

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

УДК 629.7

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Л.А. Макриденко, С.Н. Волков, В.П. Ходненко
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

С.А. Золотой

(УП «Геоинформационные системы» НАН Беларуси)

Рассмотрены концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов (МКА). Предложенный подход хорошо согласуется с концепцией «быстрее – лучше – дешевле». Определен круг задач, решаемых с помощью МКА. Показаны примеры применения МКА. Приведены особенности концепции МКА: ограничение по массе (100 – 150 кг) для аппаратов, использующихся суеубо по целевому назначению; возможность повышения эффективности космических систем наблюдения за счет создания многоспутниковых орбитальных группировок из МКА; использование, наряду с обычными средствами выведения, авиационно-космических систем воздушного базирования и нетрадиционных средств (электродинамических ускорителей массы).

Ключевые слова: малый космический аппарат, орбитальные группировки, космические системы, орбиты КА, средства выведения, информационные технологии, космические системы наблюдения.

На рубеже 90-х годов 20 в. существенно изменились приоритеты в разработке космических аппаратов. Преимущество получило создание малых космических аппаратов по сравнению с крупногабаритными и тяжелыми КА (массой более 3 т).

На рис. 1 показана тенденция снижения количества запускаемых тяжелых КА по годам [1].

В результате начавшегося и интенсивного продолжающегося процесса миниатюризации КА удалось снизить массы некоторых тяжелых и больших КА и создать новые аппараты аналогичного назначения с массой в несколько сотен килограмм, т. е. появился класс малых космических аппаратов (МКА).

Согласно сложившейся классификации [2] к тяжелым, средним и легким КА относятся аппараты массой более 500 кг. Для спутников массой менее 500 кг

принята следующая международная классификация:

- мини-спутники (100 – 500 кг);
- микроспутники (10 – 100 кг);
- наноспутники (1 – 10 кг);
- пикоспутники (0,1 – 1 кг);
- фемтоспутники до 100 г.

Малый космический аппарат – это не только малая масса, энерговооруженность и стоимость, но и переход на следующую ступень развития космической техники. Создание МКА отличается увеличением доли миниатюризации электроники и вычислительной техники, наличием новых подходов в организации архитектуры КА и процесса проектирования, изготовления, испытаний, запуска и обеспечения надежного функционирования КА в сочетании с широким применением унификации и новейшей электронной базы серийного производства [3].

