

Полетная и наземная геометрическая калибровка многозональных сканирующих устройств МСУ-100 и МСУ-50

А.В. Никитин, Б.С. Дунаев, Т.В. Кондратьева, И.В. Полянский

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

В работе рассматриваются наземная и полетная калибровка многозональных сканирующих устройств МСУ, заключающаяся в определении элементов внутреннего ориентирования камер МСУ, в которых в качестве приемников излучения используются линейные ПЗС. Приведены результаты трансформировании полученных сканерных изображений в заданную картографическую проекцию координатной привязки изображений, сведения спектральных каналов и построения спектрональных изображений.

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

Введение

В настоящее время широкое использование получают многозональные сканирующие съемочные системы, на линейных ПЗС-детекторах, которые производят съемку за счет собственного движения КА по орбите. Это происходит главным образом путем достижения приемлемого соотношения угол поля зрения – пространственное разрешение. В оптико-физическом отделе ИКИ РАН совместно с АНО «Космос-НТ» разрабатываются и изготавливаются многозональные сканирующие устройства – камеры МСУ, которые входят в состав Комплекса многозональной спутниковой съемки (КМСС) и предназначены для съемок земной и водной поверхности с метеорологических и природно-ресурсных КА. На КА дистанционного зондирования Земли из космоса «Метеор-М» №1, запуск которого состоялся в сентябре 2009 года, КМСС успешно функционирует больше года. На КА «Метеор-М» №1 в состав КМСС входят устройства МСУ-100 (МСУ-100 №1 и МСУ-100 №2) и МСУ-50 с разрешением по поверхности Земли 50м и 100м, соответственно. С целью обеспечения географической координатной привязки получаемых с КМСС изображений используются данные 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. Для успешного применения навигационных данных при координатной привязке необходимо иметь представление о геометрических параметрах оптической системы съемочной камеры (фокусное расстояние, углы наклона, дисторсия). В работе рассмотрены вопросы определения геометрических параметров (элементов внутреннего и внешнего ориентирования) камер МСУ, которые используются при трансформировании сканерных изображений в заданную картографическую проекцию, их географической координатной привязки, совмещения спектральных каналов и синтеза многоканальных спектрональных изображений. При использовании данных геометрической калибровки достигнуты параметры по точности географической координатной привязки

в несколько элементов разрешения и по точности совмещения спектральных каналов в десятье доли элемента разрешения. В работе рассматривается геометрическая калибровка камер МСУ, проведенная в лабораторных условиях, а также в условиях полета КА.

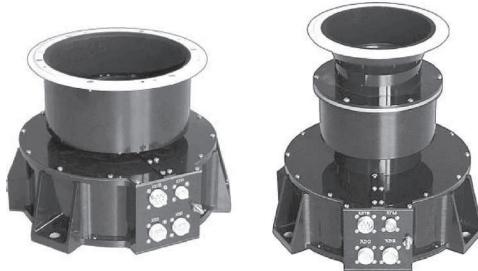


Рис. 1. Сканирующие устройства MCY-50 (а), MCY-100 (б)

1. Сканирующие системы МСУ, используемые для аэрокосмической съемки подстилающей поверхности

Для проведения спектрональной аэрокосмической съемки подстилающей поверхности в ИКИ РАН разрабатываются и изготавливаются многозональные сканирующие устройства (МСУ), использующие в качестве приемника излучения линейные ПЗС. Основным достоинством МСУ является высокое разрешение и достаточно широкий угол поля зрения: 30° для камеры MCY-100 (фокусное расстояние объектива 100 мм) и 60° для камеры MCY-50 (фокусное расстояние объектива 50 мм).

Многозональное устройство MCY-100 предназначено для исследования поверхности суши и обладает следующими характеристиками: пространственное разрешение 60 м, спектральные каналы 0,535...0,575; 0,630...0,680; 0,760...0,900 мкм, длина строки сканерного изображения (линейки) 7926 элементов по 7 мкм.

Многозональное устройство MCY-50 используется для исследования океана и имеет пространственное разрешение 120 м, спектральные каналы 0,370...0,450; 0,450...0,510; 0,580...0,690 мкм, длина строки изображения 7926 элементов по 7 мкм.

На рис. 2 приведено функциональное размещение камер МСУ в приемо-передающем контуре получения изображения ДЗЗ на КА «Метеор-М». Видеоинформация с МСУ передается в БИС-М (Бортовая информационная система), куда одновременно поступают навигационные данные с комплекса приборов ККВО (комплекс координатно-временного обеспечения).

