так как она состоит из снимков, один из которых практически не отклонен от надира ($2,5^\circ$) — это позволит построить ортофотоплан с минимумом искажений.

Также стоит обратить внимание на стереопары B и G. Эти стереопары имеют схожие по параметрам съемки, соответственно, стереопары A и H.

Таблица 6. Результаты уравнивания блока из 8 стереопар

| № стереопары | Угол конвергенции, ° | Количество опорных точек, шт. | Количество контрольных точек, шт. | Максимальная ошибка на опорных точках в плане, м | Максимальная ошибка на опорных точках по высоте, м | СКО на опорных точках в плане, м | СКО на опорных точках по высоте, м | Максимальная ошибка на контрольных точках в плане, м | Максимальная ошибка на контрольных точках по высоте, м | СКО на контрольных точках в плане, м | СКО на контрольных точках по высоте, м |
|--------------|----------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|--|----------------------------------|------------------------------------|--|--|--------------------------------------|--|
| <i>A</i> | 44,2 | 4 | 53 | 0,71 | 1,33 | 0,48 | 0,83 | 4,39 | 6,33 | 1,88 | 2,64 |
| <i>B</i> | 46,3 | 5 | 65 | 3,10 | 9,06 | 2,38 | 7,20 | 3,64 | 10,73 | 2,24 | 6,69 |
| <i>C</i> | 46,6 | 4 | 43 | 1,15 | 2,65 | 0,70 | 1,50 | 3,35 | 5,64 | 1,92 | 3,05 |
| <i>D</i> | 44,4 | 4 | 43 | 1,13 | 2,84 | 0,70 | 1,68 | 3,32 | 6,17 | 2,00 | 3,61 |
| <i>F</i> | 22,7 | 3 | 55 | 0,84 | 0,87 | 0,55 | 0,64 | 3,60 | 10,38 | 1,58 | 4,68 |
| <i>E</i> | 68,4 | 5 | 58 | 4,02 | 5,74 | 3,20 | 4,46 | 4,93 | 7,94 | 3,23 | 4,49 |
| <i>G</i> | 37,3 | 5 | 58 | 1,34 | 11,17 | 1,03 | 7,69 | 3,16 | 13,94 | 1,79 | 9,37 |
| <i>H</i> | 32,6 | 4 | 52 | 1,16 | 2,09 | 0,72 | 1,20 | 3,40 | 5,96 | 1,78 | 3,26 |

Таблица 7. Оценка точности созданных цифровых моделей местности

| Стереопара, № | Количество контрольных точек, шт. | Максимальная ошибка, м | СКО, м |
|---------------|-----------------------------------|------------------------|--------|
| <i>A</i> | 40 | 5,26 | 2,00 |
| <i>C</i> | 23 | 6,24 | 2,76 |
| <i>D</i> | 29 | 8,95 | 3,54 |
| <i>H</i> | 23 | 5,66 | 3,65 |
| № 5 | 49 | 12,17 | 6,13 |

Однако точность ориентирования стереопар *B* и *G* практически в два раза хуже, чем у стереопар *A* и *H*. Также стереопары *F* и *E* имеют максимальные ошибки по высоте на контрольных точках более семи метров. Стереопары *B*, *F*, *E* и *G* объединяет наличие в них как минимум одного снимка из стереопары *B*. В стереопарах *A*, *C*, *D* и *H* снимков из стереопары *B* нет. Причиной такого результата может служить геометрия снимков стереопары *B*.

Основными причинами плохой геометрии снимков стереопары *B* могут служить следующие факторы: эволюции КА в процессе съемки, углы отклонения от надира, перепад высот на местности, облачность. Углы отклонения снимков от надира у стереопары *B* сопоставимы с углами отклонения снимков от надира стереопары *A*, однако результаты

ориентирования стереопары *A* существенно лучше. Это говорит о том, что углы отклонения космического аппарата от надира при съемке на геометрию снимка не оказывали большого влияния, как и перепад высот на местности (территория снималась одна и та же). Третий снимок триплета (второй снимок стереопары *D*) снят в условиях, схожих с условиями съемки второго снимка стереопары *B*, даже с большим углом отклонения по тангажу. Однако точность ориентирования стереопары *D* по некоторым параметрам более чем в два раза лучше, чем точность ориентирования стереопары *B*. Это подтверждает предположение о низком влиянии на геометрию углов отклонения космического аппарата при съемке и перепада высот снимаемой местности.

Стереосъемка выполнялась в разные дни при разных метеоусловиях. Облачность присутствует на всех семи снимках. В данном случае различный характер облачности в дни съемок и мог стать важным фактором, повлиявшим на геометрию снимков стереопары *B*. Для подтверждения или опровержения данного предположения необходимо проведение ряда дополнительных исследований и проверок, так как в данной ситуации могут присутствовать дополнительные факторы, влияющие на геометрию снимков.