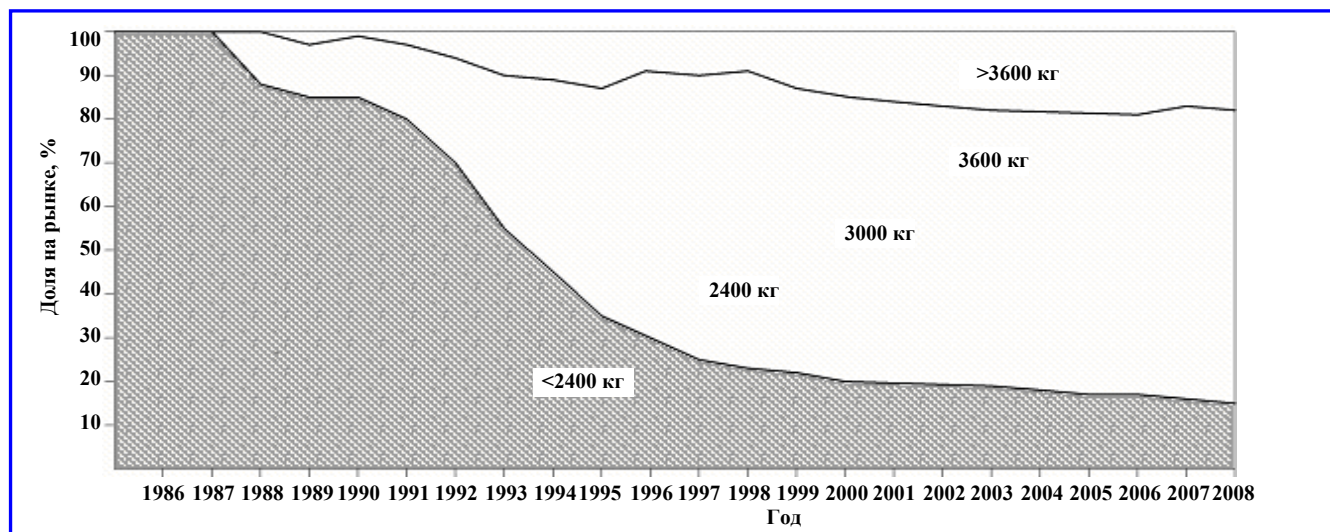


Рис.1. Доля запущенных тяжелых КА по годам

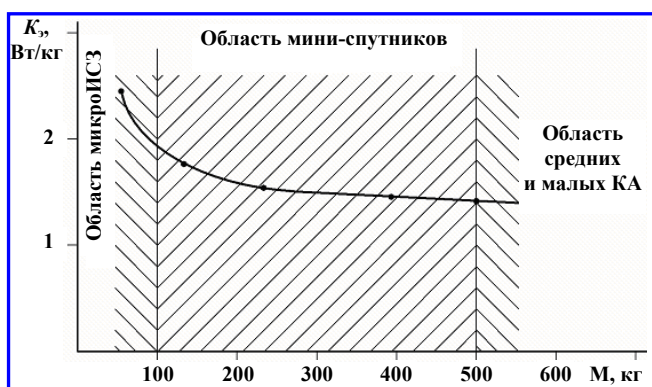


Рис. 2. Область использования КА по энерговооруженности

Для класса МКА характерен показатель малой энерговооруженности K_3 , который представляет собой отношение мощности системы энергоснабжения N к массе аппарата M ($K_3 = N/M$). Для МКА K_3 может изменяться в среднем от 2,3 до 1,3 Вт/кг, и указанный диапазон наряду с массой может определять область применения МКА (рис. 2).

МКА обладают заметными преимуществами перед большими и тяжелыми космическими аппаратами:

- экономической эффективностью целевого использования МКА на высотах функционирования до 1000 км и особенно на высотах 200 – 500 км, на которых срок активного существования (САС) тяжелых КА без применения соответствующих средств коррекции орбиты достаточно мал;
- технологией создания МКА, соответствующей стратегии сокращения расходов и рисков;
- возможностью быстрой модификации для решения широкого круга задач с различным целевым назначением;
- меньшим собственным гравитационным, электромагнитным и газовым (внешняя атмосфера) фоном, что позволяет снизить степень влияния спутниковой платформы на работу целевой полезной нагрузки (ЦПН);
- сравнительно малыми сроками разработки целевого МКА (не более 3 – 5 лет в самом худшем варианте от момента принятия решения до начала летных испытаний (ЛИ));
- возможностью оперативного и скрытного запуска МКА из любой точки земного шара (в том числе и с использованием подвижных ракетных комплексов) с помощью ракет-носителей (РН) подземного, воздушного базирования при высокой оперативности подготовки к запуску [4];
- удешевлением вывода на орбиту и орбитальной эксплуатации МКА.

Однако говоря о преимуществах МКА, необходимо отметить, что расширение задач, решаемых с их помощью, не означает необходимости снижения роли тяжелых КА (массой ≥ 3 т) или полного отказа от них.

На тяжелые КА должно быть возложено решение, главным образом, стратегических задач.

Общая концепция создания МКА хорошо согласуется с концепцией «быстрее – лучше – дешевле» [5], которая направлена на оптимальное решение вопросов разработки космической техники без снижения уровня ее надежности.

Создание МКА позволяет чаще проводить запуски, и при этом:

- расширять возможности участия в проектах молодых ученых, а также студенческой молодежи и широкой научно-технической общественности;
- ускорить использование в последующих программах и проектах новейших полученных научно-технических результатов.