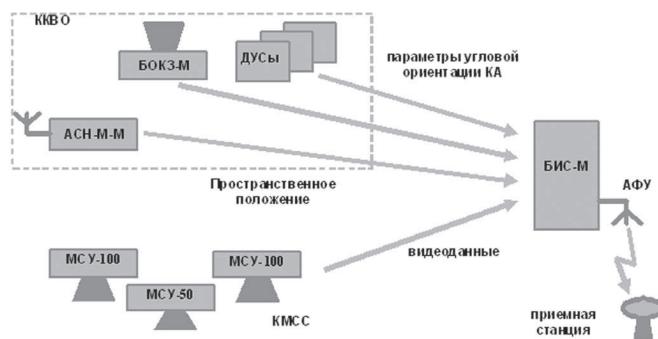


Рис. 2. Схема функционирования ККВО для обеспечения географической координатной привязки видеоданных КМСС

Комплекс координатно-временного обеспечения (ККВО) КА «Метеор-М» состоит из трех приборов: системы спутниковой навигации (АСН-М-М) – рис. 3, прибора звездной ориентации (БОКЗ-М) – рис. 4 и датчиков угловой скорости (ДУС).

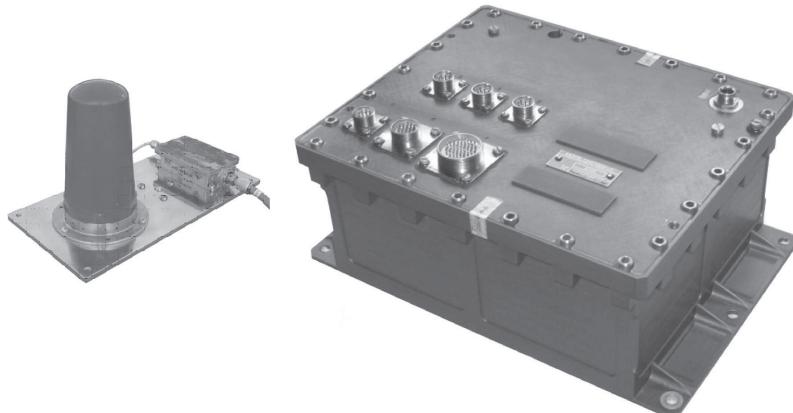


Рис. 3. Система спутниковой навигации АСН-М-М



Рис. 4. Прибор звездной ориентации БОКЗ-М

Система АСН-М-М предназначена для определения геоцентрических координат в гринвичской географической системе координат с точностью 15 м и привязки ко 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.

Прибор БОКЗ-М предназначен для определения углового положения осей приборной системы координат относительно второй экваториальной системе координат и обладает следующими характеристиками: интервал между измерениями 3 с, матрица 512x512 элементов, звездный каталог 8500 звезд до 7,5 mv, угол поля зрения 8°, точность по углам вращения вокруг осей X, Y 1,5 угл.с. и Z 15 угл.с.

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. Определение элементов внутреннего ориентирования камер МСУ

Геометрическая калибровка предназначена для определения элементов внутреннего ориентирования, используемых при фотограмметрической обработке изображений, полученных многозональным сканирующим устройством МСУ (рис. 5). Элементами внутреннего ориентирования камеры являются: фокусное расстояние, три угла ориентации внутренней системы координат (ВСК) ПЗС-линейки относительно приборной системы координат. Приборная система координат определяется посадочной плоскостью прибора и направлением классный паз – классное отверстие. По элементам внутреннего ориентирования можно определить направляющие косинусы в приборной системе координат. Несовпадение внутренней и приборной системы координат составляет несколько десятков угловых минут. Для камеры МСУ-50, вследствие особенностей конструкции объектива и широкого угла поля зрения (60°) с целью достижения точности калибровки на уровне пикселя ПЗС-линейки, используются параметры дисторсии, описывающие поле искажений объектива.

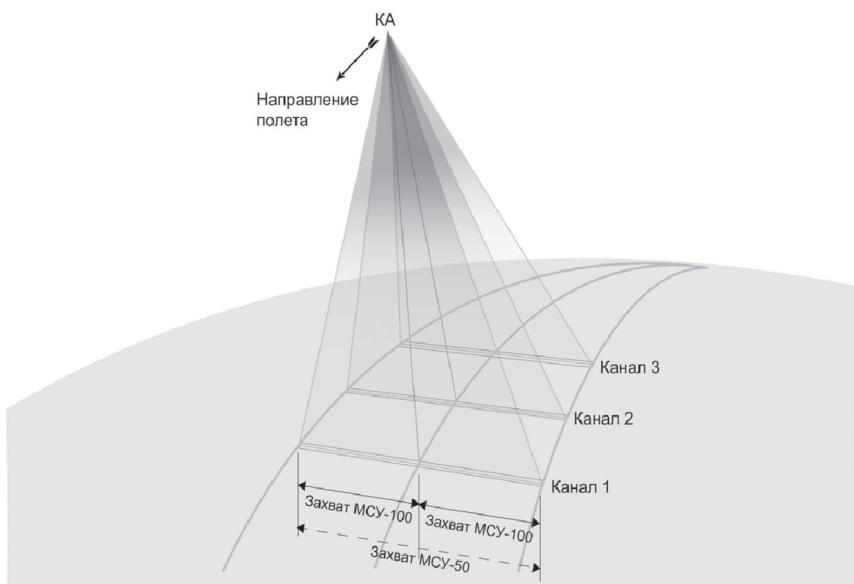


Рис. 5. Схема получения изображений камерами МСУ-100 и МСУ-50

2.1. Определение элементов внутреннего ориентирования камер МСУ на лабораторном стенде

