

Г. Н. МАЛЬЦЕВ, В. В. КУНГУРЦЕВ, И. А. КОЗИНОВ

**ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ
НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ
МНОГОСПЕКТРАЛЬНОГО НАБЛЮДЕНИЯ**

Рассмотрены принципы построения перспективной системы на основе малых космических аппаратов многоспектрального наблюдения. Особенностью системы является кластерное орбитальное построение, расширяющее ее функциональные возможности при решении задач дистанционного зондирования Земли. Приведены характеристики бортовой многоспектральной аппаратуры наблюдения малых космических аппаратов.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, малые космические аппараты, многоспектральное наблюдение, кластер.

Применение малых космических аппаратов (МКА) и космических систем на их основе является в настоящее время одной из ведущих тенденций развития космических технологий [1, 2]. Ряд успешных экспериментов с МКА показал эффективность решения с их помощью широкого спектра прикладных задач. Можно утверждать, что к настоящему времени сложились условия для создания и развертывания полнофункциональных космических систем на основе орбитальных группировок МКА, в которых потенциальные возможности и преимущества МКА будут реализованы в полной мере. При этом перспективные МКА и космические системы рассматриваются не как альтернатива существующим системам на основе средних и тяжелых космических аппаратов, а как дополнение, существенно расширяющее возможности решения прикладных (целевых) задач в различных сферах деятельности.

Одной из основных областей применения МКА является дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) [2, 3]. При решении задач ДЗЗ МКА, оборудованные малогабаритными бортовыми оптико-электронными системами (ОЭС) для съемки Земли, могут быть конкурентоспособными, рентабельными и представлять интерес для широкого класса потребителей космической информации. В настоящее время благодаря прогрессу в развитии бортовой многоспектральной аппаратуры наблюдения, работающей в оптическом и ИК-диапазонах, отмечается повышенный интерес к этому направлению разработок МКА. В мире на различных стадиях разработки и реализации находится несколько десятков программ ДЗЗ из космоса с помощью бортовых многоспектральных ОЭС. Использование современных технологий при реализации элементов бортовой специальной и обеспечивающей аппаратуры МКА и их унификация позволяют в несколько раз сократить сроки разработки и снизить финансовые расходы на реализацию космических проектов.

С помощью новых технологий постоянно совершенствуются характеристики бортовой аппаратуры космических аппаратов. Это дает основание прогнозировать, что в ближайшей перспективе создание космических систем ДЗЗ, интегрированных для оперативной передачи данных наблюдения со спутниковыми телекоммуникационными сетями, станет одним из наиболее приоритетных направлений развития космической техники.

Разрабатываемые в настоящее время бортовые многоспектральные ОЭС характеризуются высокой информативностью в сочетании с небольшими габаритами, массой и энергопотреблением, что хорошо согласуется с требованиями к полезной нагрузке МКА. Так, облегченный космический телескоп диаметром 1 м имеет массу главного зеркала около 300 кг, а 20-канальная многоспектральная ОЭС с телескопом диаметром 5—7 см, размещенная на универсальной малогабаритной космической платформе, вместе с обеспечивающей аппаратурой

имеет массу 25—40 кг. При этом полагается, что масса МКА составляет до нескольких сотен килограммов, что по зарубежной классификации соответствует микро-КА (масса 10—100 кг) и мини-КА (масса 100—500 кг).

В настоящей работе рассматриваются системные вопросы построения перспективной космической системы ДЗЗ на основе МКА многоспектрального наблюдения. В такой системе, с одной стороны, используются сложившиеся общие принципы построения космических систем и организации управления космическими аппаратами, с другой — учитываются особенности применения орбитальных группировок (ОГ) МКА и используются новые подходы к управлению ими. В частности, предполагается, что ОГ МКА многоспектрального наблюдения представляет собой кластер — совокупность нескольких МКА на орбитах со специально выбранными (как правило, близкими) параметрами, совместно и согласованно выполняющих съемку земной поверхности. Выбор параметров орбит МКА выбирается исходя из условий обзора интересующих районов земной поверхности, при этом особый интерес представляют полярные и околополярные орбиты, позволяющие осуществлять глобальный обзор земной поверхности на всех широтах.