Сокращение временного цикла, связанного с реализацией проекта позволяет:

- исключить работы, не обладающие особой полезностью;
- использовать новейшие инженерные средства и улучшить технологию управления;
- уменьшить основное время разработки, отказаться от неэффективных или дублированных процессов.

Использование новых технологий позволяет:

- расширить возможности для их внедрения;
- увеличить объем полученной разносторонней информации и интерес к космическим исследованиям;
- уменьшить размеры КА и как результат общую стоимость проекта.

Выполнение данных работ является важным условием успешной реализации концепции МКА.

Имеющий место «риск» оправдан:

- применением инноваций и новых технологий, облегчающих значительное увеличение эффективности проектов по МКА;
- возможным получением высокоценной информации.

Таким образом, концепция подразумевает допустимость разумного риска. Во всех случаях уровни риска должны рассчитываться и сравниваться с ожидаемыми результатами, а результаты расчетов должны подтверждаться в ходе разработки проекта.

Для получения максимально возможного успеха проекта необходимо использовать проверенные инженерные и управленческие решения:

- четкий принцип распределения власти и ответственности в самом начале проекта;

- разумное использование резервирования;
- эффективный, компетентный, независимый контроль;
- всесторонний анализ выполнения программы качества на всех этапах работы над проектом;
- специальный контроль за устранением единичных ошибок, вызванных человеческим фактором и способных привести к неудаче всего проекта;
- оптимизация условий проведения наземных испытаний;
- максимальное использование результатов наземных испытаний при планировании и осуществлении операций в космосе.

При внимательном рассмотрении концепции «быстрее – лучше – дешевле» и общей концепции МКА можно особо выделить следующее:

- данная концепция без применения новых технологий способна обеспечить лишь незначительные преимущества;
- необходимость использования эффективных систем электроснабжения (СЭС) и солнечных электроракетных двигателей (СЭРД);
- необходимость применения автономных систем навигации (АСН) и широкое использование диагностики отказов;
- необходимость использования автоматического синтеза и верификации программного обеспечения (ПО).

Опыт эксплуатации сотен МКА во всем мире подтвердил высокую эффективность их применения для нужд науки и народного хозяйства, а также в военных целях. МКА позволяют решать отдельные целевые задачи часто не хуже больших КА (БКА). Например, МКА – вполне адекватная замена БКА по решению задач детальной картографической съемки Земли.

Как показала практика, тяжелые БКА, созданные в соответствии с концепцией «все в одном», имеют чрезвычайно высокую стоимость и требуют так много времени для разработки, что к моменту запуска многие технологические решения успевают устареть. Причем если отказ БКА означает срыв целевой программы в целом, то отдельные отказы малых объектов в системе идентичных МКА не являются критичными в силу дублирования функций отдельных аппаратов.

В целом круг задач, решаемых с помощью МКА в области народного хозяйства, достаточно широк и включает в себя: мониторинг и контроль окружающей среды; сбор и передачу данных; метеорологию; навигацию и связь; прогнозирование опасных явлений и оперативный контроль чрезвычай-

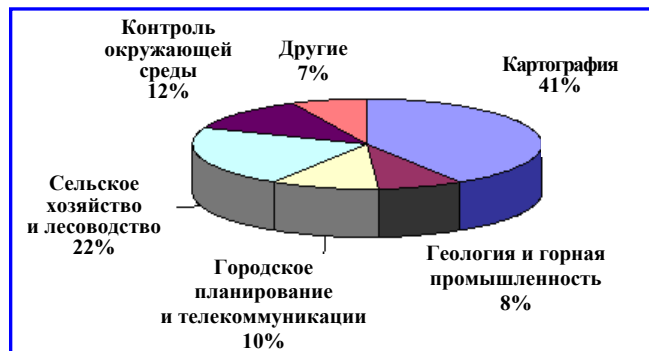


Рис. 3. Доля потребителей космической информации коммерческих МКА

ных ситуаций; использование в интересах отработки новых технологий, образования, бизнеса и банковского дела; поиск и спасение людей, транспортных средств; контроль линий газо- и нефтепроводов; поиск полезных ископаемых; слежение за перемещением и контроль сохранности крупных и ценных грузов и т. д.

