

В. Ф. ФАТЕЕВ, Д. Л. КАРГУ

## ПЕРСПЕКТИВНАЯ СЕТЬ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассматривается практический опыт создания беспроводной сети передачи данных на базе элементов приемопередающих систем СВЧ-диапазона в малогабаритном исполнении, предназначенных для разворачивания локальной орбитальной группировки малых космических аппаратов (МКА). Приведен вариант структурного построения реконфигурируемой распределенной полезной нагрузки МКА. Представлены результаты анализа технических решений существующих аппаратных средств диапазона ISM.

*Ключевые слова:* малый космический аппарат, орбитальная группировка, кластер, беспроводная сеть передачи данных, распределенная полезная нагрузка.

В настоящее время актуальна задача создания на орбите распределенной полезной нагрузки, установленной на малогабаритные (малые) космические аппараты (МКА). Данные группировки МКА называют кластерами, их создание вызвано необходимостью эффективно использовать ресурс используемой орбиты.

Привлекательность использования малых спутников связи на орбите обусловлена более широким выбором ракет-носителей легкого и среднего класса, возможностью группового запуска малых спутников или запуска в качестве попутной полезной нагрузки на ракете-носителе тяжелого класса. В результате обеспечивается вариативность графика запусков, а за счет более низкой стоимости запуска повышается экономическая эффективность системы в целом.

Малые спутники позволяют увеличить пропускную способность в любой орбитальной позиции, занятой другим спутником (при условии наличия в ней частично неиспользованного частотного ресурса) за счет возможности оперативного запуска нового спутника по мере роста загрузки космического сегмента. Использование малых спутников связи позволяет наращивать трафик на орбите постепенно, создавая кластеры спутников, причем каждый последующий спутник будет учитывать особенности изменяющейся целевой задачи. Малые спутники могут использоваться в качестве орбитального резерва для КА, готового к переводу в другую орбитальную позицию.

Несколько МКА, расположенных в непосредственной близости от определенной точки космического пространства, образуют локальную орбитальную группировку (ЛОГ). Для управления локальной орбитальной группировкой необходимо организовать беспроводную сеть передачи данных между МКА группировки.

Первым этапом организации беспроводной сети должен стать анализ существующей ситуации и задач, которые будут решаться с ее помощью. Должен быть определен размер сети и ее структура.

Под размером сети в данном случае понимается как количество объединяемых в сеть МКА, так и расстояния между ними. Необходима точная информация о том, сколько МКА (минимально и максимально) нуждается в подключении к сети. Кроме того, необходимо оставлять возможность для дальнейшего увеличения количества МКА в сети. Наконец, совсем не обязательно раз и навсегда включать в сеть все МКА орбитальной группировки. Количество подключенных к сети МКА существенно влияет как на ее производительность, так и на сложность обслуживания.

Под структурой сети понимается способ ее разделения на части (сегменты), а также способ соединения (стыковки) этих сегментов между собой. Важнейшим требованием к структуре сети является ее соответствие структуре задания.

Таким образом, организация беспроводной сети передачи данных между МКА позволяет обеспечить создание управляемой локальной группировки КА. Это дает возможность разместить на МКА, входящих в ЛОГ, распределенную, перестраиваемую полезную нагрузку. Состав предлагаемой радиосети для ЛОГ КА представлен на рис. 1 (здесь ЦМКА — центральный МКА, ОМКА — оконечный МКА, НСУ — наземная станция управления).

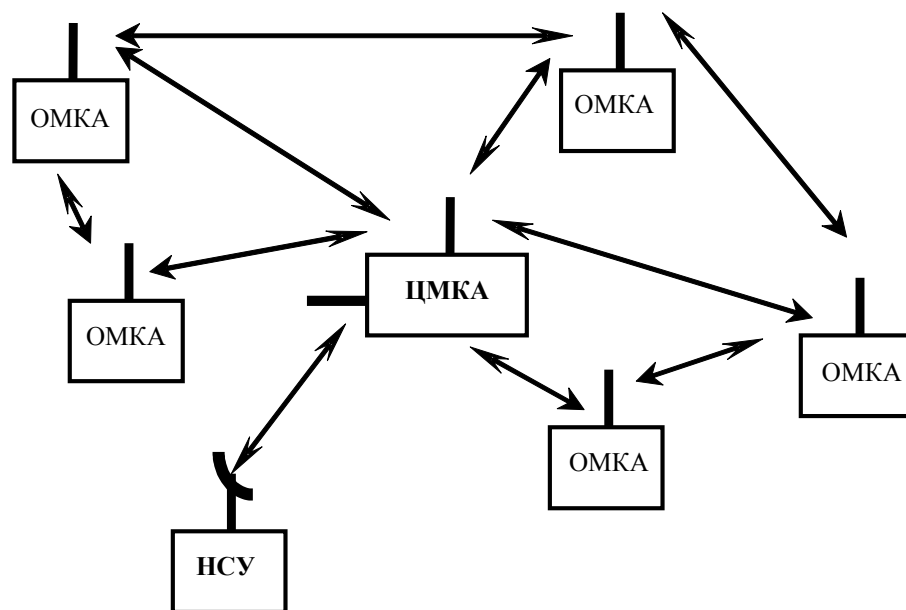


Рис. 1

Данная структура позволяет создавать новые системы:

— динамически перестраиваемые системы мониторинга космического пространства и радиочастотной идентификации космических объектов;

— системы с перестраиваемой апертурой для радиотелескопов и антенн, а также для объективов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и т.д.