При наземной калибровки камер МСУ использовался лабораторный измерительный стенд (рис.6). Обработка данных измерений геометрической калибровки камер МСУ, проведенной на стенде, выполнялась для каждого изображения мишени, проектируемого в объектив (рис.7-9). По нескольким строкам мишени определялся ее энергетический центр по формуле:

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

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

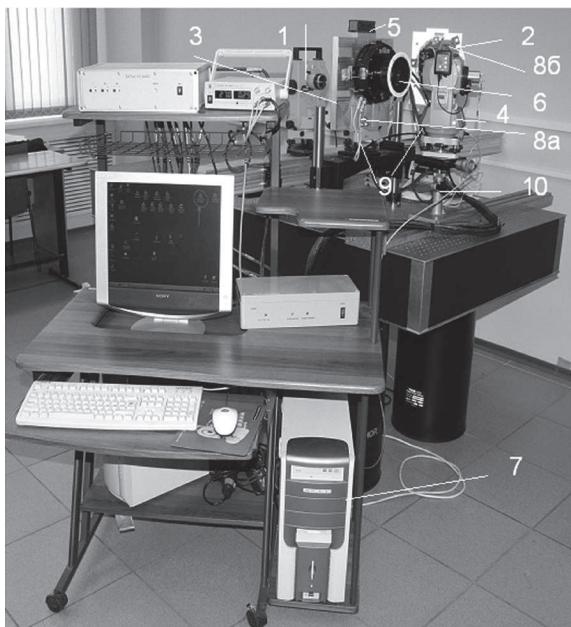


Рис. 6. Стенд наземной геометрической калибровки камер МСУ: 1-контрольный теодолит, 2-базовое зеркало, 3-контрольное зеркало, 4-измерительный теодолит, 5-цилиндрический уровень, 6-камера МСУ, 7-контрольно-измерительная аппаратура МСУ, 8-два имитатора посадочного места МСУ, 9-два трегера, 10-система горизонтальных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

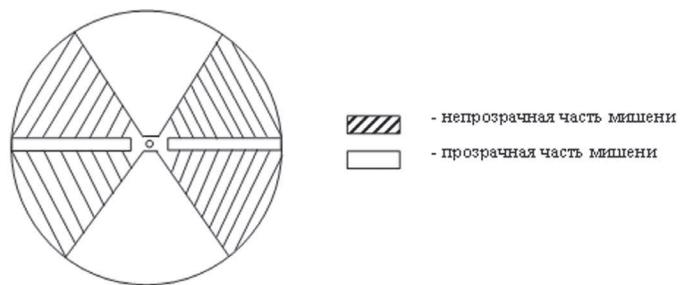


Рис. 7. Форма проектируемой мишени



Рис. 8. Изображение проектируемой мишени

По номеру измерения 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 и решена 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:

$$l_{\text{ПСК}} = \sin \alpha \cdot \cos \beta$$

$$m_{\text{ПСК}} = -\sin \beta ,$$

$$n_{\text{ПСК}} = -\cos \alpha \cdot \cos \beta$$

$$\operatorname{tg} \alpha_x^{\text{выч}} = \frac{a_{11}x - a_{13}f}{a_{31}x - a_{33}f}, \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_x^{\text{узм}} = \frac{l_{\text{ПСК}}}{n_{\text{ПСК}}}, \operatorname{tg} \alpha_y^{\text{узм}} = \frac{m_{\text{ПСК}}}{n_{\text{ПСК}}},$$

где α – горизонтальный угол теодолита; β – вертикальный угол теодолита; $l_{\text{ПСК}}$, $m_{\text{ПСК}}$, $n_{\text{ПСК}}$ – 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 XZ ПСК; α_y – угол направления на центр мишени в плоскости YZ ПСК.