На рис. 3 показаны основные потребители информации коммерческих МКА [1].

Необходимо отметить еще одну нетривиальную возможность использования МКА – создание спутников-инспекторов для диагностики и устранения причин выхода из строя КА, и в первую очередь больших и сложных.

Необходимо отметить, что в наши дни в отдельных случаях еще существует недопонимание преимуществ МКА. Однако следует напомнить, что освоение космоса в 50-х годах 20 в. начиналось с малых спутников (например первый ИСЗ был выполнен в виде сферы диаметром 58 см и имел массу 83,6 кг).

Ниже остановимся на целесообразности перехода от тяжелых и больших КА к МКА, исходя из конкретных примеров.

Типичным примером космического «динозавра» является европейский спутник дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) Envisat – 1, который имеет массу 8,2 т (в том числе полезная нагрузка 2,1 т). Envisat стал самым дорогим (около 870 млн. долл.) и сложным КА европейских стран. Разработка спутника началась в 1991 г., а запуск после неоднократных переносов был запланирован на 2001 г., а был осуществлен в марте 2002 г.

Для сравнения – британская компания Surrey Satellite Technology Ltd (SSTL), которая является одним из лидеров в области МКА, выполняет заказы на разработку спутников ДЗЗ в течение 1,5 – 2 лет стоимостью 3 – 14 млн. долл.

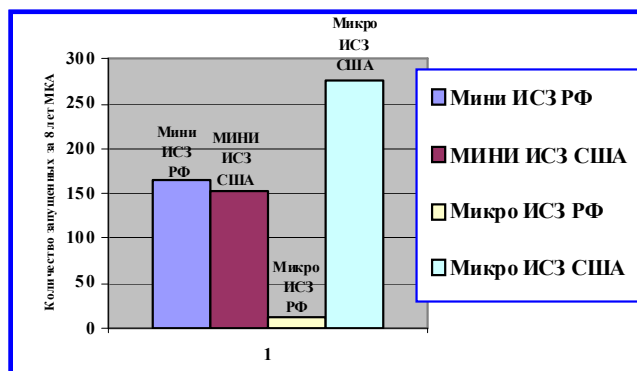


Рис. 4. Количество МКА на российском и зарубежном рынках

Таблица 1

Обозначение	Параметры рабочей орбиты			
	$i, ^\circ$	$H_p, \text{ км}$	$H_a, \text{ км}$	$T, \text{ мин}$
2004 – 0,49С	98,678	699,0	714,1	98,960
2004 – 0,49D	98,080	696,1	710,6	98,893
2004 – 0,49E	98,080	614,4	629,7	97,178
2004 – 0,49F	98,077	611,0	626,8	97,108

Популярности МКА способствуют и глобальные изменения в мировой космонавтике.

В настоящее время в «космический клуб» вступают новые страны Азии и Латинской Америки (Корея, Сингапур, Малайзия, Таиланд, Аргентина, Чили и др.). Необходимость разработки собственных КА эти страны рассматривают, исходя, прежде всего, из прагматических интересов, а не из соображений престижа. Наступает эра прагматического космоса – создание экономических средств, которые должны приносить экономический эффект и в сжатые сроки [6].

Крупнейшими производителями МКА на сегодняшний день являются компании США, Великобритании, Японии, Китая, Франции, Германии, Израиля. Эти страны активно осваивают зарубежные рынки Азии и Латинской Америки, предлагая клиентам системы «под ключ» или совместную разработку. Например количество малых, мини- и микроспутников, запущенных в 90-е гг. 20 в. в интересах ДЗЗ, достигало нескольких десятков, и спрос на них постоянно растет.

