# Коррекция влияния рельефа на изображениях, полученных съемочной системой КМСС на КА «Метеор-М» № 1

# С.Б. Жуков

# Институт космических исследований РАН, Москва, Россия E-mail: sbzhukov@mail.ru

Разработан итеративный алгоритм орторектификации изображений, получаемых комплексом многозональной спутниковой съемки (КМСС) на КА «Метеор-М», позволяющий осуществлять их геометрическую коррекцию и географическую привязку с учетом рельефа. Алгоритм реализован в виде приложения KMSS\_Coreg\_ortho, включенного в состав программного комплекса потоковой обработки данных КМСС. Приводятся примеры орторектификации модельных и реальных изображений КМСС.

Ключевые слова: КА «Метеор-М», комплекс многозональной спутниковой съемки (КМСС), обработка спутниковых изображений, геометрическая коррекция, географическая привязка, орторектификация.

#### Введение

На борту космического аппарата (КА) «Метеор-М» № 1 установлен комплекс многозональной спутниковой съемки (КМСС), который уже более трех лет выполняет обзорные съемки земной поверхности со средним пространственным разрешением в видимом и ближнем ИК-диапазонах для экоприродного мониторинга в научных, природоохранных и хозяйственных целях (Аванесов и др., 2013). Аналогичный съемочный комплекс будет установлен на борту следующего КА – «Метеор-М» № 2.

В данной работе описывается процедура орторектификации видеоданных КМСС, т.е. их геометрической коррекции и географической привязки с учетом рельефа. Реализующее ее приложение включено в состав программного комплекса потоковой обработки данных КМСС в Научном центре оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) ОАО «Российские космические системы».

# 1. Основные характеристики комплекса многозональной спутниковой съемки

В состав КМСС входят три многозональных съемочных устройства (МСУ), выполненные в виде отдельных конструктивных блоков:

- два МСУ-100, предназначенные для съемки поверхности суши;
- одно МСУ-50, предназначенное для съемки акваторий.

Основные характеристики камер КМСС приведены в таблице.

На *рис. 1* приведена геометрическая схема съемки КМСС. Два прибора МСУ-100 устанавливаются на приборную платформу КА таким образом, что их оптические оси отклоняются от «вертикальной» оси КА на угол  $\pm 14^{\circ}$  в плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты. В результате обеспечивается формирование суммарной полосы обзора МСУ-100, примерно равной полосе обзора МСУ-50 (960 и 940 км, соответственно).



Рис. 1. Геометрия съемки комплексом многозональной спутниковой съемки

Параметр	Камера	
	МСУ-100	МСУ-50
Фотоприемники	3 линейных ПЗС	3 линейных ПЗС
Число элементов в строке	3 × 7926	$3 \times 7926$
Захват, км ( <i>H</i> = 830 км)	960 (двумя камерами)	940
Проекция элемента на поверхность, м (H = 830 км)	60	120
Спектральные зоны, нм	535575 630680 700900	370450 450510 580690
Частота строк, Гц	156,25	156,25
Информационный поток одной камеры, Мбит/с	~ 30	~ 30
Разрядность АЦП / изображения, бит	16 / 8	16 / 8
Динамический диапазон ПЗС	5000	5000
Масса, кг	2,9	2,3
Максимальное энергопотребление, Вт	6,8	6,8
Число камер	2	1

Таблица. Основные характеристики камер КМСС

Поскольку расстояние между центрами чувствительных элементов линейных ПЗС разных спектральных каналов в фокальной плоскости МСУ-50 и МСУ-100 составляет 15,24 мм, одни и те же объекты на земной поверхности наблюдаются в разных спектральных каналах под разными углами в орбитальной плоскости: – 16,95; 0 и + 16,95° для МСУ-50 и – 8,67; 0 и + 8,67° для МСУ-100.

Предварительная обработка данных КМСС включает (Жуков и др., 2008):

1) разбиение видеоданных на кадры размером 7926 × 11000 пикселов для МСУ-100 и 7926 × 22000 пикселов для МСУ-50 и радиометрическую коррекцию входящих в них зональных изображений;

2) временную и географическую привязку пикселов зональных изображений с шагом 100 пикселов на референц-эллипсоиде WGS-84 с использованием информации о положении и ориентации КА из навигационного файла; в результате формируются файлы

географической привязки зональных изображений, содержащие для каждого сотого пиксела в каждой сотой строке время наблюдения, широту и долготу точки пересечения направления наблюдения с референц-эллипсоидом, локальные зенитные и азимутальные углы направления на КА и на Солнце и расстояние до КА;

3) проецирование зональных изображений в заданную картографическую проекцию; при этом обеспечивается их геометрическое совмещение.

