

Определение геометрических параметров приборов МСУ-100, МСУ-50 КА «Метеор-М»

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

*Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, Профсоюзная 84/32
E-mails: andvnik935@yandex.ru*

Рассмотрены вопросы определения геометрических параметров приборов МСУ, которые используются при трансформировании сканерных изображений в заданную картографическую проекцию, а также с целью их координатной привязки, сведения спектральных каналов и построения спектральнозональных изображений. Рассматриваются как наземная, так и полетная часть калибровка камеры, выполняемая при определении геометрических параметров.

Ключевые слова: МСУ (многозональное сканирующее устройство), БОКЗ-М (блок определения координат звезд), АСН-М-М (автономная система навигации), геометрическая калибровка, фокусное расстояние, спектральнозональное изображение, координатная привязка.

Введение

В настоящее время широкое использование получают сканерные системы, использующие в качестве приемника излучения приборы с зарядовой связью, объединенные в линию (ПЗС-линейки). Это происходит главным образом за счет достижения приемлемого соотношения угол поля зрения – пространственное разрешение. Так в оптико-физическом отделе ИКИ РАН разрабатываются и изготавливаются многозональные сканирующие устройства МСУ для КА «Метеор-М». С целью обеспечения координатной привязки изображений используются данные с навигационных приборов КА – прибора звездной ориентации (БОКЗ-М) и системы спутниковой навигации (АСН-М-М). Для успешного применения навигационных данных с этих приборов при координатной привязке следует иметь представление о геометрических параметрах оптической системы съемочной камеры (фокусное расстояние, углы наклона, дисторсия). Статья посвящена разработанной методике определения геометрических параметров камер МСУ в процессе обработки результатов наземной и полетной калибровки. Вычисленные параметры применяют при трансформировании сканерных изображений МСУ, которые используются в дальнейшем при решении широкого круга прикладных задач дистанционного зондирования Земли.

1. Приборы, используемые для построения спектральнозональных аэрокосмических изображений подстилающей поверхности

Для построения спектральнозональных аэрокосмических изображений подстилающей поверхности в ИКИ РАН разрабатываются и изготавливаются многозональные сканирующие устройства, использующие в качестве приемника излучения линейные ПЗС, основным достоинством которых является высокое разрешение (0.007 мм) и достаточно широкий угол поля зрения: 30° для камеры МСУ-100 и 60° для камеры МСУ-50.

Многозональное устройство МСУ-50 предназначено для исследований океана и обладает следующими характеристиками: пространственное разрешение: 120 м, спектральные каналы: 0,370-0,450 мкм, 0,450-0,510 мкм, 0,580-0,690 мкм, фокусное расстояние объектива 50 мм, длина строки сканерного изображения (линейки) 7926 элементов по 0,007 мкм.

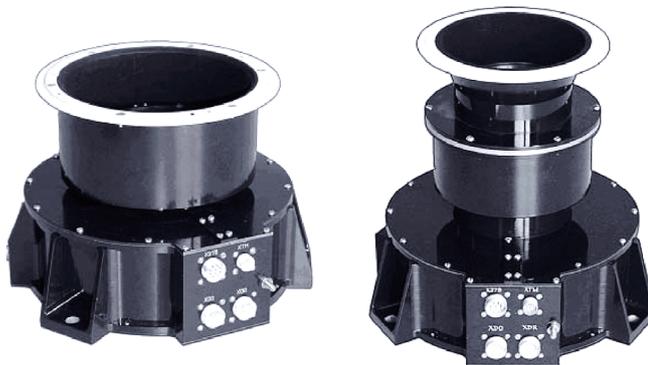


Рис. 1. Сканирующие устройства МСУ-50 (а), МСУ-100 (б)

Многозональное устройство МСУ-100 предназначено для исследования поверхности суши и имеет характеристики: пространственное разрешение: 60 м, спектральные каналы: 0,535-0,575 мкм, 0,630-0,680 мкм, 0,760-0,900 мкм, фокусное расстояние объектива 100 мм, длина строки сканерного изображения (линейки) 7926 элементов по 0,007 мкм.

Функциональное размещение камер МСУ в приемо-передающем контуре получения изображения ДЗЗ на КА «Метеор-М» приведено на рис. 2. В процессе функционирования видеоинформация с МСУ передается в БИС-М (Бортовая информационная система), куда одновременно передаются навигационные данные с комплекса приборов ККВО.