По мнению специалистов, использование МКА позволит сделать рентабельной систему космического наблюдения.

В этом отношении характерным примером является отказ от французского проекта по созданию штатного большого спутника радиоэлектронной разведки (РЭР) Zenon, начатого в 1992 г. (стоимость 660 млн. долл.), в пользу перспективной системы РЭР на основе группировки из нескольких микроспутников. Проект получил в 1998 г. название Essaim.

По оценкам Генерального агентства DGA (Delegation General de l'Armement) группировка из 3 – 4 микроКА может быть выгоднее одного большого спутника РЭР. Группировка из четырех МКА массой 150 кг оказалась дешевле БКА (каждый микроспутник стоимостью ~18 млн. долл.), повышалась надежность системы в целом, а также периодичность наблюдения.

После запуска четырех микроКА при помощи бортовых двигательных установок (ДУ) была сформирована рабочая конфигурация орбитальной группировки (ОГ) космической системы (КС) Essaim.

Система Essaim имеет глобальный охват земной поверхности и при максимальной полосе обзора (5000 – 6000 км), группировка из четырех микроКА позволила обеспечить в среднем шестикратное наблюдение каждой точки земного шара продолжительностью 20 – 30 мин.

На Essaim было выделено из французского бюджета 79,3 млн. евро, из которых 70,1 млн. предназначалось на разработку, изготовление микроКА и их запуск, а 9,2 млн. на пятилетнюю эксплуатацию.

В настоящее время ведущими космическими странами активно прорабатывается, в частности, концепция создания «кластерных» КС («созвездие») на базе микро и наноспутников с распределенными функциями.

При этом к основным преимуществам КС с использованием МКА, кроме вышеназванных, можно отнести:

- повышенную глобальность охвата районов Земли;
- высокую оперативность за счет формирования и поддержания ОГ;
- возможность серийного производства МКА;
- высокую готовность к модернизации проекта;
- высокую оперативность подготовки и пуска, низкую стоимость эксплуатации.

Прогноз по количеству запускаемых в 2004 – 2010 гг. МКА на российском и зарубежных рынках по данным ЦНИИМаш [7] показан на рис. 4.

Не так давно концепция использования МКА была принята в России на государственном уровне. В Федеральной космической программе (ФКП) 2006 – 2015 гг. специально предусмотрено создание целой серии МКА на базе унифицированной спутниковой платформы.

Новая микроплатформа будет предназначена для изготовления на ее базе спутников различного назначения: для проведения исследований по изучению Солнца и солнечно-земных связей для изучения малых тел солнечной системы; для проведения экспериментов в области астрофизики; для наблюдения Земли из космоса в интересах фундаментальных космических исследований, а также для нужд народного хозяйства.

О перспективах МКА говорит, например, наличие проекта MiTeX (США), имеющего цели выявить, собрать, испытать и провести комплексную оценку современной технологии МКА, чтобы обеспечивать и совершенствовать будущие американские космические миссии.

Космический проект MiTeX осуществляется в рамках научно-технической экспериментальной программы демонстрации микроспутников MIDSTEP. Одна из основных задач эксперимента – создание сети из микроспутников или модулей с целью формирования гибкой архитектуры космических средств, способной решать различные задачи и реагировать на различные внешние угрозы.

Заметный интерес к МКА проявляется и в военной области.

Программа TORSAT (Tactical Operational SATellite – тактический оперативный спутник), сформулированная военным ведомством Великобритании, заключается в демонстрации применимости дешевых МКА для оперативного информационного обеспечения группировок вооруженных сил с передачей данных на мобильные приемные станции в реальном времени. Перечень прикладных задач TORSAT довольно обширен: оперативный мониторинг зон чрезвычайных ситуаций, картографирование, земельный кадастр, разведка минеральных ресурсов, лесное и сельское хозяйство, природоохранный и экологический мониторинг.