В общем случае кластер можно определить как высокоуровневое объединение однотипных элементов, позволяющее повысить надежность, производительность и эффективность функционирования групповых систем путем динамического распределения задач. Применение кластера МКА наблюдения при соответствующем выборе его структуры (орбитального построения) позволяет:

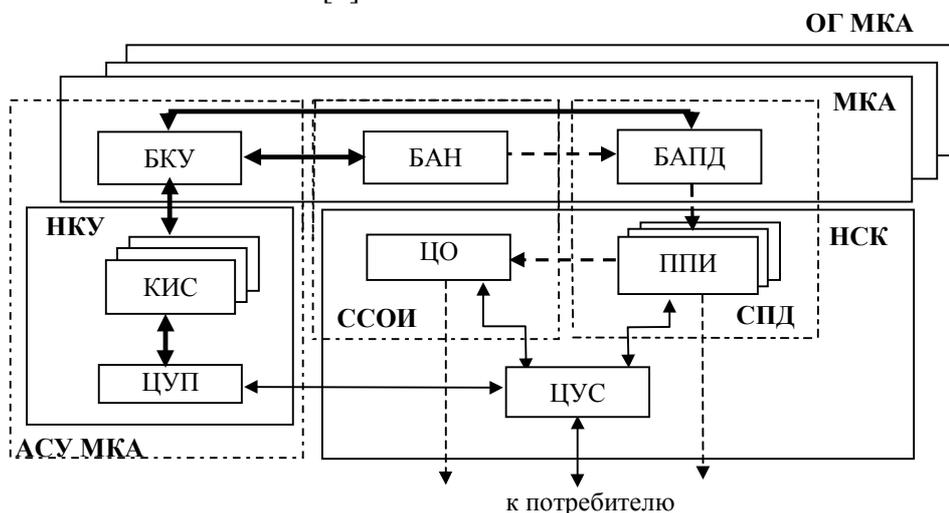
- увеличить мгновенную полосу обзора при съемке земной поверхности бортовыми ОЭС наблюдения нескольких МКА;
- использовать при решении задач ДЗЗ системные возможности кластерного построения орбитальной группировки МКА;
- формировать орбитальную группировку с помощью совместного выведения МКА, образующих кластер;
- реализовать перспективные технологии управления орбитальной группировкой космической системы.

На рисунке представлена функциональная схема космической системы ДЗЗ на основе МКА. В ней можно выделить наземный и космический сегменты, а также три функциональные подсистемы — автоматизированную систему управления космическими аппаратами (АСУ МКА), систему сбора и обработки информации (ССОИ) и систему передачи данных (СПД). Космический сегмент системы образует орбитальная группировка (ОГ) в виде кластера МКА, а наземный сегмент — средства наземного комплекса управления (НКУ) и наземного специального комплекса (НСК). Управление всеми элементами осуществляет Центр управления системой (ЦУС). На схеме не указаны средства технического и стартового комплексов, обеспечивающих подготовку к запуску и выведение МКА на орбиту, и рассматриваемые в настоящее время как комплекс средств по оказанию пусковых услуг.

АСУ МКА осуществляет управление МКА в соответствии с программами их полета и тем самым обеспечивает целевое применение ОГ МКА, а ССОИ и СПД непосредственно выполняют целевую функцию космической системы, осуществляя сбор информации ДЗЗ, ее передачу на Землю и обработку в интересах потребителей. Пунктирными стрелками на рисунке обозначены каналы передачи информации ДЗЗ, жирными стрелками — передача информации управления МКА, светлыми стрелками — информационное взаимодействие ЦУС с элементами наземного сегмента системы.

