## Точность координатной привязки видеоданных камер МСУ-100/50 КА «Метеор-М» № 1

#### Т. В. Кондратьева, А. В. Никитин, И. В. Полянский

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

В работе рассматривается точность автоматической координатной географической привязки видеоданных комплекса многозональной спутниковой съемки (КМСС), функционирующего на борту КА «Метеор-М» № 1. Приведены результаты трансформирования полученных сканерных изображений в заданную картографическую проекцию, координатной привязки изображений, сведения спектральных каналов и построения спектрозональных изображений с использованием данных комплекса координатно-временного обеспечения (ККВО), в состав которого входят прибор звездной ориентации БОКЗ-М и система спутниковой навигации АСН-М-М.

Ключевые слова: приборы ДЗЗ (дистанционного зондирования Земли), МСУ (многозональное сканирующее устройство), комплекс многозональной спутниковой съемки (КМСС), БОКЗ-М (блок определения координат звезд), АСН-М-М (автономная система навигации), геометрическая калибровка, спектрозональное изображение, географическая координатная привязка.

Среди задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), в процессе которого съемочными устройствами получают изображения земной поверхности, одной из главных является выдерживание заданной пространственной ориентации аппаратуры ДЗЗ, установленной на космический аппарат (КА), и географическая координатная привязка видеоданных, получаемых этой аппаратурой.

Географическая координатная привязка данных комплекса многозональной спутниковой съемки (КМСС) (Аванесов и др., 2013), состоящего из трех оптико-электронных многозональных съемочных устройств (МСУ) и функционирующего на КА «Метеор-М» № 1, обеспечивается данными с навигационных приборов комплекса координатно-временного обеспечения (ККВО) КА – прибора звездной ориентации (БОКЗ-М) и системы спутниковой навигации (АСН-М-М), которые также входят в состав бортовой аппаратуры КА «Метеор-М» № 1.

Специально разработанное программное обеспечение (ПО) предназначено для трансформирования полученных сканерных изображений в заданную картографическую проекцию, географической координатной привязки изображений, сведения спектральных каналов и построения спектрозональных изображений. Анализ результатов обработки данных, полученных с КА «Метеор-М» № 1, показывает, что данное ПО обеспечивает точность сведения спектральных каналов до элемента разрешения, географическую привязку видеоданных до 0,35…0,8 км. Данные результаты могут быть вызваны следующими причинами: рассинхронизацией времени данных комплекса ККВО со временем получения строк видеоданных, температурными деформациями конструкции прибора звездной ориентации и съемочной системы КМСС.

#### Комплекс многозональной спутниковой съемки

Комплекс многозональной спутниковой съемки (КМСС), разработанный и изготовленный в оптико-физическом отделе ИКИ РАН совместно с АНО «Космос-НТ», 160 успешно функционирует на борту космического аппарата дистанционного зондирования «Метеор-М» № 1, запуск которого состоялся 17 сентября 2009 г.

Комплекс КМСС предназначен для решения метеорологических и природно-ресурсных задач.

В состав КМСС входят три оптико-электронных многозональных съемочных устройства (МСУ), два из которых, МСУ-100, предназначены для съемки поверхности суши, одно, МСУ-50, – для съемки водных объектов.

Оптическое изображение в камерах МСУ формируется с помощью оснащенного блендой объектива в плоскости фотоприемников, в качестве которых используются три линейных ПЗС (ЛПЗС).

Перед каждым ЛПЗС установлены интерференционные фильтры, обеспечивающие суммарное формирование требуемых шести спектральных зон видимого и ближнего ИК-диапазонов спектра электромагнитных волн, которые были выбраны исходя из целевой задачи исследований суши для МСУ-100 и акваторий для МСУ-50.

Внешний вид МСУ-50 и МСУ-100 показан на *рис. 1*, основные характеристики КМСС и камер МСУ приведены в *табл. 1, 2*.