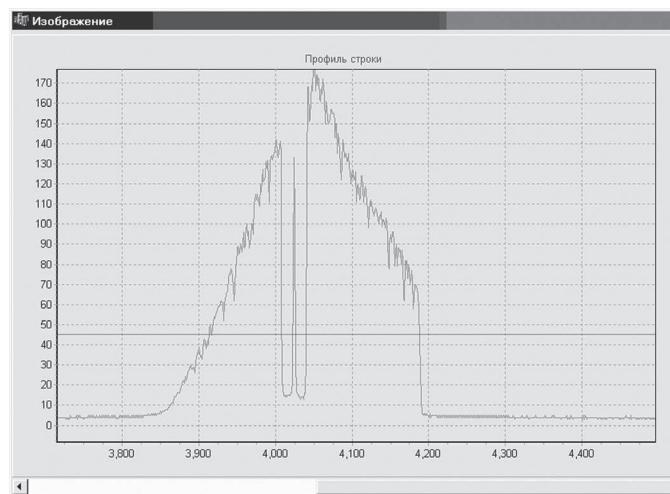


Рис. 9. Фрагмент профиля первой строки изображения мишени

Направление на центр изображения мишени зарегистрированное ПЗС-линейкой, сравнивалось с направлением зафиксированном на теодолите, с помощью номинальных матриц перехода от ВСК к ПСК и фокусному расстоянию канала (см. рис.10). Разница компенсировалась за счет определения поправок, вводимых в искомые параметры по способу наименьших квадратов методом последовательных приближений:

$$\begin{aligned} F_x &= \operatorname{tg} \alpha_x^{\text{выч}} - \operatorname{tg} \alpha_x^{\text{узм}}, \\ F_y &= \operatorname{tg} \alpha_y^{\text{выч}} - \operatorname{tg} \alpha_y^{\text{узм}}. \end{aligned} \quad (3)$$

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

Данный алгоритм вследствие 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:

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

где k_{xj} – коэффициенты полинома, описывающего поправку за дисторсию по оси X; k_{yj} – коэффициенты полинома, описывающего поправку за дисторсию по оси Y; Vx , Vy – остаточная разность вычисленных и измеренных углов после уравнивания; F_{dx}, F_{dy} – неявные функции, уравнивающиеся по коэффициентам полинома, описывающего дисторсию.

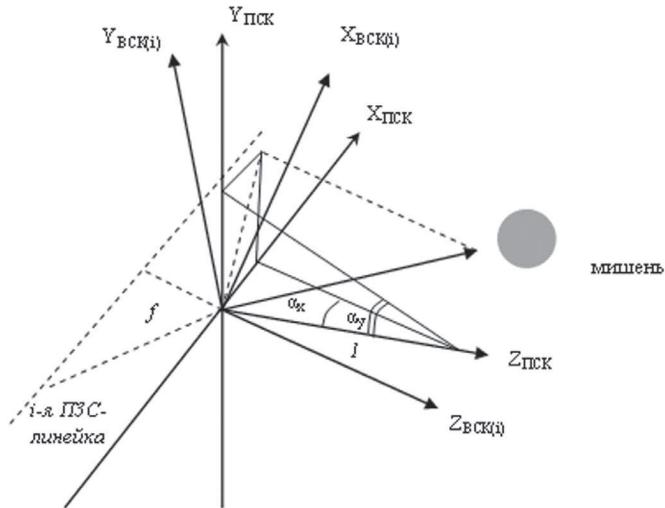


Рис.10. Расположение приборной и внутренней систем координат ПЗС-линейки i -го канала и направление на центр мишени

После определения геометрических параметров прибора были определены направления в ПСК для каждого элемента строки сканерного изображения по следующим формулам (при этом x изменялось в зависимости от номера элемента линейки ПЗС в диапазоне от -27,741 до 27,741 мм с шагом равным размеру элемента изображения -0,007 мм):

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

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. Рассчитанные геометрические параметры были следующие: поворот вокруг оси $X_{\text{ПСК}}$ $-0,439^\circ$, вокруг оси $Y_{\text{ПСК}}$ $359,595^\circ$, поворот вокруг оси $Z_{\text{ПСК}}$ $1,462^\circ$, фокусное расстояние 99,96 мм. При этом точность калибровки, определяемая среднеквадратической ошибкой (с.к.о.), составила 3,9 мкм, с.к.о. определения угла поворота вокруг оси $X_r X=1,4$ угл.с., с.к.о. определения угла поворота вокруг оси $Y_r Y=1,5$ угл.с., с.к.о. определения угла поворота вокруг оси $Z_r Z=9,8$ угл.с. Распределение ошибки калибровки в зависимости от номера элемента представлено на рис. 11.

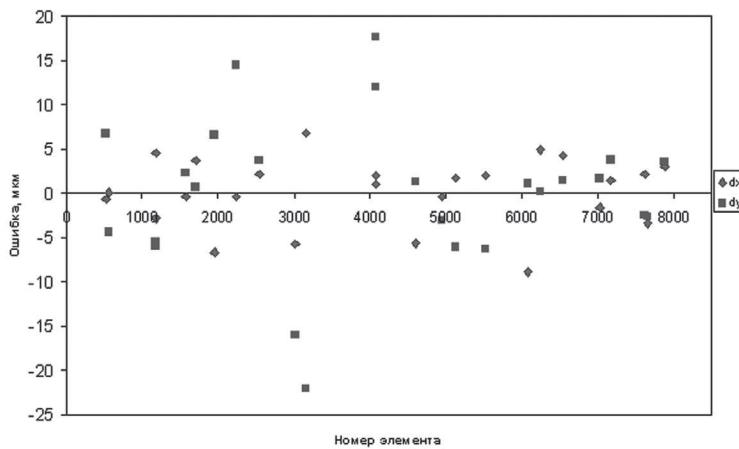


Рис.11. График зависимости ошибки определения направления центра мишени теодолита на элемент ПЗС-линейки от номера элемента. dx – ошибка вдоль линейки, dy – ошибка поперек линейки