Разделение функций управления космическими аппаратами и их целевого применения является одним из общих принципов построения отечественных космических систем ДЗЗ [4, 5]. В данном случае этот принцип сохраняется с учетом того, что он используется при разработке перспективных космических платформ, в том числе малогабаритных, и позволяет

унифицировать средства АСУ МКА. При этом в качестве НКУ могут использоваться средства существующего Наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ) МКА или средства специализированного НКУ данной космической системы. В первом случае ОГ системы передается на управление НАКУ, а во втором — космическая система функционирует самостоятельно, а ЦУС и Центр управления полетом (ЦУП) могут представлять единый центральный терминал управления системой, реализованный в современных низкоорбитальных многоспутниковых системах связи [6].



АСУ МКА представляет собой совокупность функционально взаимосвязанных по линиям связи и радиоканалам наземных и бортовых средств, предназначенных для управления МКА космической системы. Все наземные средства АСУ МКА объединяются в НКУ, а бортовые средства представлены на каждом МКА его бортовым комплексом управления (БКУ). В составе НКУ — ЦУП и радиоэлектронные средства управления космическими аппаратами — командно-измерительные системы (КИС). Управление МКА понимается, в широком смысле слова, как совокупность операций оценки состояния движения и аппаратуры космического аппарата, принятия решения и выработки управляющих воздействий и собственно передачи на космический аппарат сигналов управления. Поэтому для информационного обмена с МКА по всем видам информации в АСУ МКА используются КИС — совмещенные системы, имеющие в своем составе каналы передачи на МКА сигналов управления (командно-программной информации), измерения параметров движения, приема телеметрической информации о состоянии бортовой аппаратуры [7, 8].

В составе ССОИ функционально объединены бортовая аппаратура наблюдения (БАН) и наземный центр обработки (ЦО) информации. Очевидно, что тип и характеристики БАН определяют характер данных наблюдения и возможности их последующего использования, для чего и осуществляется обработка данных наблюдения в ЦО. Поэтому функционирование БАН и ЦО однозначно взаимосвязано, хотя они соединяются не непосредственно, а через СПД. В состав СПД входят бортовая аппаратура передачи данных (БАПД) и наземные пункты приема информации (ППИ), образующие радиолинию передачи с МКА данных наблюдения. Передача данных наблюдения может происходить в реальном масштабе времени или при воспроизведении из бортового запоминающего устройства, входящего в состав БАПД. Характеристики средств ССОИ и СПД выбираются исходя из требований потребителя к космической информации ДЗЗ, технологии ее передачи на Землю и алгоритмов обработки.

ЦУС, ЦО и ППИ образуют НСК. ЦУС управляет всеми элементами наземного сегмента системы. Кроме средств НСК он взаимодействует с ЦУП и с потребителями космической системы. В соответствии с заявками потребителей составляются программы работы БАН и БАПД, соответствующие технологические циклы управления МКА и планы применения

средств НКУ и НСК. Полученные с МКА данные наблюдения выдаются потребителям после обработки из ЦО или непосредственно с ППИ. В последнем случае предполагается, что потребитель самостоятельно осуществляет тематическую обработку заказанных им данных наблюдения.

При построении ОГ космической системы ДЗЗ в виде кластера она приобретает новые системные возможности, связанные с многопозиционностью наблюдения за наземными объектами, такие как объединение полос обзора нескольких МКА, одновременная и последовательная съемка одних и тех же объектов несколькими МКА с комплексированием данных наблюдения, выбор одного из нескольких возможных ракурсов съемки интересующих объектов и другие. Соответственно программа полета всех МКА и работы их БАН составляется как единая программа применения ОГ космической системы, реализующая ее системные возможности. Современные достижения в области создания бортовых вычислительных комплексов позволяют добиться высокого уровня организации автономного управления МКА средствами БКУ с сохранением определяющей роли НКУ в планировании применения всей ОГ МКА, контроле ее состояния, составлении и передаче на МКА программ работы БАН и БАПД.