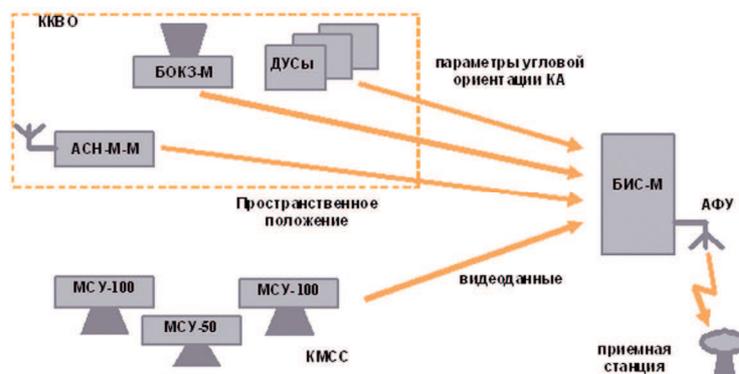


Рис. 2. Схема функционирования ККВО для обеспечения географической координатной привязки видеоданных КМСС

Система ККВО (координатно-временного обеспечения) КА Метеор-М предназначена для координатной привязки видеоданных сканирующих устройств МСУ и состоит из трех приборов: Системы спутниковой навигации (АСН-М-М), прибора звездной ориентации (БОКЗ-М) и датчиков угловой скорости (ДУС). Схема функционирования представлена на рис. 2.

Система АСН-М-М (рис. 3) предназначена для определения геоцентрических координат в гринвической географической системе координат с точностью 15 м и привязке к всемирному времени с точностью 10 мкс, обладает частотой обновления информации 1 Гц. На борту КА Метеор-М используется для формирования секундных меток для синхронизации измерений прибора звездной ориентации БОКЗ-М.

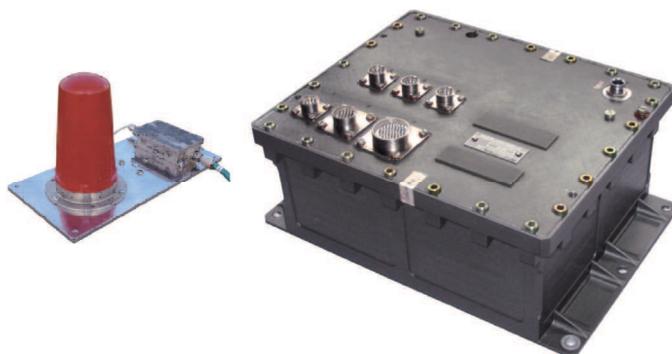


Рис. 3. Система спутниковой навигации АСН-М-М

Прибор БОКЗ-М (рис. 4) предназначен для определения кватерниона ориентации осей приборной системы координат во второй экваториальной системе координат и обладает следующими характеристиками: интервал между измерениями 3 сек., матрица 512x512 элементов, звездный каталог 8500 звезд до 7.5 mv, угол поля зрения 8 градусов, точность по углам вращения вокруг осей X, Y 1.5 угл.сек. и 15 угл.сек. вокруг оси Z.



Рис.4. Прибор звездной ориентации БОКЗ-М

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

2. Геометрическая калибровка камер МСУ

Геометрическая калибровка предназначена для определения параметров модели, используемой при фотограмметрической обработке изображений, полученных многозональным сканирующим устройством (МСУ) (рис.5.).

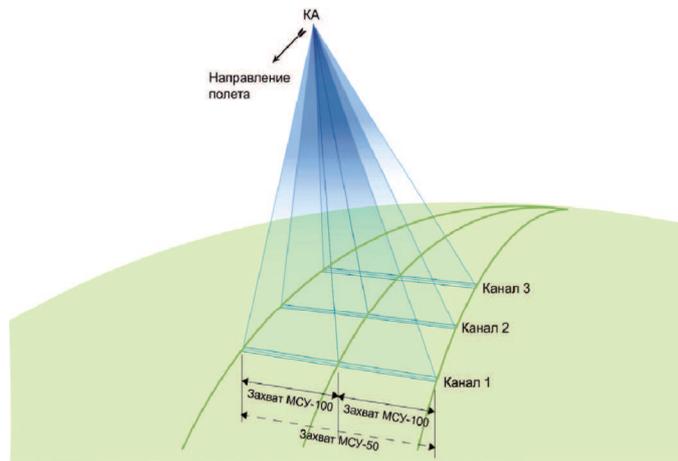


Рис.5. Схема получения изображений камерами МСУ-100 и МСУ-50

В качестве этих параметров выступают: фокусное расстояние, три угла ориентации внутренней системы координат ПЗС линейки относительно приборной системы координат. Приборная система координат определяется посадочной плоскостью прибора, направлением классный паз – классное отверстие. Эти параметры однозначно определяют переход от каждого элемента изображения в приборную систему координат, то есть определяют их направляющие косинусы. Калибровку необходимо проводить, прежде всего, из-за погрешностей изготовления элементов конструкции прибора. Не учет этих погрешностей приводит к ошибкам привязки в десятки угловых минут.