В настоящее время благодаря миниатюризации электронной техники СВЧ-диапазона и развитию цифровых технологий передачи информации появились широкие возможности для создания малоразмерных искусственных спутников Земли. Вес подобных МКА с учетом полезной нагрузки может составлять от сотен граммов до десятков килограммов. Это позволяет развернуть радиосеть из МКА на базе малогабаритных передатчиков, работающих в диапазоне

2400 МГц. Данный диапазон уже широко используется в малогабаритных спутниках радиолюбителей (АО-40, АО-51 и др.).

Практический опыт разработки бортовых радиотехнических систем МКА [1] позволяет сделать вывод о том, что для построения бортовой аппаратуры командно-телеметрической и информационных радиолиний предлагается использовать модульные трансиверы компании MaxStream (США). Данные трансиверы в настоящее время широко применяются при сборке наноспутников серии CubeSat.

Протокол информационного обмена между элементами ЛОГ КА и элементами наземного комплекса управления в этом случае основывается на стандарте IEEE 802.15.4 в сочетании со спецификацией ZigBee.

Следует отметить, что спецификация ZigBee и стандарт IEEE 802.15.4 описывают разные уровни классической схемы взаимодействия открытых систем. Стандарт IEEE 802.15.4 описывает только два нижних уровня схемы (физический и канальный), в то время как ZigBee охватывает семь уровней, обеспечивающих быстрое создание мониторинговых и управленческих сетей на базе стандарта (сетевой, транспортный, сеансовый уровни, а также уровни представления и приложений).

Беспроводной стандарт IEEE 802.15.4 резервирует под обмен данными 27 каналов в трех частотных диапазонах (868 × 915 МГц, а также 2,4 ГГц). Скорость передачи в частотном диапазоне 2,4 ГГц может достигать 250 Кбит/с. Стандарт IEEE 802.15.4 обеспечивает двустороннюю полудуплексную передачу данных, поддерживая при этом шифрование AES 128. Расширенная адресация в рамках стандарта IEEE 802.15.4 позволяет находиться в одной сети примерно 65 тысячам устройств.

Устройства внутри сети могут играть одну из трех ролей: обыкновенного оконечного устройства (производящего обмен только с концентратором), ретранслятора (обеспечивающего прием и передачу данных) и концентратора (управляющего архитектурой сети). Оконечные устройства (см. рис. 1) — устройства с ограниченной функциональностью — обеспечивают минимальный набор функций, позволяющий производителю экономить на комплектующих (в частности, памяти микроконтроллера). Ретранслятор, или устройство с полной функциональностью, поддерживает все функции, определенные в документе IEEE 802.15.4, и может выполнять функции моста, маршрутизатора или шлюза для связи с другими сетями. Концентратор, или сетевой координатор, — наиболее дорогой тип устройств, так как он должен содержать всю информацию о сетевых соединениях, иметь большой объем памяти и высокую производительность.

Протокол передачи подразумевает „засыпание“ передатчика при отсутствии данных для пересылки, что обеспечивает низкое энергопотребление устройств, соединенных по стандарту IEEE 802.15.4. В результате время автономной работы оконечных устройств может значительно продлить срок орбитального ресурса работы МКА. Стандарт обладает высокой скоростью конфигурирования и реконфигурирования сети. К примеру, переход приемника в активное состояние займет порядка 15 мс, а добавление устройства в сеть — около 30 мс. Для сравнения, сети WiFi и Bluetooth не могут обеспечить такого быстродействия.

На основе стандарта IEEE 802.15.4 могут быть построены самые разнообразные сети всевозможных топологий с пакетной или потоковой передачей информации, а также с заданными параметрами шифрования. Наиболее перспективным считается создание на основе стандарта IEEE 802.15.4 беспроводных сенсорных сетей (Wireless Sensor Networks, или WSN). В рамках этого направления соединенные между собой по беспроводному интерфейсу оконечные КА могут обмениваться информацией и передавать данные на центральный КА. В данном случае спецификация ZigBee отвечает всем требованиям, предъявляемым технологией к беспроводному стандарту: любой КА может быстро подключаться или отключаться от сети, передавая небольшие объемы данных и практически не потребляя электроэнергии.

Разрабатываемая в настоящее время авторами беспроводная сеть-макет предназначена для экспериментального подтверждения возможностей создания локальной орбитальной группировки МКА.