Рис. 1. Внешний вид аппаратуры КМСС

Параметр	МСУ-100	МСУ-50
Высота орбиты, км	832	832
Скорость полета КА, приведенная к поверхности Земли, км/с	6,8	6,8
Точность ориентации КА, Зу, град	0,1	0,1
Точность стабилизации КА, Зу, угл. с/с	1,8	1,8
Количество приборов	2	1
Формируемая полоса обзора, км	960	940
Угол установки относительно местной вертикали, град	±14	0
Размер проекции элемента разрешения на земную поверхность (в направлении оптической оси прибора), м	60	120
Информационный поток на один прибор, Мбит/с	30	30

## Таблица 1. Основные характеристики КМСС

Параметр	МСУ-100	МСУ-50
Фокусное расстояние объектива, мм	100	50
Относительное отверстие объектива	1:6	1:6
Угол поля зрения, град	31	58
Размер элемента ПЗС, мкм	7×7	7×7
Проекция пиксела, м	58	116
Число спектральных каналов	3	3
Спектральные зоны, мкм (на уровне 0,5)	0,5350,575; 0,6300,680; 0,7600,900	0,3700,450; 0,4500,510; 0,5800,690
Длина строки изображения, элементов	7926	7926
Число разрядов квантования	8	8
Внешняя тактовая частота, МГц	30,72	30,72
Внешняя синхрочастота строк, Гц	156,25	156,25
Командный интерфейс	MIL STD-1553B	
Максимальное энергопотребление, Вт	6,8	6,8
Масса, кг	2,9	2,3

## Таблица 2. Основные характеристики камер МСУ

Основным достоинством камер МСУ является высокое разрешение (размер пиксела ЛПЗС 7 мкм) и достаточно широкий угол поля зрения: ~30° для камеры МСУ-100 (фокусное расстояние объектива 100 мм) и ~60° для камеры МСУ-50 (фокусное расстояние объектива 50 мм).

#### Геометрия съемки

Принцип действия МСУ основан на одновременной построчной регистрации с помощью ЛПЗС оптического изображения, перемещающегося по фокальной плоскости при движении КА по орбите. На *рис. 2* приведена геометрическая схема съемки КМСС, поясняющая принцип формирования полосы изображения.

Два прибора МСУ-100 установлены на приборную платформу КА таким образом, что их оптические оси отклонены от «вертикальной» оси КА на угол  $\pm 14^{\circ}$  в плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты. При этом суммарная полоса обзора МСУ-100 составляет 960 км и примерно равна полосе обзора прибора МСУ-50 (940 км). Перекрытие полос обзора двух приборов МСУ-100 составляет примерно 40 км.

С другой стороны, поскольку расстояние между центрами чувствительных элементов ЛПЗС разных спектральных каналов в приборах МСУ-50 и МСУ-100 составляет 15,24 мм, соответствующие друг другу элементы разрешения 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 и с временной задержкой между ближайшими каналами 38,9 и 19,4, соответственно.



Рис. 2. Геометрическая схема съемки КМСС

Пространственное разрешение по поверхности Земли составляет для МСУ-100 58 м, для МСУ-50 – 116 м.

Информация с каждого прибора МСУ-50/100 в потоке видеоданных КМСС, передаваемых на Землю, разбита на приборные строки. Одна приборная строка содержит одновременно полученные строки изображений в каждом из трех спектральных каналов, а также соответствующую им калибровочную и служебную информацию.

Прием и обработка видеоданных осуществляется в Научном центре оперативного мониторинга Земли (НЦОМЗ) (http://www.ntsomz.ru), ОАО «Российские космические системы» и ГУ НИЦ «Планета» (http://planet.iitp.ru). Для последующих КА серии «Метеор-М» разработаны устройства МСУ-100М и МСУ-50М.

#### Состав и назначение комплекса координатно-временного обеспечения

Комплекс координатно-временного обеспечения (ККВО), разработанный для КА «Метеор-М» № 1 и входящий в состав экспериментальной аппаратуры КА, предназначены для навигационного обеспечения оперативной координатной привязки видеоданных, получаемых аппаратурой дистанционного зондирования, в первую очередь, комплексом многозональной спутниковой съемки (КМСС).

В состав ККВО входят измерительные приборы трех видов:

- прибор астроориентации (блок определения координат звезд БОКЗ-М);
- аппаратура спутниковой навигации (АСН-М-М);
- датчики угловых скоростей (ДУС)<sup>1</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Датчики угловых скоростей формально не входят в состав экспериментального комплекса ККВО, а являются штатными измерительными приборами системы ориентации КА, однако информация с них используется ККВО.