Следует отметить, что для камеры МСУ-50 вследствие особенностей конструкции объектива и широкого угла поля зрения (60°) для достижения точности калибровки в элемент разрешения, в качестве геометрических параметров ПЗС линейки используются параметры дисторсии, описывающие поле искажений объектива.

2.1. Наземная калибровка камер МСУ на лабораторном стенде

Для проведения наземной калибровки камер МСУ был создан лабораторный измерительный стенд (рис. 6). Измерения на стенде проводились в соответствии со следующей методикой. Базовое зеркало (2) было установлено на имитатор посадочного места камеры МСУ (8а). При помощи уровня (5) верхняя грань имитатора посадочного места (8а) была приведена в горизонтальное положение. Положение нормали к контрольному зеркалу (3) фиксировалось при помощи контрольного теодолита (1). Устанавливался нулевой отсчет измерительного теодолита (4) на базовое зеркало (2). Базовое зеркало (2) перемещалось на имитатор посадочной плоскости (8б), его верхняя грань приводилась в вертикальное положение. Прибор устанавливался на имитатор посадочного места прибора (8а). Подключалось КИА МСУ (7) и включался прибор (6). Нулевой отсчет измерительного теодолита (4) устанавливался на базовое зеркало (2), предварительно записывались измеренный горизонтальный угол между направлением на имитатор посадочного места МСУ (8а) и направлением на базовое зеркало (2). Перемещая зрительную трубу измерительного теодолита (4) фиксировалось изображение центра проектируемой мишени на КИА МСУ и записывался номер отсчета с теодолита и данные об измеренных теодолитом углах. При выходе за поле зрения прибора теодолит перемещался по горизонтали (10), обнулялся горизонтальный угол на базовое зеркало (2) и продолжалась фиксация изображений, начиная с

предыдущего шага. После завершения работы с линейкой, при помощи вертикального перемещения (10) осуществлялся переход к работе со следующей линейкой. По завершении измерений данные с теодолита (4) были переданы на компьютер КИА МСУ (7).

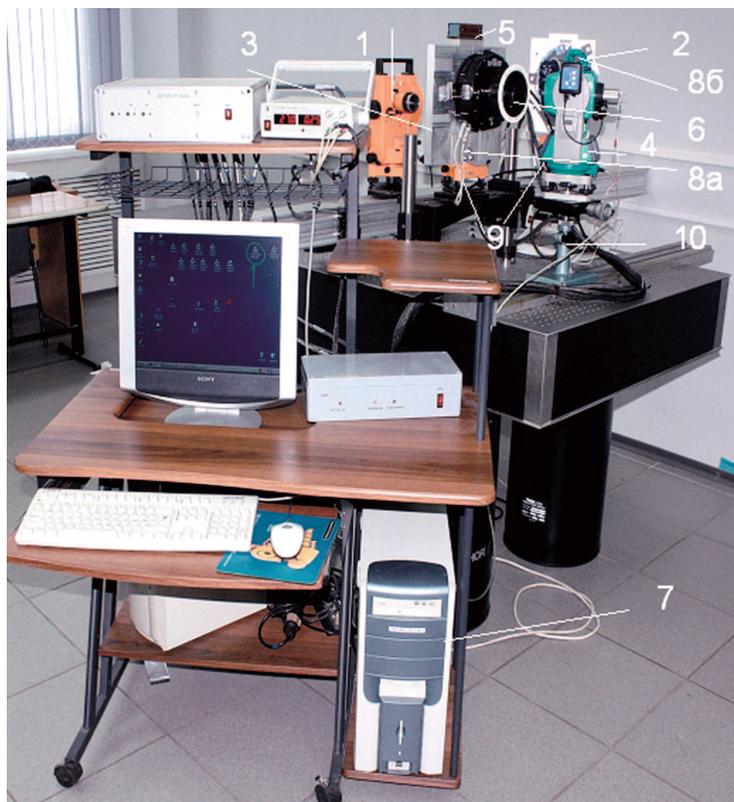


Рис. 6. Стенд наземной геометрической калибровки камер МСУ: 1-контрольный теодолит, 2-базовое зеркало, 3-контрольное зеркало, 4-измерительный теодолит, 5-цилиндрический уровень, 6-камера МСУ, 7-контрольно-измерительная аппаратура МСУ, 8-два имитатора посадочного места МСУ, 9-два трегера, 10-система горизонтальных и вертикальных перемещений измерительного теодолита

Обработка данных измерений геометрической калибровки камер МСУ, проведенной на стенде, выполнялась для каждого изображения мишени (см. рис. 7, 8, 9) по следующему алгоритму.