2.2. Полетная калибровка камер МСУ

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 Н) 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 (6). В качестве параметра модели (7) 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:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{op} = \begin{pmatrix} (N+H)\cos\lambda\cos\varphi \\ (N+H)\sin\lambda\cos\varphi \\ (N(1-e^2)+H)\sin\varphi \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} X_{izm} &= X_s + (Z_{op} - Z_s) \frac{a_{11}x - a_{13}f}{a_{31}x - a_{33}f}, \\ Y_{izm} &= Y_s + (Z_{op} - Z_s) \frac{a_{21}x - a_{23}f}{a_{31}x - a_{33}f}. \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} F_x &= X_{op} - X_{izm}, \\ F_y &= Y_{op} - Y_{izm}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} A &= A' \cdot dA, \\ x &= p_0 + p_1 \cdot x' + p_2 \cdot x'^2 + p_3 \cdot x'^3 + p_4 \cdot x'^4 + p_5 \cdot x'^5, \end{aligned}$$

где X_s, Y_s, Z_s – координаты центра съемки в геоцентрической системе координат (СК) Земли, выбранные из навигационного файла по координате y (номеру строки); A – матрица перехода от истинной системы координат МСУ к гринвичской геоцентрической системе координат ($\alpha_{11}, \alpha_{12}, \dots, \alpha_{33}$ – элементы матрицы); x' – номер столбца изображения; x – номер столбца изображения, исправленного за дисторсию; X_{op}, Y_{op}, Z_{op} – координаты опорной точки в гринвичской геоцентрической системе координат; λ, φ, H – географические координаты опорной точки с картографических материалов, масштабом не мельче 1:100000; N – первый вертикаль эллипсоида WGS-84 на широте φ ; F_x F_y – неявные функции разности между опорными и измеренными по изображениям координатами точек земной поверхности; p_0, p_1, \dots, p_5 – коэффициенты полинома, описывающего дисторсию; dA – дополнительная матрица, задающая переход от номинальной СК координат МСУ к истинной; A' – матрица перехода от номинальной системы координат МСУ к гринвичской геоцентрической системе координат выбирается из навигационного файла по координате y (номеру строки).

Построенная система (8) 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 файлов геометрических параметров каналов, применяемых при трансформировании.

2.3. Результаты определения элементов внутреннего ориентирования камер МСУ и прибора БОКЗ-М на борту КА «Метеор-М»

В настоящее время приборы МСУ функционируют на борту КА «Метеор-М» № 1, запуск которого состоялся 18 сентября 2009 г. В процессе полета КА осуществлялась калибровка камер МСУ.

Съемка камерой МСУ-102, установленной на борту КА «Метеор-М», осуществлялась 5 сентября 2010 г. с 09:01:34 по 09:14:34 UTC на витке № 5012. В таблице 1 приведены координаты опорных точек (x , y) на сканерном изображении и соответствующие им географические координаты (ϕ , λ), используемые при калибровке среднего (второго) канала МСУ-102.

Таблица 1. Координаты опорных точек

№	x , пиксель	y , пиксель	ϕ , град.	λ , град.
1	4106	76908	560° 11' 40"	160° 23' 59"
2	2703	78065	550° 59' 57"	140° 50' 28"
3	2468	78167	550° 59' 46"	140° 36' 39"
4	1790	80101	550° 23' 12"	130° 35' 43"
5	958	80487	550° 21' 21"	120° 48' 53"
6	803	79462	550° 45' 03"	120° 54' 04"
7	301	81300	550° 08' 22"	120° 06' 39"
8	476	112702	430° 32' 25"	070° 07' 22"
9	539	112407	430° 38' 42"	070° 12' 05"
10	898	112036	430° 44' 54"	070° 29' 12"
11	1150	111896	430° 46' 31"	070° 40' 22"
12	1747	111257	430° 57' 08"	080° 09' 34"
13	1961	110581	440° 11' 06"	080° 24' 07"
14	3940	113150	430° 00' 28"	090° 25' 29"
15	3820	113932	420° 44' 02"	090° 13' 20"
16	3333	114451	420° 36' 01"	080° 48' 00"
17	3200	114836	420° 28' 12"	080° 39' 02"
18	3405	115783	420° 05' 53"	080° 39' 35"
19	3424	116393	410° 52' 25"	080° 35' 10"
20	3776	116754	410° 41' 58"	080° 46' 55"

В результате обработки съемочных данных, были получены следующие параметры канала съемки: угол поворота вокруг оси X МСУ 359.3988 град., угол поворота вокруг оси Y МСУ 359.2933 град., угол поворота вокруг оси Z МСУ 359.9219 град., фокусное расстояние 101.790 мм, результирующая среднеквадратическая ошибка единицы веса составила 99 угл.с.