Вследствие того что значения зенитного угла наблюдения для камер КМСС могут достигать ~ 30°, пренебрежение высотой поверхности над референц-эллипсоидом может привести к значительным ошибкам географической привязки изображений, особенно в горных районах: например, при указанных углах наблюдения и высоте поверхности над референц-эллипсоидам 1 км ошибка географической привязки может составлять около ~ 600 м, т.е. примерно 10 пикселов МСУ-100. Кроме того, поскольку разные каналы камер КМСС проводят съемку под разными углами, могут возникать значительные ошибки межканального совмещения изображений.

#### 2. Алгоритм

Для орторектификации используется предоставленная НЦ ОМЗ глобальная цифровая модель рельефа (ЦМР), построенная на основе модели SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) с разрешением 90 м.

Предварительно для обрабатываемого кадра создается сетка орторектифицированного изображения. В отличие от сеток географической привязки исходных зональных изображений, которые формируются в системе их координат, сетка орторектифицированного изображения формируется в заданной картографической проекции (для широт ниже 80° используется UTM, а для более высоких широт – полярные стереографические проекции). Размеры этой сетки определяются максимальными интервалами географических координат зональных изображений в кадре и требуемым разрешением орторектифицированного изображения, обычно соответствующим размеру пиксела.

Обработка зональных изображений КМСС проводится последовательно по квадратам со стороной размером 100 пикселов, соответствующим шагу сетки географической привязки исходных изображений.

Для каждого пиксела указанного квадрата ищется его ортопроекция на референц-эллипсоид WGS-84, т.е. основание перпендикуляра (точка *C* на *puc. 2*), опущенного на эллипсоид из точки пересечения ЦМР с направлением наблюдения на КА, задаваемым единичным вектором  $\mathbf{e}_{sc}$ . Вектор  $\mathbf{e}_{sc}$  для данного пиксела определяется путем билинейной интерполяции по сетке географической привязки исходного изображения.

Для нахождения ортопроекции применяется итеративная процедура, в которой определяется последовательность точек  $C_i$  (i = 0, 1, 2...), сходящаяся к точке C.

В качестве начального приближения C<sub>0</sub> принимается точка пересечения направления наблюдения с эллипсоидом WGS-84, широта и долгота которой определяются путем билинейной интерполяции по сетке географической привязки исходного изображения.



Рис. 2. Итерации процедуры орторектификации

Нахождение следующего приближения  $C_i$  (i = 1, 2...) включает операции, перечисленные ниже.

1. По географической широте и долготе точки  $C_{i-1}$  определяются ее радиус-вектор **r**<sub>i-1</sub> в геоцентрической системе координат *XYZ* и единичный вектор нормали **n**<sub>i-1</sub> к поверхности эллипсоида.

2. По ЦМР определяется высота *h* в точке  $C_{i-1}$  с помощью билинейной интерполяции по широте и долготе между ближайшими узлами модели. В результате получаем точку  $D_{i-1}$  на поверхности ЦМР, положение которой задается вектором  $\mathbf{r}_D = = \mathbf{r}_{i-1} + h\mathbf{n}_{i-1}$ .

3. Строится плоскость, перпендикулярная нормали в точке  $D_{i-1}$ , и ищется точка ее пересечения  $E_{i-1}$  с направлением наблюдения на КА. Совместно решив уравнение указанной плоскости  $(\mathbf{r} - \mathbf{r}_D)\mathbf{n}_{i-1} = 0$  и уравнение прямой  $\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + L\mathbf{e}_{SC}$ , где L – расстояние от точки  $C_0$  до точки  $E_{i-1}$ , получим:

$$L = \frac{(\mathbf{r}_{i-1} - \mathbf{r}_0)\mathbf{n}_{i-1} + h}{(\mathbf{n}_{i-1}\mathbf{e}_{SC})}.$$

Отсюда радиус-вектор точки  $E_{i-1}$  равен  $\mathbf{r}_E = \mathbf{r}_0 + \frac{(\mathbf{r}_{i-1} - \mathbf{r}_0)\mathbf{n}_{i-1} + h}{(\mathbf{n}_{i-1}\mathbf{e})}\mathbf{e}_{SC}$ .

4. Опускается перпендикуляр из  $E_{i-1}$  на поверхность эллипсоида. Для простоты считается, что направление нормали к эллипсоиду в точке  $E_{i-1}$  совпадает с направлением нормали  $\mathbf{n}_{i-1}$  в точке  $D_{i-1}$  (при расстоянии между точками  $D_{i-1}$  и  $E_{i-1}$ , например, 1 км отличие направления нормали к эллипсоиду в этих точках составляет около 30 угл. с). Мало отличается также высота этих точек над эллипсоидом. Поэтому основание перпендикуляра из точки  $E_{i-1}$  на поверхность эллипсоида находится вблизи точки  $M_{i-1}$ , имеющей радиус-вектор:  $\mathbf{r}_M = \mathbf{r}_E - h\mathbf{n}_{i-1} = \mathbf{r}_0 + \frac{(\mathbf{r}_{i-1} - \mathbf{r}_0)\mathbf{n}_{i-1} + h}{(\mathbf{n}_{i-1}\mathbf{e}_{SC})}\mathbf{e}_{SC} - h\mathbf{n}_{i-1}$ .