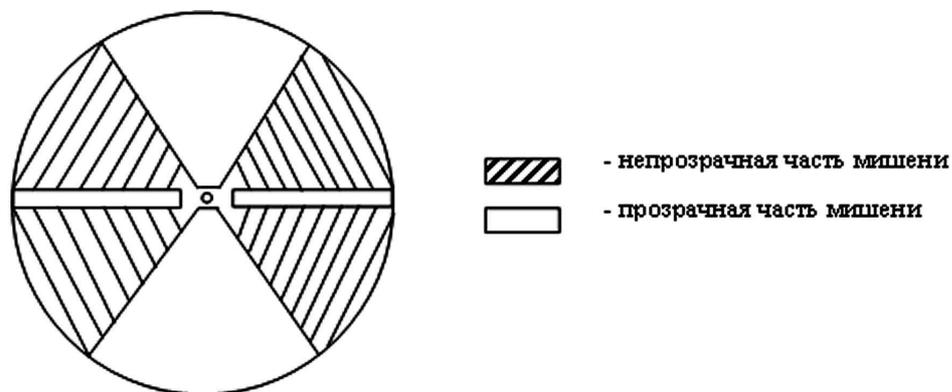


Рис. 7. Форма проектируемой мишени

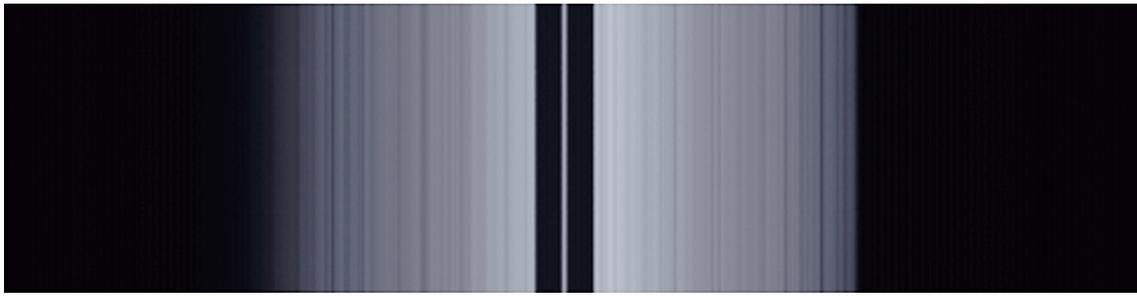


Рис. 8. Изображение проектируемой мишени

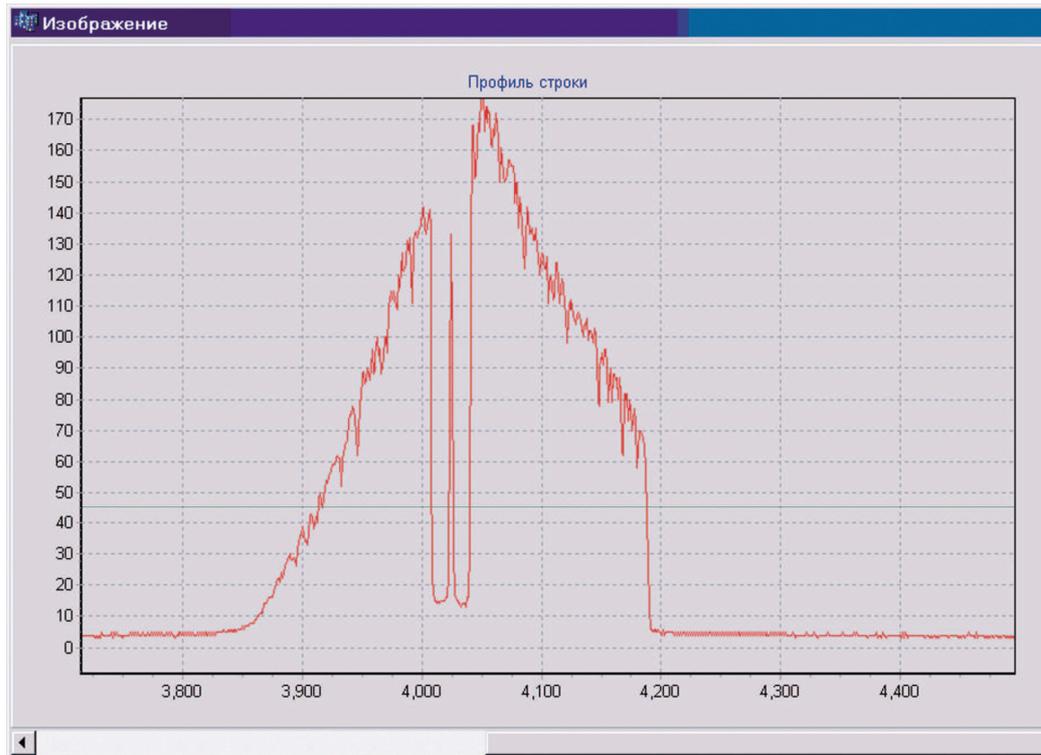


Рис. 9. Фрагмент профиля первой строки изображения мишени

По нескольким строкам мишени определялся ее энергетический центр \hat{x} по формуле (1):

$$\hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i B_i}{\sum_{i=1}^n B_i} \quad (1)$$

где B – яркость в градациях АЦП; n – число элементов в изображении мишени.