В соответствии с указанной программой первый мини-спутник видовой разведки Великобритании TORSAT, выведенный в космос 27 октября 2005 г., обладал на то время уникальным сочетанием характеристик по массе, стоимости и пространственному разрешению (соответственно 120 кг, 24,9 млн. долл., 2,5 м и 5 м). В перспективе вместо одного экспериментального аппарата может быть развернута целая группировка из 4 – 5 оперативных МКА.

Более широкие по задачам демонстрационные программы космической разведки разрабатываются в США в рамках концепции «Опера-

тивно реагирующий космос» (Operationally Responsive Space), по проекту TACSAT и другим программам.

Работы по созданию тактических разведывательных КА серии TACSAT (Tactical Satellite) ведутся по совместному проекту ВВС и ВМС США с осени 2003 г.

Это вызвано тем, что существующие разведывательные системы, созданные как в интересах разведки, так и в интересах Вооруженных сил (ВС), обладают чрезмерно высокой стоимостью (500 млн. долл. – 1 млрд. долл. за спутник) и длительным жизненным циклом, который включает 5 – 10-летний этап проектирования. К концу указанного срока многие технические решения устаревают.

Концепция тактических спутников на базе мини-КА родилась в ответ на потребность в специализированных космических средствах для командиров основных соединений и частей, участвующих в боевых операциях.

В соответствии с современными тенденциями перспективные группировки мини-КА, развертываемые на орбите в короткие сроки, могут в совокупности со средствами воздушной разведки значительно расширить возможности штабов объединенных группировок на театре военных действий (ТВД) по сбору необходимой информации при возникновении кризисных ситуаций.

Преимуществами мини-спутников оперативной разведки по сравнению с традиционными системами космической разведки являются:

- запуск мини-КА непосредственно по требованию;
- комплектация полезной нагрузки (ПН) в зависимости от текущих потребностей заказчика;
- непосредственное управление ресурсами со стороны командования на ТВД;
- выбор соответствующих рабочих параметров орбиты для увеличения частоты пролета над заданным районом;
- быстрое внедрение новых разведывательных технологий;
- снижение стоимости жизненного цикла системы.

Создание тактического спутника может быть реализовано при наличии:

- низкой стоимости изготовления и запуска тактического микроспутника с различным сроком активного существования;
- возможности обеспечения высокой оперативности выполнения разведывательных задач и доведения информации до пользователя.

Предполагается, что в значительной мере системы разведки на базе МКА с малой радиолокационной и оптической заметностью смогут в недалеком будущем реализовать свой потенциал в качестве перспективных космических средств слежения.

В КНР работы по МКА (мини- и микроспутникам) включены в приоритетную долгосрочную программу развития космических технологий «План 863» и стремительно реализуются. КНР в перспективе намерена развернуть группировку МКА военного и социально-экономического назначения.

Микроспутники могут стать компонентом противоспутниковых систем КНР (наряду с надежными системами лазерного и СВЧ-оружия).

Противоспутниковое оружие на базе микроспутников является составной частью ассиметричной стратегии Китая в борьбе с противником, обладающим подавляющим численным и технологическим превосходством в космосе.

Противоспутниковые средства нацелены на системы разведки, навигации и связи, без которых ведение современных боевых действий невозможно.

Рассматриваются следующие варианты противоспутниковых систем на базе мини- и микроспутников:

- маневрирующие МКА, которые могут сблизаться с целью и создавать помехи для работы ее бортовых систем или уничтожать цели направленным взрывом;
- гипотетические наноспутники-паразиты, которые могут прикрепляться к корпусу КА разведки, навигации и связи, оставаясь незамеченными, и выводить спутник из строя в боевой обстановке;
- гипотетический микроспутник-перехватчик, замаскированный под космический мусор, в течение длительного времени совершает пассивный полет, но в критический момент маневрирует, сблизается и сталкивается с военным КА.

Что касается МКА социально-экономического назначения, то до 2020 г. Китай намерен запустить более 100 спутников с целью создания глобальной системы наблюдения совместно с КА, принадлежащим и другим странам. Эта КС будет следить за водными ресурсами, лесами, сельскохозяйственными землями, городским строительством и другими областями человеческой деятельности.

