Комплекс многозональной спутниковой съёмки среднего разрешения для гидрометеорологических космических аппаратов

И.В. Полянский, Б.С. Жуков, Т.В. Кондратьева, С.А. Прохорова, П.С. Сметанин

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: ivpolyan@cosmos.ru

Комплекс многозональной спутниковой съёмки среднего пространственного разрешения КМСС-2 начал свою работу на борту космического аппарата (КА) «Метеор-М» № 2-2, запущенного в июле 2019 г. В его состав входят два многозональных съёмочных устройства МСУ-100ТМ с разрешением в надире 55 м и суммарной полосой обзора более 1000 км. Данная аппаратура имеет принципиальные конструктивные отличия от комплексов многозональной спутниковой съёмки КМСС и КМСС-М, работающих на орбите с 2009 и 2014 гг. на борту КА «Метеор-М» № 1 и 2. В частности, использована новая схема съёмки с пространственно совмещёнными оптическими осями спектральных каналов, применены новые линейные оптико-электронные датчики, которые позволили увеличить динамический диапазон регистрируемых яркостей и повысить отношение сигнал/шум, увеличено до 10 разрядов на канал количество градаций яркости цифрового сигнала, введено раздельное управление временем накопления, уровнем темнового тока и усилением в спектральных каналах. Все изменения проведены для повышения качества целевой информации при условии сохранения интерфейсов со служебной аппаратурой космического аппарата, линии передачи данных и логики управления. Получаемые изображения синхронизируются с измерениями положения и ориентации КА для обеспечения геопривязки видеоданных при наземной обработке.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, гидрометеорология, многозональная съёмка, «Метеор-М»

Одобрена к печати: 19.11.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-83-92

Введение

С космодрома «Восточный» 5 июля 2019 г. был успешно выведен на орбиту гидрометеорологический космический аппарат (КА) «Метеор-М» № 2-2, созданный в АО «Корпорация «ВНИИЭМ». В состав научной аппаратуры спутника входит Комплекс многозональной спутниковой съёмки среднего пространственного разрешения КМСС-2, разработанный и изготовленный в Институте космических исследований Российской академии наук. КМСС-2 предназначен для проведения оптико-электронной съёмки земной и водной поверхности в трёх спектральных зонах видимого и ближнего ИК-диапазонов спектра электромагнитных волн и разрабатывался для установки на КА серии «Метеор-М», начиная с № 2-1.

Уникальной особенностью аппаратуры КМСС-2 является сочетание достаточно высокого пространственного разрешения от 55 м и широчайшей полосы обзора более 1000 км при работе на круговой орбите высотой 830 км. Такие возможности продиктованы необходимостью ведения ежедневного оперативного космического мониторинга природных и техногенных процессов, происходящих на территории Российской Федерации, которая должна быть полностью отснята в течение трёх дней.

Целевая информация, получаемая на основе данных КМСС-2, предназначена для решения значительного количества научных, природоохранных и хозяйственных задач, а в сочетании с данными других приборов дистанционного зондирования представляет интерес также и для поддержки фундаментальных научных исследований.

Наземный сегмент приёма и обработки данных включает три региональных центра Росгидромета: Европейский, Сибирский и Дальневосточный, зоны видимости которых

обеспечивают полное покрытие территории России, а также 68 территориальных центров. Ведущими организациями, которые осуществляют оперативное управление, планирование космической съёмки, приём, обработку, каталогизацию и распространение космической информации, являются Научный центр оперативного мониторинга Земли (НЦОМЗ) АО «Российские космические системы» и Научно-исследовательский центр «Планета» Росгидромета.

Дизайн и основные характеристики КМСС-2

В своей конструкции приборы комплекса КМСС-2 имеют ряд принципиальных отличий и улучшений по сравнению с аналогичной по назначению аппаратурой КМСС, установленной на КА «Метеор-М» № 1 и 2, подробное описание которой приводится в работе (Аванесов и др., 2013). В первую очередь к наиболее значащим доработкам следует отнести:

- новую геометрическую схему съёмки с пространственно совмещёнными оптическими осями спектральных каналов;
- новые оптико-электронные датчики, которые позволили увеличить динамический диапазон регистрируемых яркостей и повысить отношение сигнал/шум;
- увеличенное до 10 разрядов на канал количество градаций яркости цифрового сигнала;
- раздельное управление параметрами регистрации изображений в спектральных каналах и др.