По номеру выбирался отсчет вертикального и горизонтального углов теодолита из файла. Координаты центра мишени и соответствующие угловые положения зрительной трубы теодолита были сведены в единую таблицу.

Была составлена система уравнений, связывающая направление на центр изображения мишени во внутренней системе координат спектрального канала МСУ с приборной системой координат, определяемой горизонтальной и вертикальной осями измерительного теодолита при помощи матрицы перехода и фокусного расстояния (2):

$$\begin{aligned}
l_{ПСК} &= \sin\alpha \cdot \cos\beta; \\
m_{ПСК} &= -\sin\beta; \\
n_{ПСК} &= -\cos\alpha \cdot \cos\beta. \\
\operatorname{tg}\alpha_x^{\text{выч}} &= \frac{a_{11}x - a_{13}f}{a_{31}x - a_{33}f}; \\
\operatorname{tg}\alpha_x^{\text{изм}} &= \frac{l_{ПСК}}{n_{ПСК}}; \operatorname{tg}\alpha_y^{\text{изм}} = \frac{m_{ПСК}}{n_{ПСК}}.
\end{aligned}
\tag{2}$$

где α – горизонтальный угол теодолита; β – вертикальный угол теодолита; $l_{ПСК}$, $m_{ПСК}$, $n_{ПСК}$ – направляющие косинусы вектора «узловая точка – изображение центра мишени» в приборной системе координат; a_{ij} – элементы матрицы перехода от внутренней системы координат к приборной системе координат; α_x – угол направления на центр мишени в плоскости ХZ ПСК; α_y – угол направления на центр мишени в плоскости YZ ПСК.

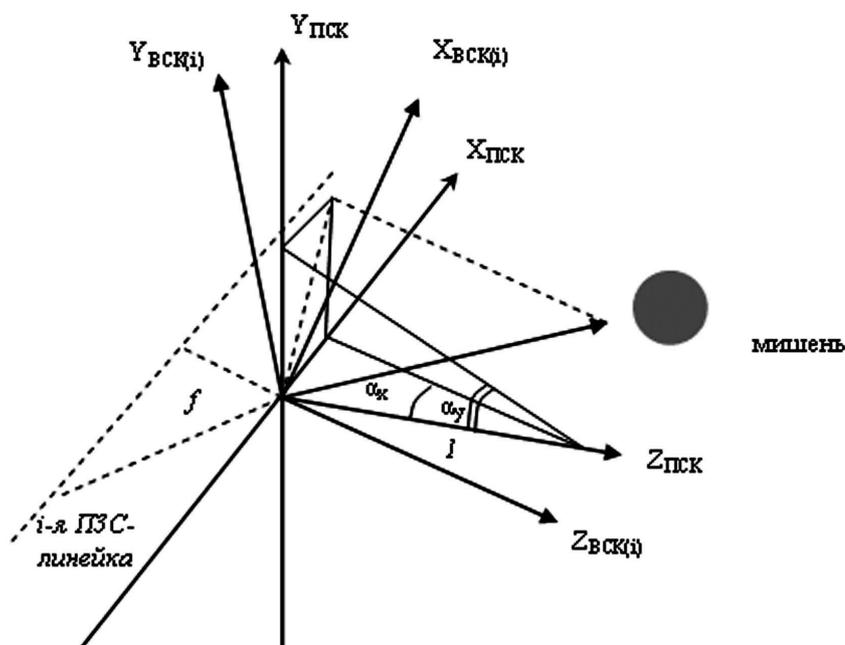


Рис.10. Расположение приборной и внутренней систем координат ПЗС линейки i -го канала, а также определение направления на центр мишени

Направление, измеренное теодолитом, сравнивалось с вычисленным по изображению направлением с помощью номинальных матриц перехода от ВСК к ПСК и фокусному расстоянию канала (см. рис. 6). Разница компенсировалась за счет определения поправок в искомые параметры по способу наименьших квадратов методом последовательных приближений (3):

$$\begin{aligned}
F_x &= \operatorname{tg}\alpha_x^{\text{выч}} - \operatorname{tg}\alpha_x^{\text{изм}} \\
F_y &= \operatorname{tg}\alpha_y^{\text{выч}} - \operatorname{tg}\alpha_y^{\text{изм}}
\end{aligned}
\tag{3}$$

Рассчитанные параметры были использованы при определении направлений в ПСК для каждого элемента строки сканерного изображения.