Хотя появление класса МКА является несомненно положительной тенденцией, позволяющей получить существенный эффект, однако, говоря о КС нового поколения на базе МКА, необходимо иметь в виду следующие особенности.

Во-первых, снижение массы КА за счет конструктивных усовершенствований на базе используемых технологий вчерашнего дня, по оценкам разработчиков КА, имеет предел близкий к 100 – 150 кг.

Во-вторых, выполнение требований непрерывности, оперативности и глобальности, т. е. получение решения целевых задач принципиально нового качества, не может быть осуществлено без создания совершенных КС.

При этом, если идет речь о создании ОГ на базе микроспутников, то каждый из них будет выполнять определенную функцию в рамках единой программы. Таким образом, такая группировка может функционировать как единый, так называемый фрагментарный КА [8].

Например, к исследованию таких группировок приступило Управление DARPA (США), занимающееся проблемами создания фрагментарных спутников.

Такой подход имеет значительный выигрыш в том случае, когда целевая задача решается небольшой группировкой МКА (не более 8 – 10 спутников) и не требует заметного увеличения их числа в ОГ.

Например спутники связи на геостационарных орбитах или аппараты, обеспечивающие стратегическую связь на высокоэллиптических орбитах, справляются со своими задачами существующим числом КА и не требуют увеличения численности ОГ.

Там, где для повышения эффективности выполнения целевой задачи необходимо применение многоспутниковых группировок, то использование МКА может привести к отрицательному результату.

Это происходит из-за того, что уменьшение массы полезной нагрузки дает определенный экономический эффект, но не настолько, чтобы значительно увеличить количество КА в ОГ (например на порядок). В результате КС не получает нового качества.

Таким образом, снижение массы полезной нагрузки при возможном некотором увеличении эффективности выполнения целевой задачи можно считать положительным, однако, недостаточным моментом применения МКА.

Кроме того, увеличение числа МКА в ОГ имеет еще и недостаток, связанный с перегрузкой системы управления КС в условиях большого числа аппаратов и необходимости обработки больших объемов целевой информации.

Таким образом, суммарный эффект от применения МКА с одновременным увеличением их числа в ОГ без использования новейших технологий управления и информационных систем может оказаться не всегда оправданным. В этом случае необходима оптимизация МКА по массе и количеству в ОГ в зависимости от решаемой целевой задачи. А оптимизация по массе МКА связана в первую очередь с оптимизацией полезной нагрузки.

В связи с этим представляется, что главные проблемы создания перспективных КС МКА лежат, в основном, в области:

- создания новейших информационных технологий и средств управления;
- новых средств и схем выведения;
- разработки конфигурации ОГ как единого распределенного объекта;
- схем восполнения ОГ;
- создания системы показателей надежности и критериев эффективности;
- разработки оптимальных способов применения новых КС.

Среди задач, которые необходимо решать при создании новых КС на основе МКА, на первое место выходят следующие:

- разработка высокоэффективных источников энергии и систем ориентации и коррекции;
- обеспечение связи и повышение требований к управлению движением;
- увеличение запусков МКА и относительно частое восполнение ОГ.

Обеспечить связь трудно, так как на МКА нельзя установить мощные приемники и передатчики. Проблема управления движением обусловлена тем, что МКА, находящиеся на низких орбитах, требуют поддержания динамической устойчивости ОГ при известных ограничениях по массе как рабочего тела, так и двигательных установок (ДУ).

При этом решение данной проблемы должно идти в направлении:

- использования, по возможности, более высоких орбит за счет совершенствования систем связи и бортовой информационной аппаратуры;
- разработки принципиально новых микродвигателей;
- удешевления запусков МКА за счет использования принципиально новых средств выведения.