На *рис. 1* представлен внешний вид аппаратуры КМСС-2, смонтированной на установочный кронштейн, основные характеристики комплекса в целом и приборов МСУ-100ТМ приведены ниже.



Рис. 1. Внешний вид КМСС-2 в составе двух приборов МСУ-100ТМ

Основные характеристики КМСС-2

Орбита КА	солнечно-синхронная
Высота орбиты КА	820,7 км
Наклонение	
Эксцентриситет	
Число витков в сутках	
Количество приборов МСУ-100ТМ	
Формируемая полоса обзора	не менее 1000 км

Угол установки приборов МСУ-100ТМ относительно местной вертикали	±15,2°
Пространственное разрешение в надире	55 м
Радиометрическое разрешение (разрядность АЦП)	10 бит
Точность совмещения изображений спектральных каналов, элементов разрешения	. не более 0,5

Технические характеристики прибора МСУ-100ТМ

Фокусное расстояние объектива	
Относительное отверстие объектива	
Угловое поле зрения.	
Размер элемента ПЗС	
Число спектральных каналов	
Границы спектральных зон чувствительности (на уровне 0,5)	(0,520-0,590)±0,005 мкм
	(0,640-0,690)±0,005 мкм
	(0,785-0,900)±0,005 мкм
Длина строки изображения	7984 элементов
Число разрядов квантования	
Внешняя тактовая частота	
Частота строк.	125 Гц

Спектральные зоны чувствительности приборов MCУ-100TM (0,520–0,590; 0,640–0,690 и 0,785–0,900 мкм), представленные на *рис. 2*, выбраны исходя из целевой задачи исследования суши и достаточно хорошо коррелируют с соответствующими каналами радиометров ETM+ (Landsat-7), OLI (Landsat-8), MODIS (Terra), MSI (Sentinel-2), что позволяет проводить полётные кросс-калибровки и контролировать радиометрические свойства целевых данных.



Рис. 2. Относительная спектральная чувствительность каналов приборов МСУ-100TM (цифры у кривых обозначают номера спектральных каналов)

Геометрия съёмки

Принцип действия приборов MCУ-100TM основан на одновременной построчной регистрации оптического изображения подстилающей поверхности, которое линейно перемещается в фокальной плоскости объектива при движении КА по орбите. Регистрация производится с помощью трёх линейных датчиков ПЗС (прибор с зарядовой связью), установленных перпендикулярно вектору линейной скорости движения изображения. Каждый чувствительный элемент закрыт узкополосным интерференционным фильтром, пропускающим отражённое оптическое излучение только в заданной полосе длин волн. На *рис. 3* приведена геометрическая схема съёмки КМСС-2, поясняющая принцип формирования полосы изображения.



Рис. 3. Геометрическая схема съёмки КМСС-2 при движении КА

Два прибора МСУ-100TM устанавливаются на приборную платформу КА таким образом, что их оптические оси отклоняются от «вертикальной» оси космического аппарата на угол $\pm 15,2^{\circ}$ в плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты (*puc. 4*). В результате при заданной высоте орбиты 820,7 км расчётное значение для суммарной полосы обзора МСУ-100TM при проектировании на земной эллипсоид без учёта крена, рыскания и тангажа КА составит порядка 1020 км с перекрытием полос обзора двух приборов около 24 км. Размер проекции чувствительного элемента на земную поверхность для направления в надир составит около 55 м, вдоль проекции ЛПЗС (линейный прибор зарядовой связи) размер пикселя меняется от 55 до 80 м.