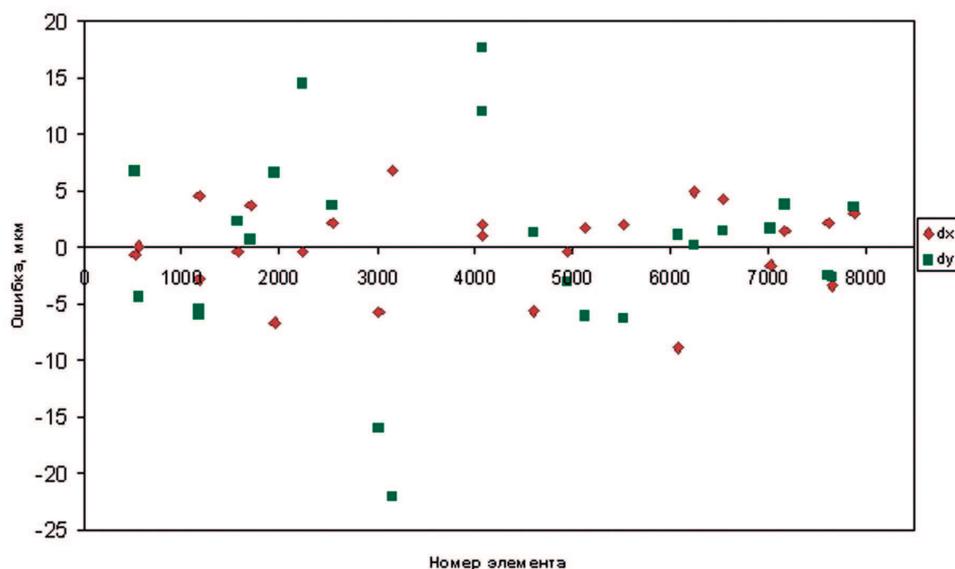


Рис. 11. График зависимости ошибки определения направления центра мишени теодолита на элемент ПЗС-линейки от номера элемента. dx – ошибка вдоль линейки, dy – ошибка поперек линейки

Данный алгоритм за счет избыточности измерений позволяет оценить точность выполненной калибровки. В случае если достигнутая точность не достаточна, необходимо вводить описание дисторсии объектива камеры, параметризуя коэффициенты, описывающего ее полинома (4):

$$\begin{aligned}
 dx &= \sum_{j=0}^7 k_{xj} \cdot x^j; \\
 dy &= \sum_{j=0}^7 k_{yj} \cdot x^j; \\
 F_{dx} &= V_x - dx; \\
 F_{dy} &= V_y - dy.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

После определения геометрических параметров прибора направления в ПСК для каждого элемента строки сканерного изображения были определены по формулам (5). При этом x изменялось в зависимости от номера элемента линейки ПЗС в диапазоне от -27.741 мм до 27.741 мм с шагом равным размеру элемента изображения (0.007 мм).

$$\begin{aligned}
 l &= \frac{tg\alpha_x + dx}{\sqrt{tg^2\alpha_x + tg^2\alpha_y + 1}}; \\
 m &= \frac{tg\alpha_y + dy}{\sqrt{tg^2\alpha_x + tg^2\alpha_y + 1}}; \\
 n &= \frac{1}{\sqrt{tg^2\alpha_x + tg^2\alpha_y + 1}}; \\
 tg\alpha_x &= \frac{a_{11}x - a_{13}f}{a_{31}x - a_{33}f}; \\
 tg\alpha_y &= \frac{a_{21}x - a_{23}f}{a_{31}x - a_{33}f}.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

В дальнейшем направляющие косинусы каждого элемента изображения были использованы при трансформировании полученных сканерных изображений в заданную картографическую проекцию с использованием данных приборов звездной ориентации и спутниковой системы навигации.

В качестве результатов проведения наземной калибровки камер МСУ приведем данные для камеры МСУ-100 зав.№02.

Геометрические параметры в итоге составили: поворот вокруг X ПСК -0.439° , поворот вокруг Y ПСК 359.595° , поворот вокруг Z ПСК 1.462° , фокусное расстояние 99.96 мм, при этом точность калибровки, определяемая среднеквадратической ошибкой составила 3.9 мкм, с.к.о. определения угла поворота вокруг оси X $g_x=1.4''$, с.к.о. определения угла поворота вокруг оси Y $g_y=1.5''$, с.к.о. определения угла поворота вокруг оси Z $g_z=9.8''$.