5. В точке  $M_{i-1}$  определяются географические широта и долгота. Они соответствуют точке  $C_i$  с радиус-вектором  $\mathbf{r}_i$ , являющейся точкой пересечения отрезка ОМ с референцэллипсоидом. Точка  $C_i$  считается следующим приближением ортопроекции рассматриваемого пиксела.

Далее операции по п. 1–5 повторяются с точкой  $C_i$  до тех пор, пока уточнение положения точки *C* в результате последней итерации  $\Delta = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{i-1}|$  не будет меньше 10 м. Тестирование на реальных изображениях горных районов показало, что в 97% случаев для достижения указанной точности хватает четырех итераций.

По географической широте и долготе точки *C* рассчитываются ее координаты в заданной картографической проекции, и значение яркости пиксела помещается в соответствующую ячейку сетки орторектифицированного изображения. При попадании нескольких пикселов в одну ячейку проводится усреднение их яркостей. Если какая-либо ячейка остается пустой, значение яркости в ней определяется путем усреднения значений яркости, полученных в соседних ячейках.

#### 3. Примеры применения алгоритма

Данный алгоритм и реализующее его программное обеспечение отрабатывалось как на модельных, так и на реальных изображениях.

В качестве модельного использовалось изображение «географическая сетка», при формировании которого считалось, что прибор снимает однородную светлую поверхность, кодируемую значением сигнала 255, с наложенными на нее черными координатными линиями с сигналом, равным 0. Направление линий совпадает с направлениями координатной сетки выбранной зоны UTM, а расстояние между линиями составляет 1 км. Пиксел получает сигнал линии, если она находилась на расстоянии не более половины пиксела от его центра. В соответствии с геометрической моделью прибора, реальным навигационным файлом и ЦМР формировалось модельное трехканальное изображение, которое затем подвергалось орторектификации.

В картографической проекции такого изображения без использования орторектификации координатные линии, регистрируемые в разных каналах, расходятся и искажаются в соответствии с рельефом поверхности (*puc. 3*). При этом линии получают дополнительный цвет к тому цвету, которым кодировалось изображение данного канала при цветосинтезе.



Рис. 3. Картографическая проекция модельного изображения «географическая сетка»: слева – без орторектификации, справа – с орторектификацией

Орторектификация позволяет восстановить правильное изображение с черными вертикальными и горизонтальными координатными линиями. Отдельные цветные точки на черных линиях объясняются дискретностью исходного изображения: они появляются в тех местах, где координатная линия «перескакивала» на другую строчку или столбец исходного изображения. На *рис. 4* приведены результаты орторектификации реальных изображений, полученных камерой МСУ-100 в горных районах на южном берегу Турции.



Рис. 4. Картографическая проекция изображения горного района в южной Турции, полученного камерой MCV-101: слева – без орторектификации, справа – с орторектификацией

Без орторектификации очевидны значительные ошибки совмещения каналов, которые особенно хорошо видны на светлом фоне ледников и темном фоне ущелий. После применения процедуры орторектификации эти ошибки значительно уменьшились. Остаточные ошибки совмещения связаны с погрешностями навигационной привязки изображений и ошибками ЦМР. В месте, где ЦМР отсутствует, на изображении оставлено черное пятно.

### Заключение

Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение орторектификации позволяет корректировать ошибки географической привязки и межканального совмещения изображений, получаемые комплексом многозональной спутниковой съемки на КА «Метеор-М» № 1 и 2.

# Литература

- 1. Аванесов Г.А., Полянский И.В., Жуков Б.С., Никитин А.В., Форш А.А. и др. Комплекс многозональной спутниковой съемки на борту КА «Метеор-М» № 1: три года на орбите // Исследование Земли из космоса. 2013. № 2. С. 74–83.
- Жуков Б.С., Василейский А.С., Жуков С.Б., Зиман Я.Л., Полянский И.В., Бекренёв О.В., Пермитина Л.И. Предварительная обработка видеоданных КМСС с КА «Метеор-М» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 260–266.

# Orthorectification procedure for images obtained by Multispectral Satellite Imaging System on-board Meteor-M satellite

# S.B. Zhukov

# Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia E-mail: sbzhukov@mail.ru

An iterative algorithm was developed for orthorectification of the images obtained by the Multispectral Satellite Imaging System (KMSS) on-board Meteor-M satellite. It allows geometric correction and georeferencing of the images with accounting for the surface relief. The algorithm was implemented as *KMSS\_coreg\_ortho* application that is included in the software package for pipeline processing of KMSS data. Examples are given of orthorectification of simulated and real KMSS images.

**Keywords**: Meteor-M satellite, Multispectral Satellite Imaging System (KMSS), satellite image processing, geometric correction, georeferencing, orthorectification.