Принимая радиосигналы спутниковых навигационных систем (CHC) GPS и ГЛО-НАСС, АСН-М-М обеспечивает определение параметров орбитального движения КА с привязкой измерений к шкале всемирного координированного времени UTC, а также синхронизацию бортовой аппаратуры КА.

Звездный координатор БОКЗ-М осуществляет измерение параметров инерциальной ориентации КА и установленной на нем аппаратуры.

Измерения угловых скоростей вращения КА, обеспечиваемые тремя ДУС, дополняют получаемые БОКЗ-М данные об ориентации.

Общая схема функционирования ККВО для обеспечения географической координатной привязки видеоданных КМСС приведена на *рис. 3*.



Рис. 3. Схема функционирования ККВО для обеспечения географической координатной привязки видеоданных КМСС (АФУ – антенно-фидерное устройство)

На борту КА «Метеор-М» № 1 приборы, входящие в состав ККВО, работают под управлением компьютера экспериментальной системы ориентации (КЭСО). Информационный обмен АСН-М-М, БОКЗ-М и датчиков ДУС с КЭСО осуществляется по мультиплексному каналу обмена (МКО).

Видеоинформация с МСУ передается в бортовую информационную систему (БИС-М, *рис. 3*), куда одновременно поступают навигационные данные с комплекса приборов ККВО (комплекс координатно-временного обеспечения).

#### Аппаратура спутниковой навигации АСН-М-М

Аппаратура спутниковой навигации АСН-М-М (*puc. 4*) осуществляет прием и обработку радиосигналов спутниковых навигационных систем (CHC) GPS и ГЛОНАСС:

 с целью определения с привязкой к всемирному координированному времени положения центра масс КА и его вектора скорости в геоцентрической гринвичской системе координат с точностью 15 м;

- вычисления на основе серии проведенных навигационных измерений оценки текущего вектора состояния (параметров движения центра масс – ПДЦМ), прогнозирования вектора состояния на заданный момент времени;
- формирования импульсного сигнала секундной метки, а также кода времени текущей (последней сгенерированной) секундной метки, «привязанного» к всемирному координированному времени с точностью 10 мкс.



Рис. 4. Система спутниковой навигации ACH-M-M: устройство антенное (УА), устройство усилительное (УУ) и блок навигационных модулей (БНМ)

Частота обновления информации (навигационных измерений) – 1 Гц. На борту КА «Метеор-М» № 1 АСН-М-М используется для формирования секундных меток для синхронизации измерений прибора звездной ориентации БОКЗ-М.

Выдаваемые АСН-М-М навигационные измерения могут быть представлены в одной из двух базовых геоцентрических гринвичских систем координат – ГСК (ПЗ-90 или WGS-84) и иметь временную привязку к одной из трех временных шкал (UTC, ГЛОНАСС или GPS). Выбор используемой конфигурации СНС, системы координат и шкалы времени осуществляется специальным кодовым сообщением КЭСО по МКО.

При работе системы АСН-М-М в составе ККВО на КА «Метеор-М» № 1 используются шкала времени UTC и система координат WGS-84.

## Прибор астроориентации БОКЗ

Прибор БОКЗ-М (*рис. 5*) предназначен для определения углового положения осей приборной системы координат относительно второй экваториальной системы координат и обладает следующими характеристиками: интервал между измерениями составляет 3 с, матрица  $512 \times 512$  элементов, звездный каталог 8500 звезд до  $7,5^m_{\nu}$ , угол поля зрения 8°, точность по углам вращения вокруг осей *X*, *Y* 1,5 угл. с и вокруг оси *Z* 15 угл. с.

Данные ККВО имеют общую привязку по времени, определяемую прибором АСН. В зависимости от режима его работы



Рис. 5. Прибор звездной ориентации БОКЗ-М

шкала времени привязки может совпадать с всемирным временем (UTC) или с временной привязкой спутниковой системы GPS. Временная привязка данных ККВО непосредственно используется для формирования элементов внешнего ориентирования каждой строки сканерного изображения МСУ, которые учитываются при трансформировании и построении спектрозонального изображения.

# Программный комплекс предварительной обработки видеоданных комплекса многозональной спутниковой съемки

Программно-алгоритмический комплекс КМСС, предназначенный для автоматической обработки видеоданных, был разработан в АНО «Космос-НТ» (Москва) по заказу НЦОМЗ (Научный центр оперативного мониторинга Земли).