2.2. Полетная калибровка камер МСУ (методика)

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 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 λ , широта φ и высота H) по имеющимся картографическим материалам. Данные, содержащие координаты опорных точек на сканерном изображении (строка и столбец) и их географические координаты, были записаны в файл.

Была составлена система уравнений связи координат точек на сканерном изображении, используя соответствующую строке изображения запись навигационного файла с координатами, полученными с карты (7). В качестве параметра модели (6) использовалась вспомогательная матрица перехода от номинальной системы координат камеры к внутренней системе координат канала сканерного изображения. При этом были параметризованы элементы внутреннего ориентирования камеры: фокусное расстояние, параметры дисторсии и три угла, задающих элементы матрицы перехода.

Построенная система (8) была решена относительно 3-х 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 файлов геометрических параметров каналов, применяемых при трансформировании.

$$\begin{aligned} X_{ИЗМ} &= X_s + (Z_{МАР} - Z_s) \frac{a_{11}x - a_{13}f}{a_{31}x - a_{33}f}; \\ Y_{ИЗМ} &= Y_s + (Z_{МАР} - Z_s) \frac{a_{21}x - a_{23}f}{a_{31}x - a_{33}f}. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{МАР} = \begin{pmatrix} (N + H) \cos \lambda \cos \varphi \\ (N + H) \sin \lambda \cos \varphi \\ (N + H) \sin \varphi \end{pmatrix}; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} F_x &= X_{МАР} - X_{ИЗМ}; \\ F_y &= Y_{МАР} - Y_{ИЗМ}; \end{aligned} \quad (8)$$

$$A = A' \cdot dA;$$

$$x = p_0 + p_1 \cdot x' + p_2 \cdot x'^2 + p_3 \cdot x'^3 + p_4 \cdot x'^4 + p_5 \cdot x'^5.$$

где X_s, Y_s, Z_s – координаты центра съемки в геоцентрической СК Земли, выбранные из навигационного файла по координате y (номеру строки); dA – дополнительная матрица, задающая переход от номинальной СК координат МСУ к истинной; A' – матрица перехода от номинальной системы координат МСУ к гринвической геоцентрической системе координат, выбирается из навигационного файла по координате y (номеру строки); A – матрица перехода от истинной системы координат МСУ к гринвической геоцентрической системе координат; x' – номер столбца изображения; x – номер столбца изображения, исправленного за дисторсию; p_0, p_1, \dots, p_5 – коэффициенты полинома, описывающего дисторсию; $X_{МАР}, Y_{МАР}, Z_{МАР}$ – координаты опорной точки в гринвической геоцентрической системе координат; λ, φ, H – географические координаты опорной точки с картографических материалов, масштабов, не мельче 1:100000; N – первый вертикал эллипсоида WGS-84 на широте φ .

2.3. Результаты полетной калибровки камеры МСУ-102 и прибора БОКЗ-М на борту КА «Метеор-М»

Съемка камерой МСУ-102, установленной на борту КА «Метеор-М» была осуществлена 26.10.2009 с 07:24:34 по 07:36:32 UTC на витке №549. Координаты опорных точек на сканерном изображении (x, y) и соответствующие им географические координаты (φ, λ), используемые при калибровке среднего канала МСУ-102 приведены в таблице 1.

Таблица 1. Координаты опорных точек

№	$\lambda, ^\circ$	$\varphi, ^\circ$	$x, \text{пикс}$	$y, \text{пикс}$
1	31.5074	46.5807	6134.25	83285.75
2	31.5340	46.3684	5991.75	83809.75
3	33.0811	46.0161	3850.00	84077.75
4	32.8477	45.5700	3930.25	85280.75
5	32.4909	45.4057	4243.25	85870.50
6	32.4944	45.3472	4207.75	86019.50
7	32.6525	45.3150	3992.25	86035.00
8	32.9897	45.3256	3596.50	85858.75
9	33.5985	44.9756	2678.25	86483.50
10	33.3762	45.1855	3052.75	86050.75
11	33.5872	44.8445	2625.50	86820.50

В результате обработки съёмочных данных, полученных на витке 549, были получены следующие параметры канала съёмки: угол поворота вокруг X МСУ -0.439° , угол поворота вокруг Y МСУ 359.595° , угол поворота вокруг Z МСУ 1.462° , фокусное расстояние 98.779 мм, результирующая среднеквадратическая ошибка по Земле 150 м, с.к.о. определения угла поворота вокруг оси X $g_x=0.54'$, с.к.о. определения угла поворота вокруг оси Y $g_y=0.74'$, с.к.о. определения угла поворота вокруг оси Z $g_z=6.98'$.