Предполагается использовать несколько вариантов кластеров МКА наблюдения:

- кластер, расширяющий полосу обзора системы путем параллельной съемки прилегающих областей;
- кластер, обеспечивающий повышение разрешения съемки за счет обработки данных нескольких МКА, ведущих одновременную съемку одного и того же региона;
- кластер, позволяющий получать пространственные (трехмерные) изображения участков поверхности путем обработки данных с пространственно распределенных МКА;
- кластер, отслеживающий динамику изменения процессов в заданном регионе Земли за счет разнесения по времени получения данных наблюдения нескольких МКА.

Высокие технические и эксплуатационные показатели при малогабаритном исполнении бортовой аппаратуры космических аппаратов основаны прежде всего на внедрении новых технологий во всех элементах. Например, в ОЭС МКА используются современные высоко разрешающие (до 20 мегапикселей) твердотельные матрицы, в том числе с реализацией систем обработки изображений (цифровых сигнальных процессоров) на базе одной микросхемы. В системах энергообеспечения МКА используются солнечные панели с высоким КПД и современные аккумуляторные батареи повышенной емкости и увеличенных сроков эксплуатации. Высокопроизводительные бортовые процессоры позволяют обеспечивать не только геометрическую и радиометрическую коррекцию, но и многократное сжатие данных наблюдения для передачи на Землю по радиоканалу. Бортовые запоминающие устройства выполняются в виде твердотельных накопителей большой емкости. Наконец, практически вся бортовая радиоэлектронная аппаратура МКА может быть реализована на одной или нескольких интегральных схемах с программируемой логикой (ПЛИС). Расчетный срок активного функционирования МКА ДЗЗ по современным оценкам составляет от 3 до 7 лет.

Основным элементом полезной нагрузки МКА наблюдения является БАН. Как правило, ОЭС наблюдения, устанавливаемые на МКА, жестко связаны с корпусом КА, поэтому либо съемка ведется только в надири, либо для отклонения оптической оси осуществляется разворот всего МКА или используются поворотные зеркала. Для увеличения размера кадра применяются двух- и трехкамерные оптические системы с перекрывающимися полосами обзора. Смена режимов съемки осуществляется переключением с широкоугольной системы (обзорный режим) на узкоугольную (детальный режим). Однако из-за малых размеров МКА применяемые на них оптические системы для съемки земной поверхности обладают сравнительно небольшими размерами входного зрачка (объектива) и фокусного расстояния, которые не превышают единиц и нескольких десятков сантиметров соответственно. Тем самым линейное

разрешение на местности ограничивается единицами—десятками метров. Кроме того, из-за невысокой точности системы ориентации МКА формируемые изображения имеют значительную погрешность геопривязки — от нескольких сотен метров до единиц километров.

Указанные ограничения функциональных возможностей бортовых ОЭС наблюдения, связанные с их установкой на МКА, преодолеваются при переходе от обычных (панхроматических) к многоспектральным ОЭС. Ключевым элементом таких ОЭС является многоспектральный датчик, который формирует так называемый „куб многоспектральных данных“ и может быть выполнен по схеме видеоспектрометра или фурье-спектрометра. Использование многоспектральной аппаратуры наблюдения позволяет повысить информативность данных ДЗЗ с одновременным снижением требований к разрешающей способности бортовых ОЭС за счет использования при распознавании новой системы признаков на основе спектральных характеристик зарегистрированного оптического излучения [9, 10]. При этом увеличение числа спектральных каналов ОЭС в 2—3 раза, например в схеме видеоспектрометра, практически не приводит к увеличению массы бортовой аппаратуры МКА. Преимуществом многоспектрального наблюдения также является возможность автоматизированной обработки данных наблюдения (при разработке соответствующего программного обеспечения для обработки зарегистрированных спектральных характеристик наземных объектов и подстилающей поверхности).