Принятая информация КМСС поступает с антенны на станцию приема и затем на сервер предварительной обработки, где данные КМСС выделяются из общего потока и для каждого эпизода (фрагмента маршрута, в течение которого соблюдается последовательность порядковых номеров строк видеоданных) формируются следующие файлы:

- приборный файл (\*.fds), содержащий строки упакованных данных КМСС;
- файл данных ККВО (\*.kkvo), содержащий данные прибора АСН-М-М, данные прибора звездной ориентации БОКЗ-М и данные датчиков угловых скоростей (ДУС);
- файл заголовка (метаданные) (\*.rsm), содержащий всю информацию о сеансе измерений.

Предварительная обработка данных КМСС (рис. 6) включает в себя:

- формирование навигационного файла (\*.nav) при помощи консольного приложения FormKKVO на основе файла данных ККВО и файла заголовка. Навигационный файл содержит информацию об элементах внешнего ориентирования камер КМСС (координаты задней узловой точки камеры и матрицу перехода от связанной системы координат к Гринвической системе координат) на момент получения каждой строки по данным служебных систем КА «Метеор-М» № 1;
- трансформирование изображений, полученных системой КМСС в заданную картографическую проекцию при помощи консольных приложений KMSS\_RadGeo и KMSS\_Coreg на основе приборного, навигационного файлов и файла заголовка с учетом данных по радиометрической и геометрической калибровке камер КМСС.
   Предварительная обработка проводится по эпизодам и включает следующие этапы:
- 1) разбиение эпизода на кадры, радиометрическая коррекция и создание зональных изображений;
- временная и географическая привязка изображений с использованием информации о положении и ориентации КА;
- 3) геометрическое совмещение зональных изображений на заданной географической сетке.

Первые два этапа обработки реализует консольное приложение KMSS\_RadGeo, третий этап – консольное приложение KMSS\_Coreg.



Рис. 6. Схема предварительной обработки данных КМСС

Входным параметром программы KMSS\_RadGeo является шаблон имени входных файлов эпизода TTT\_NNNNNN\_M\_N, по которому определяются:

- код камеры;
- приборный файл камеры КМСС;
- навигационный файл;
- файл заголовка.

Выходной информацией приложения KMSS\_RadGeo являются радиометрически скорректированные зональные изображения (файл-матрицы спектральных каналов) с разбивкой по кадрам и соответствующие им файл-сетки географической привязки спектральных каналов. Эта информация – входная для приложения KMSS\_Coreg, которое формирует совмещенное изображение и «Квиклук».

Информация обо всех этапах обработки добавляется в файл заголовку.

Выходные файлы, соответствующие каждому кадру, архивируются с помощью программ ZIP или RAR. Архивированный файл имеет имя соответствующего кадра с расширением .zip или .rar.

### Алгоритмы формирования навигационного файла. Консольное приложение FormKKVO

Консольное приложение FormKKVO осуществляет формирование навигационных файлов на основе обработки данных прямых измерений пространственной ориентации центра масс КА и угловой ориентации осей КА в инерциальной системе координат, выполненных комплексом координатно-временного обеспечения – ККВО. Сформированные навигационные файлы далее используются в консольном приложении KMSS\_RadGeo.

При выполнении консольного приложения FormKKVO происходит считывание данных из файла аппаратуры KKBO (\*.kkvo), считывание начала момента съемки из файла заголовка (\*.rsm), декодирование данных с приборов ACH-M-M и БОКЗ-М в соответствии со структурой файла KKBO. При этом фильтруются данные ACH-M-M и БОКЗ-М по реальному значению времени привязки, по допустимому интервалу изменения между соседними данными (допуск на *dt*), по допустимому изменению самих данных (допуск БОКЗ – не более  $0,2^{\circ}$  между соседними измерениями, ACH-M-M – не более 200 м между соседними измерениями). Производится кусочно-полиномиальная аппроксимация данных с ACH-M-M и БОКЗ-М по способу наименьших квадратов. По данным с прибора ACH-M-M рассчитываются координаты центра масс KA в гринвичской геодезической системе координат WGS-84.