Рис. 4. Расчётная геометрическая схема съёмки КМСС-2 двумя приборами МСУ-100ТМ

Реальные значения базовых геометрических характеристик комплекса, естественно, отличаются от расчётных, поскольку фотограмметрические параметры оптических систем и установочные углы находятся в пределах конструкторских допусков. Измерения, проведённые в ходе лётных испытаний аппаратуры, подтвердили соответствие полученных значений базовых геометрических характеристик комплекса заданным требованиям (*puc. 5*, см. с. 87).



Рис. 5. Пример изображения полосы захвата КМСС-2

Конструкция приборов КМСС-2/МСУ-100ТМ

В состав КМСС-2 входят два идентичных многозональных съёмочных устройства МСУ-100ТМ, выполненных в виде отдельных конструктивных блоков, которые установлены на платформу КА на едином механическом кронштейне. Приборы являются автономными инструментами и при необходимости могут включаться и управляться раздельно. Структурная схема прибора МСУ-100ТМ представлена на *рис. 6*.



Рис. 6. Структурная схема прибора КМСС-2/МСУ-100ТМ

Схема съёмки, используемая в аппаратуре КМСС на КА «Метеор-М» № 1 и 2, с разнесёнными в пространстве проекциями чувствительных элементов обуславливает ряд технических сложностей в синтезе многозонального изображения (Аванесов и др., 2013), когда совместить изображения, получаемые тремя линейными ПЗС-приёмниками, можно лишь при условии достаточно точного знания параметров орбитального и углового движения КА на интервале съёмки. Для устранения данного недостатка была разработана принципиально новая схема построения прибора МСУ-100ТМ, позволяющая одновременно фиксировать изображение одной и той же области земной поверхности на трёх линейных ПЗС-приёмниках, в таком случае требования к математической постобработке изображений с целью их сведения значительно снижаются. Специально для данного прибора в АО «ЛОМО» была создана оптическая система ОС-125Т 2 (Завгородний и др., 2015), основные технические характеристики которой приведены ниже, а конструкция — на *рис.* 7.



Рис. 7. Конструкция ОС-125Т

Основные технические характеристики ОС-125Т

Фокусное расстояние объектива	125±0,5 мм
Рабочая дистанция до объекта	.бесконечность
Относительное отверстие объектива	1:4,3
Угловое поле зрения 2ω	
Длина датчика изображения (ЛПЗС)	72 мм
Рабочий спектральный диапазон ОС	0,4-0,95 мкм
Абсолютное пропускание ОС в любом из спектральных каналов	не менее 0,5
Значение функции передачи модуляции ОС по всему полю изображения в любой	
из спектральных полос на пространственной частоте (парных линий на миллиметр):	
35 пл/мм	не менее 0,7
70 пл/мм	не менее 0,35
Суммарная дисторсия ОС для полихроматического пучка	не более 0,1 мм
Разница значений суммарной дисторсии для различных длин волн,	
соответствующих центральным длинам волн спектральных каналов не прев	зышает 0,003 мм

Изображения наблюдаемых объектов в трёх спектральных каналах в приборах MCУ-100TM формируются оптической системой, состоящей из специализированного объектива и призменного спектроделителя. Световой поток от бесконечно удалённого объекта попадает на входную апертуру объектива, фокусируется в световой пучок и разделяется на три составляющие по спектральному признаку на дихроических зеркалах. Точное формирование зон пропускания и подавления обеспечивается полосовыми интерференционными фильтрами, установленными на выходных окнах спектроделителя (*puc. 8*, см. с. 89).



Рис. 8. Ход лучей в оптической системе прибора МСУ-100ТМ

Особенностью объектива является оптическая схема с телецентрическим ходом лучей в заднем отрезке, т.е. при входном угловом поле зрения $\pm 16^{\circ}$ выходные пучки падают на фокальную плоскость под постоянным углом 90°. Благодаря тому, что угол падения пучков света постоянен по всей фокальной плоскости, интерференционные покрытия работают одинаково для всего углового поля зрения объектива.

В качестве преобразователей оптического сигнала в электрический в MCУ-100TM используются ЛПЗС типа KLI-8023, разработанные компанией Kodak (США), которые установлены на выходных окнах спектроделителя оптической системы. Уникальной особенностью данных сенсоров является большая потенциальная яма, позволяющая обеспечить динамический диапазон регистрируемых яркостей до 82 дБ.