Коэффициенты дисторсии:

```
kx[0]= 71.6350978626 ky[0]= -59.3181025606
kx[1]= -43.8066958895 ky[1]= 149.8845882490
kx[2]= -42.0966230597 ky[2]= 42.8062772165
kx[3]= -7.8068723809 ky[3]= 4.1205204420
kx[4]= -0.5879725014 ky[4]= 0.1533572048
kx[5]= -0.0198016964 ky[5]= 0.0014785279
kx[6]= -0.0002479155 ky[6]= -0.0000163649
```

Результатом обработки является синтезированное изображение (рис. 13). Точность сведения спектральных каналов и их географическая привязка определяется величиной среднеквадратической ошибки (с.к.о.) и составляет 99 угл.с.

Для полетной калибровки были выбраны изображения, полученные с трех витков:

прибор МСУ-101 – виток № 5012, прибор МСУ-102 – виток № 5012, прибор МСУ-50 – виток № 4955.

На калибровочном витке точности сведения каналов и географической привязки элементов совпадают и составляют 0,5-0,8 элемента разрешения.

Для контрольных витков были получены значения ошибок, представленные в таблице 2.

Таблица 2. Точныхные параметры трансформированных изображений приборов МСУ с использованием файлов геометрической калибровки и данных КМСС

Прибор	Точность географической привязки данных		Точность сведения спектральных каналов МСУ	
	Среднее значение ошибки, км (пиксел)	С.к.о., км (пиксел)	Среднее значение ошибки, км (пиксел)	С.к.о, км (пиксел)
МСУ -101	0.5 (9)	0.05 (0.7)	0.02 (0.35)	0.015 (0.26)
МСУ -102	0.6 (10)	0.06 (0.86)	0.038 (0.65)	0.01 (0.2)
МСУ -50	0.8 (15)	0.2 (3.27)	0.08 (0.7)	0.04 (0.34)

Ошибка географической привязки смешена вдоль направления полета, поэтому основным источником ошибок географической привязки изображений является неточность фиксации времени начала сеанса съемки телеметрической системой. Так, при точности фиксации 1 с ошибка географической привязки составляет 7,5 км. Характер ошибки фиксации времени начала сеанса съемки носит случайный характер. Предельная ошибка определения угловой ориентации прибором БОКЗ-М составляет 45 угл.с. или 175 м, что составляет 3,5 элемента разрешения прибора МСУ-50 или 1,7 элемента разрешения МСУ-100.

На рис.12-14 представлены синтезированные спектрозональные изображения, трансформированные в картографические проекции UTM, построенные с использованием результатов полетной калибровки камер МСУ-101, МСУ-102 (фокусное расстояние 100 мм), МСУ-50 (фокусное расстояние 50 мм). Высота съемки составляла 820 км. Обработка данных была выполнена с использованием данных комплекса координатно-временного обеспечения (ККВО), в состав которого входят прибор спутниковой навигации АСН-М-М и звездной ориентации БОКЗ-М.

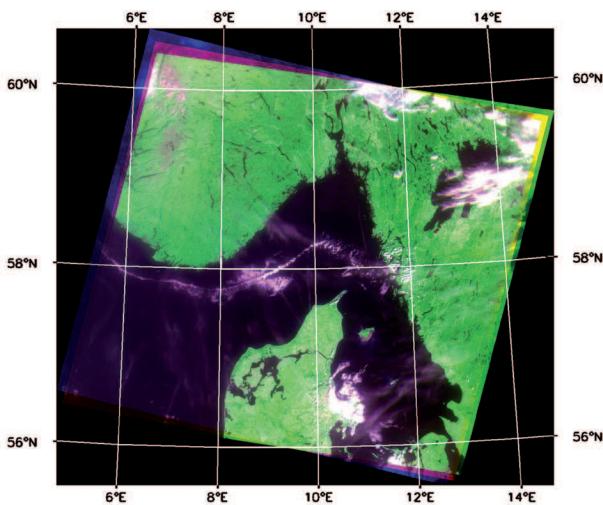


Рис. 12. Синтезированное спектрозональное изображение МСУ-101. Скандинавия, Северное море. Съемка выполнена 5 сентября 2010 г. (виток № 5012)

На рис.12 представлено синтезированное изображение с географическими координатами центра изображения: долгота 10^0 в.д., широта 58^0 с.ш. - Скандинавия, Северное море. Съемка выполнена прибором МСУ-101 5 сентября 2010 г. (виток № 5012). Разрешение изображения 500 м.