Прибор звездной ориентации БОКЗ-М измеряет по снимкам матрицу перехода от второй экваториальной системы (ИСК) координат текущей эпохи к приборной системе координат (ПСК).

С учетом матрицы установки прибора БОКЗ-М относительно связанной системы координат (ССК) КА определяется матрица перехода от этой системы координат ко второй экваториальной системе координат, а также матрица перехода от связанной системы координат к орбитальной системе координат, по которой вычисляются углы: крена, тангажа и курса. Для перехода от измерений прибора звездной ориентации к связанной системе координат (ГСК) используются следующие формулы:

$$M_{\Gamma CK}^{CCK} = S_{\Gamma CK}^{UCK} \left( M_{CCK}^{\Pi CK} M_{\Pi CK}^{UCK} \right)^T, \tag{1}$$

где  $M_{\Gamma CK}^{CCK}$  – матрица перехода от ССК КА в ГСК;  $S_{\Gamma CK}^{UCK}$  – матрица перехода от ИСК в ГСК;  $M_{CCK}^{\Pi CK}$  – матрица перехода от ПСК БОКЗ-М в ССК КА;  $M_{\Pi CK}^{UCK}$  – матрица перехода от ИСК в ПСК БОКЗ-М.

На каждый момент времени получения данных рассчитывается истинное звездное время (по данным ACH-M-M) на гринвичском меридиане, определяющее переход от инерциальной системы координат к гринвичской системе координат WGS-84.

Задаваясь временем начала съемки по коэффициентам полинома, можно рассчитать три угла разворота связанной системы координат относительно гринвичской системы координат и координаты центра съемки на момент получения каждой строки изображения. Полином строится таким образом, чтобы середина интервала данных (10 измерений) приходилась на момент получения текущей строки изображения.

Так для всех строк сканерного изображения МСУ формируется навигационный файл, содержащий матрицу перехода от связанной системы координат камеры к гринвичской системе координат WGS-84 и координаты центра масс.

## Повышение точности географической привязки видеоданных. Коррекция по опорным точкам

В Приложении FormKKVO предусмотрены дополнительные возможности повышения точности географической привязки видеоданных КМСС путем проведения коррекции по опорным точкам, выбранным на изображении. В этом случае формируется файл, в котором для каждой опорной точки на изображении MCУ/KMCC содержатся ее географические координаты в трех спектральных каналах и географические координаты, определенные по имеющимся картографическим материалам, в данном случае использовалась программа Google Earth.

Далее в первом варианте осуществляется «коррекция по времени». В этом случае определяется средняя по времени поправка к времени привязки данных ACH-M-M для всех опорных точек во втором (надирном) спектральном канале и формируется новый навигационный файл.

Для каждой опорной точки используется набор элементов внешнего ориентирования из навигационного файла, полученный в процессе съемки земной поверхности. Для моментов времени начала и окончания съемки из набора элементов внешнего ориентирования определяются координаты X, Y во внутренней системе координат второго (надирного) канала МСУ. При этом подбирается такое время t, при котором координата Y, совпадающая с направлением сканирования камеры, равна нулю. Данная операция вычисления момента времени проводится как для географических координат с карты (map), так и для координат с трансформированного изображения (image), и определяются времена  $t_{map}$  и  $t_{image}$  соответственно. Разность  $dt = t_{image} - t_{map}$  является величиной, на которую необходимо скорректировать все времена при построении навигационного файла. Коррекция по времени позволяет учесть помимо временных ошибок угловые смещения камеры по тангажу.

Для более полной компенсации искажений используется принцип «коррекции по углам», где коррекция осуществляется по трем углам: крену, курсу и тангажу. Так же, как и в процедуре коррекции по времени, используя географические координаты с трансформированного изображения, можно определить моменты времени, при которых координаты У внутренней системы координат трех спектральных каналов камеры равны нулю. С использованием элементов внешнего ориентирования камеры относительно системы координат WGS-84 на момент времени t и начального приближения поправочной матрицы внутренней системы координат камеры относительно приборной системы координат камеры (из файла геометрической калибровки) определяются геоцентрические координаты точки съемки. Разность между полученными отношениями координат X/Z и Y/Z для точки съемки и соответствующей точки на географической карте по способу наименьших квадратов, по возможности, приводится к нулю за счет уточнения трех углов, образующих поправочную матрицу внутренней системы координат камеры относительно приборной системы. С учетом поправочной матрицы уточняются направляющие косинусы всех элементов ПЗС-линеек в трех каналах в приборной системе координат. Уравненные значения трех углов являются коррекциями по: крену, курсовому углу и тангажу. Формируется новый файл геометрической калибровки, который далее используется в консольном приложении KMSS RadGeo.