В каждом из корпусов ЛПЗС спектральных каналов установлены три идентичных монохромных линейки фотодиодов, которые используются для обеспечения резервирования. Переключение линеек, управление и их настройка обеспечиваются независимо.

Характеристики ЛПЗС КLI8023 приведены ниже.

Основные технические характеристики ЛПЗСКLI8023

Общее число элементов	
Используемое число элементов в строке изображения	
Размер элемента	9×9 мкм
Потенциальная яма	180 000 e ⁻
Чувствительность (450/550/650/830 нм)	5/20/22/15 В/мкДж·см ²
Напряжение насыщения	2,5 B
Динамический диапазон	до 82 дБ
Тип корпуса	керамический

Электрический сигнал активной линейки ПЗС усиливается и преобразуется в цифровой платой видеотракта. Плата процессора осуществляет управление работой всего прибора и коммутацию цифровых потоков, а модуль интерфейсов — формирование передаваемых сигналов, а также приём команд и управляющих последовательностей от внешних систем КА. Модуль вторичного источника питания обеспечивает электропитанием все узлы прибора.

Подключение КМСС-2 к бортовой аппаратуре КА

Два многозональных съёмочных устройства MCУ-100TM, входящие в состав KMCC-2, являются автономными и независимыми приборами с точки зрения коммутации питания, управления, телеметрирования и получения целевой информации. При установке KMCC-2 на борт KA приборы подключаются к бортовой аппаратуре в соответствии со схемой, приведённой на *puc. 9*.



Рис. 9. Схема подключения КМСС-2 к аппаратуре КА

На схеме обозначены:

- БКА КА бортовой коммутационный автомат КА, от которого поступает коммутируемое первичное питание +27 В;
- БАТИ КА бортовая аппаратура телеметрических измерений, на которую передают-ся данные температурных датчиков;
- КСО КА (КШ) компьютер системы ориентации, выполняющий функции контроллера шины (КШ) магистрального последовательного интерфейса и осуществляющий командный информационный обмен с приборами;
- ФЦП-СМ формирователь цифрового потока сантиметровой радиолинии из состава бортовой информационной системы (БИС-М), осуществляющий приём цифрового потока видеоданных и формирование задающих тактовой и строчной частот;
- БСКВУ-М бортовое синхронизирующее координатно-временное устройство, формирующее опорную секундную метку для привязки измерений, код бортового времени, а также данные об ориентации и местоположении КА.

Принцип обеспечения временной и координатной привязки видеоданных КМСС-2

Поскольку принцип формирования изображения в аппаратуре КМСС-2 основан на последовательной регистрации строк полосы изображения, для восстановления связанной геометрии и географической привязки выходного изображения при наземной обработке необходимо знать следующие параметры:

• время момента регистрации строки;

- географические координаты центра масс КА в момент регистрации строки;
- ориентацию строительных осей КА в момент регистрации строки;
- ориентацию приборной системы координат МСУ-100ТМ в собственной системе координат КА.

Формирование вышеприведённой информации на борту КА производится в бортовом синхронизирующем координатно-временном устройстве (БСКВУ-М), в состав которого входит:

- аппаратура формирования бортового времени и опорной сетки синхрочастот;
- аппаратура спутниковой навигации ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система) и GPS (Global Positioning System система глобального позиционирования);
- три блока определения координат звёзд БОКЗ-2М.

Время регистрации каждой строки определяется двумя составляющими: ежесекундным цифровым кодом мирового времени, передаваемым от БСКВУ-М, и дробной частью, формируемой встроенным цифровым таймером с ценой единицы младшего разряда 25 мкс. Оба кода записываются в служебной части каждой строки и используются для синхронизации с данными определений местоположения и ориентации КА, которые совместно с известными параметрами внутреннего и внешнего ориентирования позволяют рассчитать координаты направляющих векторов для привязки целевой информации к географической системе координат.