На рис.13 изображены Балтийское море, территория Германии и Польши, географические координаты центра изображения: долгота 15° в.д., широта 53° с.ш . Съемка выполнена прибором МСУ-102 5 сентября 2010 г. (виток № 5012). Разрешение изображения 500 м

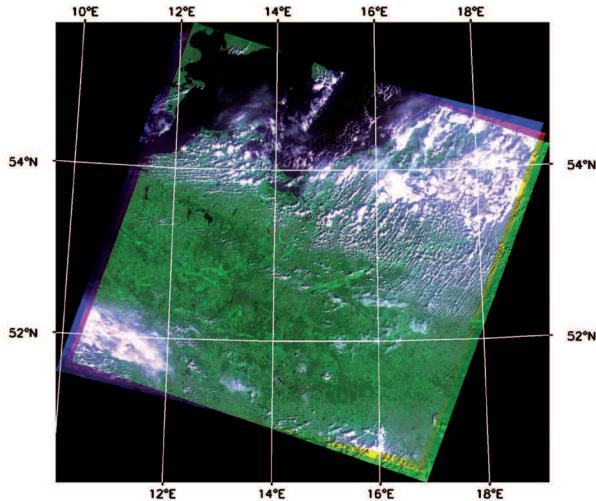


Рис. 13. Синтезированное спектрозональное изображение МСУ-102. Балтийское море, Германия, Польша. Съемка выполнена 5 сентября 2010 г. (виток № 5012)

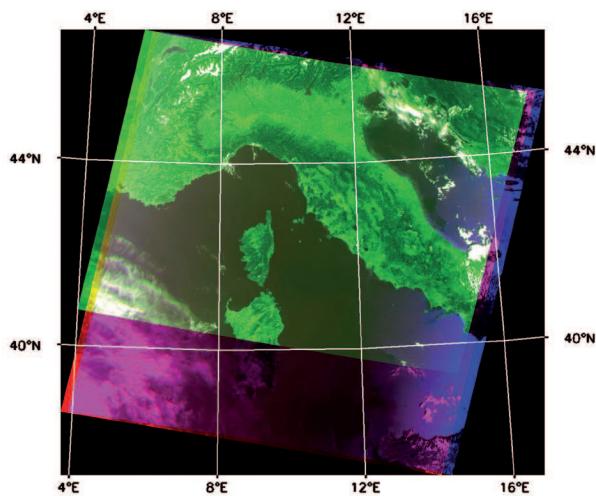


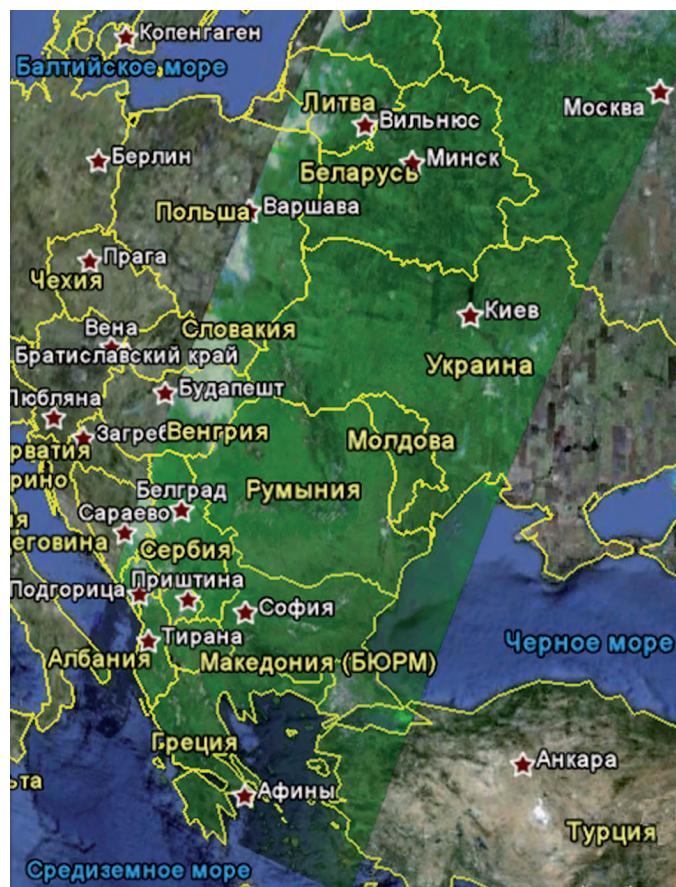
Рис.14. Синтезированное спектрозональное изображение МСУ-50. Средиземное море, Италия, Франция. Египет. Съемка выполнена 1 сентября 2010 г. (виток № 4955)

Результат съемки прибором МСУ-50 представлен на рис.14. Средиземное море, Италия, Франция, Египет. Географические координаты центра изображения: долгота 11° в.д., широта 42° с.ш. Съемка выполнена 1 сентября 2010 г. (виток № 4955). Разрешение изображения 1000 м.