### Полетная калибровка камер МСУ (формирование файла геометрической калибровки)

Качество географической координатной привязки видеоданных во многом определяется точностью геометрической калибровки камер МСУ. Для каждого устройства МСУ

в наземных условиях на лабораторном стенде проводятся геометрические измерения, и полученные данные записываются в файл геометрической калибровки соответствующей камеры, в котором для каждого пиксела каждого из трех каналов содержатся три компонента вектора направления в приборной системе координат.

Данные геометрической калибровки камер МСУ уточняются в ходе полетной калибровки.

На первом этапе полетной калибровки камер МСУ осуществлялось формирование навигационного файла с координатами центра съемки на моменты получения каждой строки сканерного изображения и матрицы перехода от системы координат строительных осей КА к географической системе координат.

При формировании навигационного файла использовалась полиномиальная аппроксимация углов вращения вокруг осей координат по трем измерениям датчика звездной ориентации БОКЗ-М и прибора спутниковой навигации АСН-М-М.

На сканерном изображении были выбраны опорные точки по всей ширине строки и определены их географические координаты (долгота  $\lambda$ , широта  $\varphi$  и высота H) по имеющимся картографическим материалам. Данные, содержащие координаты опорных точек на сканерном изображении (строка и столбец) и географические координаты опорных точек, были записаны в файл.

Была составлена система уравнений связи координат точек на сканерном изображении, использующая соответствующую строке изображения запись навигационного файла с координатами, полученными с карты:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{O\Pi} = \begin{pmatrix} (N+H)\cos\lambda\cdot\cos\varphi \\ (N+H)\sin\lambda\cdot\cos\varphi \\ (N(1-e^2)+H)\sin\varphi \end{pmatrix},$$
(2)

где  $X_{OII}$ ,  $Y_{OII}$ ,  $Z_{OII}$  – координаты опорной точки в гринвичской геоцентрической системе координат;  $\lambda$ ,  $\varphi$ , H – географические координаты опорной точки с картографических материалов, масштабом не мельче 1 : 100 000; N – первый вертикал эллипсоида WGS-84 на широте  $\varphi$ .

В качестве параметра модели использовалась вспомогательная матрица перехода  $A(a_{11}, a_{12}, ..., a_{33})$  от номинальной (приборная) системы координат камеры к внутренней системе координат канала сканерного изображения:

$$X_{\text{H3M}} = X_{S} + (Z_{\text{OII}} - Z_{S}) \frac{a_{11}x - a_{13}f}{a_{31}x - a_{33}f},$$

$$Y_{\text{H3M}} = Y_{S} + (Z_{\text{OII}} - Z_{S}) \frac{a_{21}x - a_{23}f}{a_{31}x - a_{33}f},$$
(3)

где  $X_{\rm ИЗМ}$ ,  $Y_{\rm ИЗM}$  – координаты опорных точек на сканерном изображении;  $X_s$ ,  $Y_s$ ,  $Z_s$  – координаты центра съемки в геоцентрической системе координат (СК) Земли, выбранные из навигационного файла (\*.nav – НЦОМЗ) по координате *у* (номеру строки); *f* – фокусное расстояние камеры.

При этом были параметризованы элементы внутреннего ориентирования камеры: фокусное расстояние, параметры дисторсии и три угла, задающих элементы матрицы перехода.

Разница компенсируется за счет определения поправок ( $F_{X}$ ,  $F_{Y}$ ) в искомые параметры по способу наименьших квадратов методом последовательных приближений:

$$F_{X} = X_{O\Pi} - X_{H3M},$$

$$F_{Y} = Y_{O\Pi} - Y_{H3M},$$

$$A = A' \cdot dA,$$

$$x = p_{0} + p_{1}x' + p_{2}x'^{2} + p_{3}x'^{3} + p_{4}x'^{4} + p_{5}x'^{5},$$
(4)

где A – матрица перехода от реальной (ВСК) системы координат линейки МСУ к гринвичской геоцентрической системе координат; A' – матрица перехода от номинальной системы координат МСУ, определяемой по конструкторской документации, к гринвичской геоцентрической системе координат; матрица выбирается из навигационного файла по координате y (номеру строки); dA – дополнительная матрица, задающая переход от реальной (ВСК) системы координат линейки МСУ к номинальной системе координат МСУ; x' – номер столбца изображения; x – номер столбца изображения с учетом дисторсии;  $p_0$ ,  $p_1$ , ...,  $p_5$  – коэффициенты полинома, описывающего дисторсию.