Заключение

Комплекс многозональной спутниковой съёмки среднего пространственного разрешения КМСС-2 начал свою работу на борту КА «Метеор-М» № 2-2, запущенного в июле 2019 г., и в настоящее время проходит этап лётных испытаний. Принципиальные конструктивные отличия от аналогичной аппаратуры предыдущих поколений позволяют повысить качество целевой информации при условии сохранения интерфейсов со служебной аппаратурой космического аппарата, линии передачи данных и логики управления. В частности, в комплексе применена новая схема съёмки и уникальная оптическая система с пространственно совмещёнными оптическими осями спектральных каналов, новые линейные оптико-электронные датчики с увеличенным динамическим диапазоном, 10-разрядное кодирование градаций яркости цифрового сигнала и др. Получаемые изображения синхронизируются с высокоточными измерениями положения и ориентации КА для обеспечения геопривязки видеоданных при наземной обработке. Реализованные конструктивные улучшения должны поставить аппаратуру КМСС-2 в один ряд с широко используемыми зарубежными источниками космических данных дистанционного зондирования.

Литература

- 1. *Аванесов Г.А., Полянский И.В., Жуков Б.С., Никитин А.В., Форш А.А.* Комплекс многозональной спутниковой съёмки на борту КА «Метеор-М» № 1: три года на орбите // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 2. С. 74–83.
- Завгородний Д. С., Сокольский М. Н., Трегуб В. П., Полянский И. В. Оптические системы малогабаритных сканеров дистанционного зондирования Земли для космических аппаратов «Метеор-М» // 4-я Всероссийская научно-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов»: сб. тр. Таруса, 8–11 сент. 2014. М.: ИКИ РАН, 2015. С. 269–275.

Medium-resolution multispectral satellite imaging system for hygrometeorological spacecraft

I. V. Polyanskiy, B. S. Zhukov, T. V. Kondratieva, S. A. Prokhorova, P. S. Smetanin

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: ivpolyan@cosmos.ru

Medium-resolution multispectral satellite imaging system KMSS-2 started operations on board Meteor-M No. 2-2 spacecraft that was launched in July 2019. The system consists of two identical imagers MSU-100TM with three spectral channels at 0.55, 0.65, 0.85 mkm central wavelengths, 55 m ground sample distance at nadir and common swath of more than 1000 km. KMSS-2 has principal improvements to the previous instruments of KMSS series operating in orbit since 2009 onboard Meteor-M No. 1/2 meteorological satellites. Among the improvements are: optical alignment of the spectral channels, new linear charge coupled detectors with enhanced dynamic range and higher signal-to-noise ratio, 10 bit per channel signal quantization, individual integration time, dark current level and gain selection for each channel. The purpose of the improvements was to enhance data quality with the same instrument-to-spacecraft interfaces, data transmission channel and control logics proven by previous system operation. Imaging data are synchronized with spacecraft position and attitude measurements to allow image georeferencing during the ground processing procedures.

Keywords: remote sensing of the Earth, hydrometeorology, multispectral imaging, Meteor-M

Accepted: 19.11.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-83-92

References

- 1. Avanesov G.A., Polyanskiy I.V., Zhukov B.S., Nikitin A.V., Forsh A.A., Kompleks mnogozonal'noi sputnikovoi s"emki na bortu KA "Meteor-M" No. 1: tri goda na orbite (Multispectral Satellite Imaging System aboard the Meteor-M No. 1 spacecraft: Three years in orbit), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 2, pp. 74–83.
- Zavgorodnii D. S., Sokolskii M. N., Tregub V. P., Polyanskiy I. V., Opticheskie sistemy malogabaritnykh skanerov distantsionnogo zondirovaniya Zemli dlya kosmicheskikh apparatov "Meteor-M" (Multispectral satellite imaging systems on-board Meteor-M satellite), *Sovremennye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskih apparatov* (Contemporary problems of spacecraft attitude determination and control), Proc. 4th All-Russia Scientific and Technological Conf., Tarusa, 8–11 Sept. 2014, Moscow: IKI RAN, 2015., pp. 269–275.