Большинство современных МКА наблюдения и их проектов предусматривают одновременную панхроматическую и многоспектральную съемку поверхности Земли в нескольких десятках спектральных каналов или гиперспектральную съемку в нескольких сотнях каналов [2, 11]. Так, использование трех- и четырехканальной аппаратуры наблюдения в различных спектральных диапазонах в сочетании с панхроматической аппаратурой уже является стандартным техническим решением и используется на МКА ДЗЗ „Konos-2“ (масса 780 кг, США, 1999 г.), „OrbView-3“ (360 кг, США, 2003 г.), „Монитор-Э“ (650 кг, Россия, 2005 г.), „RapidEye“ (175 кг, Германия, 2008 г.). Использование многоспектральной и гиперспектральной бортовой аппаратуры наблюдения предусматривается на перспективных МКА ДЗЗ „OrbView-4“ (370 кг, 280 каналов, США), „Канопус-В2“ (400 кг, 72 канала, Россия), „Diamand“ (180 кг, 12 каналов, Германия—Израиль) и других. При этом проектами перспективных космических систем ДЗЗ предусматривается применение в составе кластеров от 2 до 10 МКА.

Сфера применения космической информации многоспектрального ДЗЗ постоянно расширяется. В настоящее время данные многоспектрального наблюдения Земли из космоса используются в

- гидрометеорологии;
- экологическом мониторинге распространения загрязнений во всех природных сферах (атмосфера, поверхность суши, водная среда);
- мониторинге чрезвычайных ситуаций;
- создании и обновлении общегеографических и тематических картографических материалов;
- информационном обеспечении деятельности по землеустройству, прокладке транспортных магистралей, строительству промышленных объектов и градостроительству;
- информационном обеспечении хозяйственной деятельности в ведущих отраслях социальной экономики;
- океанографии и океанологии.

Задачи космической системы ДЗЗ на основе МКА могут уточняться потребителями с учетом характеристик бортовой аппаратуры наблюдения, наземных средств обработки информации и системных возможностей, определяемых кластерным построением ОГ МКА. К прикладным задачам многоспектрального наблюдения Земли из космоса относятся:

- съемка регионов поверхности Земли в целях мониторинга крупномасштабных стихийных бедствий, происходящих в данных регионах;
- поиск и обнаружение наземных техногенных объектов и наблюдение за состоянием природных ресурсов Земли;
- сбор информации для глобальной Географической информационной системы и формирования цифровых карт местности.

В таблице представлены ориентировочные характеристики бортовых многоспектральных ОЭС наблюдения, которые могут быть использованы на микро-КА и мини-КА. В качестве многоспектрального датчика рассматривается видеоспектрометр как более компактный в технической реализации. Указанное количество спектральных каналов — до 30 на микро-КА (многоспектральная ОЭС) и до 300 на мини-КА (гиперспектральная ОЭС) — перекрывает широкий диапазон задач ДЗЗ.

Параметр	Значение	
	Микро-КА	Мини-КА
Тип ОЭС	многоспектральная камера	
Диаметр входного зрачка ОЭС, см	до 5	до 10
Фокусное расстояние, см	до 50	до 1
Регистрация изображения	кадровая	
Размер элемента фотоприемника, мкм	10×10	
Шумовой эквивалентный сигнал, фотоотсчетов на выборку	100	
Тип спектрального прибора	видеоспектрометр	
Емкость бортового твердотельного накопителя, Гбит	до 100	до 1000
Количество спектральных каналов	15—30	150—300
Ширина спектрального канала, мкм	0,02—0,04	
Скорость информационной радиолинии, Мбит/с	до 50	до 300
Количество разрядов квантования сигнала	до 10	до 8