Построенная система (4) решается относительно трех углов поворота вокруг осей координат, определяющих искомую матрицу, фокусное расстояние и параметры дисторсии по способу наименьших квадратов методом последовательных приближений.

Полученная матрица для надирного канала использовалась с целью уточнения навигационного файла.

Матрицы, фокусные расстояния и углы, полученные для других каналов, были использованы для формирования калибровочных файлов геометрических параметров каналов, применяемых при трансформировании.

#### Точность автоматической географической привязки видеоданных КМСС

Результатом автоматической географической привязки видеоданных КМСС являются синтезированные спектрозональные изображения, трансформированные в картографические проекции UTM, построенные с использованием данных комплекса координатно-временного обеспечения (ККВО), в состав которого входят приборы спутниковой навигации ACH-M-M и звездной ориентации БОКЗ-М.

На *рис.* 7 и 8 представлены изображения, полученные камерой МСУ-100 (зав. № 02) на сеансе 3 июня 2012 г. на витке № 14049. Высота съемки составляла 820 км.

Точность автоматической географической привязки оценивалась на тестовых витках. Были проанализированы данные, полученные камерами МСУ-100 (зав. № 01 и 02) на сеансах с 3 по 18 июня 2012 г. (витки № 14049–14262).



Рис. 7. Синтезированное спектрозональное изображение МСУ-100 (зав. № 02), построенное с использованием данных ККВО, трансформированное в картографическую проекцию UTM. Черное и Мраморное моря, пролив Босфор. Съемка выполнена 3 июня 2012 г. (виток № 14049)



Рис. 8. Синтезированное спектрозональное изображение МСУ-100 (зав. № 02), построенное с использованием данных ККВО и трансформированное в картографическую проекцию UTM. Западная Турция. Съемка выполнена 3 июня 2012 г. (виток № 14049)

Точностные параметры трансформированных изображений приборов МСУ с использованием файлов геометрической калибровки и данных ККВО представлены в *табл. 3*.

Способ построения изображения	Точность географической привязки данных		Точность сведения спектральных каналов МСУ	
	среднее значение ошибки, км (пиксел)	СКО, км (пиксел)	среднее значение ошибки, км (пиксел)	СКО, км (пиксел)
Использование данных ККВО	0,363 (6,05)	0,1145 (1,9)	0,1 (1,7)	0,0574 (0,956)
Коррекция по времени	0,356 (5,93)	0,09 (1,5)	0,0928 (1,5483)	0,0477 (0,796)
Коррекция по углам	0,306 (5,1)	0,0872 (1,45)	0,064 (1,068)	0,045 (0,748)

Таблица 3. Точностные параметры трансформированных изображений приборов МСУ с использованием файлов геометрической калибровки и данных ККВО

Точность сведения спектральных каналов приборов МСУ определяется элементом разрешения, точность географической привязки составляет около 350 м. Ошибка географической привязки смещена вдоль направления полета. Основным источником ошибок географической привязки изображений является неточность фиксации времени начала сеанса съемки телеметрической системой, что объясняется рассинхронизацией времени данных прибора астроориентации со временем запроса.

Так, при точности фиксации 1 с ошибка географической привязки составляет 7,5 км. Ошибка фиксации времени начала сеанса съемки имеет случайный характер. Предельная ошибка определения угловой ориентации прибором БОКЗ-М – 45 угл. с или 175 м, что составляет 3,5 элемента разрешения прибора МСУ-50 или 1,7 элемента разрешения МСУ-100.

На *рис.* 9 представлено синтезированное спектрозональное изображение (наложенное на основу Google Earth), полученное камерой МСУ-101 на сеансе 13 июня 2012 г., виток № 14205. При этом данные с ККВО отсутствовали. Среднее значение точности географической привязки в этом случае составило 15,5 км, а точность сведения спектральных каналов – 6,277 км (или 104 пиксела) (*табл. 4*).