Результатом обработки является синтезированное изображение, представленное на рис. 12. Точность сведения спектральных каналов и их географическая привязка определяется величиной среднеквадратической ошибки и составляет 600 м.

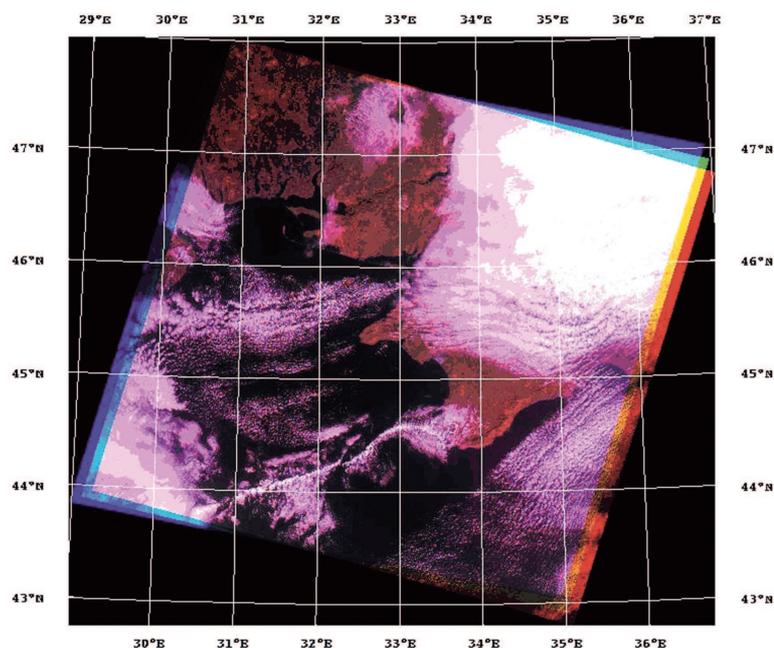


Рис. 12. Синтезированное спектральноное изображение в картографической проекции UTM, построенное с использованием результатов полетной и наземной калибровки с использованием данных ККВО. Географические координаты центра изображения: долгота 33^0 в.д., широта 45^0 с.ш. Съёмка выполнена прибором МСУ-102 26 октября 2009 года (номер витка 549)

Выводы

Определены углы ориентации осей внутренней системы координат в осях приборной системы координат, а также значения фокусного расстояния для каждого канала приборов МСУ-100М зав.№ 02, аналогичным образом были определены геометрические параметры приборов МСУ-100М зав.№ 01 и МСУ-50М зав.№01, 02.

Точность определения направления на изображение объекта в приборной системе координат камеры по отсчетам ПЗС линейки определяется на уровне среднеквадратической ошибки $7-18$ угловых секунд для приборов МСУ-100М, что соответствует $0.5-1.2$ элемента разрешения. При этом для приборов МСУ-100М при учете параметров фотограмметрической дисторсии точность калибровки практически не меняется за счет достаточно узкого угла поля зрения (30°).

Точность определения направления на изображение объекта в приборной системе координат камеры по отсчетам ПЗС линейки определяется на уровне среднеквадратиче-

ской ошибки от 35 до 50 угловых секунд для приборов МСУ-50М, что соответствует 1.2-1.7 элементам разрешения. При этом для приборов МСУ-50М при учете параметров фотограмметрической дисторсии существенно повышается точность калибровки.

Определены параметры геометрической калибровки с использованием данных прибора звездной ориентации, системы спутниковой навигации, а также таблицы координат опорных точек и измерений их координат на сканерном изображении.

Получено трансформированное спектрально-зональное изображение с уточненными параметрами геометрической калибровки, которое может быть использовано в широком спектре прикладных задач ГИС, создания топографических карт, оценки последствий аварий, стихийных бедствий, мониторинга окружающей среды и других задач ДЗЗ.

Geometrical Calibration of the MSU-100M and MSU-50M Multispectral Imagers

T. Kondratieva, A. Nikitin, I. Polyanskiy

*Space Research Institute RAS
117997 Russia, Moscow, 84/32 Profsoyuznaya str.
E-mails: andvnik935@yandex.ru*

The problems of determining the geometrical parameters of MSU multispectral imagers are considered. Those parameters are used in transforming the scanner image to the specified map projection, as well as to bind spectral channels and build a multispectral image. Both on-ground and in-flight parts of the calibration procedure are presented.

Keywords: Meteor-M, MSU (multispectral imagers), BOKZ-M (star tracker), ASN-M-M (autonomous navigation system), geometrical calibration, focal length, multispectral images, geocoding.