На рис.15 представлен мозаика составленная из синтезированных спектрозональных изображений, выполненных приборами МСУ-101, МСУ-102 в течение сеанса связи НЦ ОМЗ 18 июля 2010г. (виток № 4315). Полоса охвата 950 км. На изображении представлены территории России и Восточной Европы. При этом после трансформирования видно, что контурная часть мозаичного изображения (элементы гидрографии, границы областей) совпадают с исходным изображением топографической основы (Google Earth). Величина сме-

щения обусловлена точностью полетной калибровки камер МСУ и рассинхронизацией времени опроса и привязки данных прибора звездной ориентации и составляет 1-2 элемента разрешения.

На рисунке 16 представлена фотокарта в проекции Меркатора с границами государств, областей и береговыми линиями, составленная по результатам съемок КМСС МСУ в период с октября 2009 по сентябрь 2010 г.



*Рис.15. Мозаика синтезированных спектрゾональных изображений (наложенная на основу Google Earth).
Съемка выполнена приборами МСУ-101, МСУ-102 в течение сеанса связи НЦ ОМЗ 18 июля 2010 г.
(виток № 4315)*

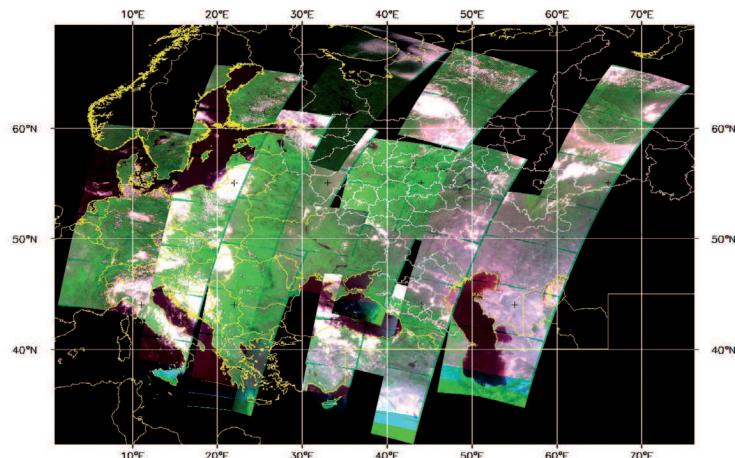


Рис.16. Мозаика синтезированных спектрゾональных изображений. Съемка выполнена приборами МСУ-101, 102 в период с октября 2009 по сентябрь 2010г.

Выводы

Наземная геометрическая калибровка многозональных сканирующих устройств МСУ-100 и МСУ-50, проводимая на лабораторном стенде, позволяет определять элементы внутреннего ориентирования камер МСУ: углы ориентации осей внутренней системы координат в осях приборной системы координат, значения фокусного расстояния для каждого канала камер с достаточно высокой точностью.

Точность определения направления на изображение объекта в приборной системе координат камеры МСУ-100 по отсчетам ПЗС-линейки определяется на уровне среднеквадратической ошибки 7...18 угл.с., что соответствует 0,5...1,2 элемента разрешения. При этом для приборов МСУ-100 при учете параметров фотограмметрической дисторсии точность калибровки практически не меняется из-за достаточно узкого угла поля зрения (30°). Точность определения направления на изображение объекта в приборной системе координат камеры МСУ-50 по отсчетам ПЗС-линейки определяется на уровне среднеквадратической ошибки от 35 до 50 угл.с., что соответствует 1,2...1,7 элементам разрешения. При этом для приборов МСУ-50 при учете параметров фотограмметрической дисторсии существенно повышается точность калибровки.

В ходе полетной калибровки были определены параметры геометрической калибровки камер с использованием данных прибора звездной ориентации, системы спутниковой навигации, а также таблицы координат опорных точек и измерений их координат на сканерном изображении.

Точность сведения спектральных каналов МСУ-100 и МСУ-50 определяется элементом разрешения, тогда как точность географической привязки составляет 0,5-0,8 км, что объясняется рассинхронизацией времени данных прибора астроориентации со временем запроса.

Полученные трансформированные спектральные изображения с уточненными параметрами геометрической калибровки могут быть использованы в широком спектре прикладных задач геоинформационных систем (ГИС), создания топографических карт, оценки последствий аварий и стихийных бедствий, мониторинга окружающей среды и др. задач ДЗЗ.

Determination of geometrical parameters multispectral scanners MSU on a laboratory bench and in the flight conditions «Meteor-M»

A. Nikitin, B. Dunaev, T. Kondratieva, I. Polyanskiy

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

The problems of calibration and determination 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 multispectral image. Both on-ground and in-flight parts of the calibration procedure are presented.

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