Рис. 9. Синтезированное спектрозональное изображение (наложенное на основу Google Earth). Украина. Крымский п-ов. Съемка выполнена прибором MCУ-101 13 июня 2012 г. (виток № 14205)

Способ построения изображения	Точность географической привязки данных		Точность сведения спектральных каналов МСУ	
	среднее значение ошибки, км (пиксел)	СКО, км (пиксел)	среднее значение ошибки, км (пиксел)	СКО, км (пиксел)
Полученные данные	15,5 (258,3)	5,877 (97,95)	6,277 (104,62)	3,937 (65,62)
Исправленные данные (коррекция по углам)	0,378 (6,3)	0,108 (1,8)	0,09 (1,5)	0,056 (0,937)

Таблица 4. Точностные параметры трансформированных изображений МСУ-101 на витке № 14205

Была проведена коррекция по углам с построением нового файла геометрической калибровки. На *рис. 10* представлено синтезированное спектрозональное изображение, пересчитанное с использованием нового калибровочного файла. При этом точность географической привязки данных составила 378 м, точность сведения спектральных каналов 90 м (1,5 пиксела).



Рис. 10. Синтезированное спектрозональное изображение (наложенное на основу Google Earth). Украина. Крымский п-ов. Съемка выполнена прибором МСУ-101 13 июня 2012 г. (виток № 14205). Произведена коррекция по углам

#### Выводы

Требуемая точность географической привязки пространственных данных комплекса многозональной спутниковой съемки (КМСС), функционирующего на борту КА «Метеор-М» № 1, обеспечивается данными с навигационных приборов комплекса координатно-временного обеспечения (ККВО) КА – прибора звездной ориентации (БОКЗ-М) и системы спутниковой навигации (АСН-М-М) КА «Метеор-М» № 1.

Повышение точности автоматической географической привязки видеоданных достигается использованием специально разработанного для этих целей программно-алгоритмического комплекса предварительной обработки видеоданных КМСС, в котором полученные сканерные изображения камер МСУ, с учетом данных ККВО, трансформируются в заданную картографическую проекцию, осуществляется географическая координатная привязка изображений, сведение спектральных каналов и синтез спектрозональных изображений.

Проведенные оценки показывают, что точность сведения спектральных каналов приборов МСУ определяется элементом разрешения, точность географической привязки составляет около 350 м.

Указанные точности могут быть повышены путем синхронизации времени данных прибора астроориентации БОКЗ-М со временем начала сеанса съемки телеметрической системой КМСС. Поскольку в данное время ошибка фиксации времени начала сеанса съемки КМСС имеет случайный характер, то при точности фиксации 1 с ошибка географической привязки составляет 7,5 км. Предельная ошибка определения угловой ориентации прибором БОКЗ-М – 45 угл. с или 175 м, что составляет 3,5 элемента разрешения прибора МСУ-50 или 1,7 элемента разрешения МСУ-100.

#### Литература

1. Аванесов Г.А., Полянский И.В., Жуков Б.С., Никитин А.В., Форш А.А. Комплекс многозональной спутниковой съемки на борту КА «Метеор-М» № 1: три года на орбите // Исследование Земли из космоса. 2013. № 2. С. 74–83.

## Accuracy of spatial data automatic gridding of Satellite Multiband Imaging System through flight operation

#### T.V. Kondratieva, A.V. Nikitin, I.V. Polyanskiy

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

The problems of accuracy estimation of spatial data automatic gridding of the satellite multiband imaging system (KMSS) through the operation on the board of satellite Meteor-M N. 1 are discussed. The results of transforming the scanner images to the specified map projections, as well as the spectral channels binding and building multispectral images using the data of System for Coordinate and Clock Referencing (KKVO), which consist of star tracker (BOKZ-M) and Autonomous navigation system (ASN-M-M), are presented.

**Keywords:** Earth remote sensing instruments, multispectral scanner (MSU), Satellite Multiband Imaging System (KMSS), BOKZ-M (star tracker), ASN-M-M (autonomous navigation system), geometrical calibration, multispectral images, gridding, geocoding.