Следует отметить, что переход к многоспектральному наблюдению при ДЗЗ сопряжен с очевидным усложнением БАПД вследствие увеличения информационных потоков от БАН (несмотря на использование методов сжатия видеоданных) и требуемых скоростей передачи информации на наземные ППИ по радиоканалу. Для передачи данных многоспектрального наблюдения в реальном масштабе времени требуемая скорость передачи информации составляет до сотен мегабит в секунду, что приводит к необходимости использования в СПД специализированной радиолинии, существенно отличающейся по своим характеристикам от радиолинии КИС, по которой осуществляется информационный обмен в АСУ МКА [12]. Кроме того, для сокращения объема передаваемой информации предложены методы адаптивного выбора наиболее информативных спектральных каналов, которые у одной и той же бортовой многоспектральной ОЭС могут быть различными при решении задач ДЗЗ и съемке наземных объектов [13].

Рассмотренные принципы построения космической системы многоспектрального наблюдения на основе кластера МКА и характеристики бортовых многоспектральных ОЭС как основного элемента полезной нагрузки МКА определяют основные системные решения при создании таких систем, а также особенности и варианты их применения при решении различных прикладных задач ДЗЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тяпичев Г. А. Спутники и цифровая радиосвязь. М.: ТехБук, 2004. 288 с.
2. Рябова Н. В., Еськов Д. Н. Малые искусственные спутники Земли с оптико-электронной аппаратурой в программах дистанционного зондирования Земли // Оптич. журн. 1996. № 1. С. 4—19.

3. *Гарбук С. В., Гершензон В. Е.* Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: Изд-во А и Б, 1997. 296 с.
4. *Кравец В. Г.* Автоматизированные системы управления космическими полетами. М.: Машиностроение, 1995. 256 с.
5. *Лебедев А. А., Нестеренко О. П.* Космические системы наблюдения. Синтез и моделирование. М.: Машиностроение, 1991. 224 с.
6. *Невдяев Л. М., Смирнов А. А.* Персональная спутниковая связь. М.: Эко-Трендз, 1998. 216 с.
7. *Галантерник Ю. М., Гориш А. В., Калинин А. Ф.* Командно-измерительные системы и наземные комплексы управления космическими аппаратами. М.: МГУЛ, 2003. 200 с.
8. *Молотов Е. П.* Наземные радиотехнические системы управления космическими аппаратами. М.: Физматлит, 2004. 256 с.
9. *Фатеев В. Ф., Миньков С. А.* Потенциальные возможности космических многоспектральных оптико-электронных приборов при обнаружении малоразмерных объектов // Оптич. журн. 2000. № 7. С. 5—11.
10. *Мальцев Г. Н., Луцый С. И.* Корреляционное распознавание объектов по многоспектральным данным // Оптич. журн. 2004. № 11. С. 15—18.
11. *Подъезтков Ю. А.* Космическая съемка Земли 2006—2007 гг. М.: Радиотехника, 2008. 275 с.
12. *Мальцев Г. Н., Буриков С. В., Булаев О. А.* Анализ характеристик радиолинии передачи с малогабаритного космического аппарата данных дистанционного зондирования Земли // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 6. С. 5—11.
13. *Мальцев Г. Н., Козин И. А., Фатеев В. Ф.* Методы выбора наиболее информативных спектральных каналов при дистанционном зондировании Земли с малых космических аппаратов // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 6. С. 23—31.

Сведения об авторах

- Георгий Николаевич Мальцев** — д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космических радиотехнических систем, Санкт-Петербург; E-mail: georgy_maltsev@mail.ru
- Вадим Викторович Кунгурцев** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космических радиотехнических систем, Санкт-Петербург; E-mail: kvadim13@mail.ru
- Игорь Александрович Козин** — адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космических радиотехнических систем, Санкт-Петербург; E-mail: garry-spb@yandex.ru

Рекомендована Ученым советом
ВКА им. А. Ф. Можайского

Поступила в редакцию
20.10.08 г.