Комплекс средств беспроводной сети должен обеспечивать:

- прием рабочих программ и разовых команд управления от наземной станции управления (НСУ);
- передачу телеметрической информации и информации оперативного контроля НСУ;
- передачу целевой информации;
- прием-передачу разовых команд управления и телеметрии между МКА локальной группировки.

Комплекс радиосредств беспроводной сети построен на основе модульных трансиверов MaxStream [2—5], которые обеспечивают передачу данных с характеристиками, представленными в таблице.

Характеристика модуля	Значение	
	X24-OEM-019DK	XBee (PRO)
Диапазон, ГГц	2,4	2,4
Выходная мощность, мВт	100/50	1/100
Управление	настройка AT-командами, прямая передача данных	настройка AT-командами, прямая передача данных
Скорость, Кбит/с	9,6 (19,2)	до 115
Питание, мА	5 В/max 150	3,3 В/max 270
Вес, г	24	5/7
Антенный интерфейс	RPSMA, MMCX или проводная антенна	RPSMA, MMCX или проводная антенна
Внешний интерфейс	UART	UART

В состав ЦМКА входит два радиомодуля: X24-OEM-019 (для организации взаимодействия с наземными средствами) и XBee (для работы в составе локальной группировки). Оконечный МКА оснащен только модулем XBee.

При проектировании ЦМКА и ОККА было отдано предпочтение формату PC-104, широко используемому при изготовлении зарубежных наноспутников серии CubeSat.

Общий вид макетов ЦМКА и ОККА без внешнего корпуса представлен на рис. 2 и 3 соответственно.



Рис. 2



Рис. 3

В заключение необходимо отметить, что длительность функционирования любого космического аппарата и его полезной нагрузки в основном определяется ресурсом системы электропитания. Условия открытого космического пространства (большой перепад температур от  $-50$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  и более, высокий уровень жесткого излучения и т.д.), а также особенность установки аккумуляторных батарей в негерметизированном отсеке КА требуют высокой

надежности их изготовления и обеспечения достаточного ресурса работоспособности. Из существующих аккумуляторных батарей (источников электроэнергии), способных надежно функционировать в таких условиях, наиболее перспективными являются образцы, изготавливаемые фирмами BetaBatt (США), а также Medtronic (США).

В основе принципа действия данных источников электроэнергии лежит применение радиоактивных материалов. Сотрудники компании BetaBatt совместно с учеными из ряда университетов США и Канады создали диоды, способные напрямую преобразовывать радиацию, полученную от небольшого кусочка изотопа, в электрический ток.

Новые элементы источника электроэнергии могут работать десятки, и даже сотни лет, хотя мощность их намного ниже, чем у сопоставимых по размерам химических источников тока. Диапазон рабочих температур этих элементов от  $-100$  до  $+150^{\circ}\text{C}$ , при этом они довольно устойчивы к механическим повреждениям.

Технология производства таких источников электроэнергии называется DEC (Direct Energy Conversion — прямое преобразование энергии). Ключом к повышению КПД DEC-устройств стал первый в мире трехмерный полупроводниковый (кремниевый) диод. В отличие от обычных диодов, представляющих собой очень тонкую пластинку с двумя слоями  $p$ - и  $n$ -проводимости, новый диод обладает огромным количеством глубоких пор (причем глубина их во много раз больше диаметра) микронного размера, которые повышают его эффективную площадь в десятки раз. Высокопористый кремний ученые создавали и раньше, а вот такой пористый материал с  $p$ — $n$ -переходом — никогда. Создать диод удалось с помощью технологии, которая практически не отличается от стандартного способа производства микросхем, что предполагает чрезвычайно низкую себестоимость будущего устройства. Новые источники электроэнергии будут работать с очень высоким КПД преобразования энергии бета-распада в электричество при высочайшей надежности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фатеев В. Ф., Каргу Д. Л. Практический опыт разработки элементов бортовых радиотехнических систем наноспутника серии „CubeSat“ // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 50, № 6. С. 14—16.
2. Пушкарев О. В. Передача данных в ZigBee-сети с помощью модулей XBee ZNet 2.5 // Новости электроники. 2008. № 3. С. 27—31.
3. Бараиш Л. Е. Многообразие стандартов беспроводных технологий // Компьютерное обозрение. 2003. № 10. С. 25—28.
4. Захаров Д. П. Интернет начинает эфирное вещание // Коммерсантъ. Приложение ТЕЛЕКОМ. 2004. № 83. С. 44—47.
5. Панфилов Д. Л., Соколов М. Ю. Введение в беспроводную технологию стандарта 802.15.4 // Электронные компоненты. 2004. № 12. С. 73—79.

#### Сведения об авторах

- Вячеслав Филиппович Фатеев** — д-р техн. наук, профессор; президент ОАО МАК „Вымпел“, кафедра информационных систем, Москва; E-mail: vimpel@vimpel.ru
- Дмитрий Леонидович Каргу** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра систем космической связи, Санкт-Петербург

Рекомендована Ученым советом  
ВКА им. А. Ф. Можайского

Поступила в редакцию  
20.10.08 г.