Системы управления новейших КС должны быть ориентированы в первую очередь не на поддержа-

ние работоспособности отдельного МКА и управления его технологическим циклом, а на оценку состояния ОГ в целом и обеспечение ее реконфигурации и использования по целевому назначению. Большое внимание должно быть обращено на автономность МКА за счет применения современных навигационных средств (определение положения центра масс, ориентации, надежности бортовых систем и др.) Кроме того, МКА должен производить на борту обработку всего массива данных и передавать наземным центрам приема, обработки и распространения целевой информации [8].

Ниже представляется уместным несколько подробнее остановиться на определении КС.

Космическая система, по существу, представляет собой, в определенном смысле, новый класс систем, поскольку является одновременно сложной и большой системой согласно классификации, принятой в теории систем [9].

КС обладает характерными специфическими признаками:

- распределенной конфигурацией;
- техническим и технологическим разнообразием;
- высокой степенью автоматизации;
- высоким удельным весом информационной составляющей.

Поскольку КС является по своему характеру распределенной системой, то имеет место непрерывное распределение МКА в ОГ.

Следовательно, для анализа процессов в такой системе возможно применение дифференциальных уравнений с частными производными первого порядка [10].

По совокупности признаков КС можно отнести к новому классу систем. Разработка всех элементов новых КС должна осуществляться в рамках единой системной концепции [11].

В этом случае существенно возрастает роль наземного сектора управления и на первый план, естественно, выходит единая автоматизированная система управления (АСУ), в которую, кроме бортового комплекса управления (БКУ) МКА, входит и центр управления полетом (ЦУП).

АСУ должна управлять не отдельным МКА, а всей ОГ и осуществлять оценку результатов функционирования КС в целом.

При этом система управления приобретает принципиально новую функцию, а именно разведения большого числа МКА по орбитам. Система должна обладать соответствующим модельным и математическим обеспечением.

Еще одной важной особенностью КС, в основном на основе микроспутников, является необходимое

наличие постоянно функционирующей в ЦУПе модели всей системы, включая многоспутниковую ОГ, которая должна непрерывно отражаться в режиме реального времени, контролировать ее состояние и прогнозировать выдачу необходимых управляющих воздействий.

Таким образом, ОГ представляет собой распределенный в пространстве искусственный многокомпонентный космический объект, названный ранее фрагментарным КА.

В новых КС управление одним большим фрагментарным КА заменяется управлением группировкой мини- и микроКА в целом.

Задача анализа и синтеза подобных технических систем заключается в определении параметров системы и ее основных характеристик, которые составляют группы так называемых целевых динамических характеристик [12].

К целевым характеристикам КС обычно относят такие характеристики или показатели (критерии), которые определяют ее возможности в решении задач по наблюдению заданных объектов.

К динамическим характеристикам системы наблюдения и ее элементов относят такие характеристики как состав КА в ОГ, их баллистические параметры, точностные, пространственно-временные, тактико-технические и эксплуатацион-

ные характеристики бортовых систем, их энерговооруженность, объемы памяти бортовых цифровых машин, их быстродействие и т. д.

Обобщенные параметры КС наблюдения и ее составные элементы представлены на рис. 5.

Параметры КС наблюдения, входящих в нее КА, бортовых служебных и информационных систем, объектовой (наземной) обстановки, метеоусловий, условий освещенности, наземного комплекса управления (НКУ), прием информации и средств выведения КА на орбиту можно характеризовать соответственно векторами $\bar{X}_1, \bar{X}_2 \dots \bar{X}_9$. Технические характеристики БКУ отображаются векторами \bar{Z}_j : система ориентации и стабилизации (СОС) – \bar{Z}_1 ; система автономной навигации (САН) – \bar{Z}_2 ; система передачи команд и программ (СПК) – \bar{Z}_3 ; бортовой информационный комплекс (БИК) – \bar{Z}_4 ; средства контроля орбиты – \bar{Z}_5 . Система электропитания (СЭС) КА отображается вектором \bar{Y}_3 .

Примем, что КС наблюдения в общем случае состоит из M аппаратов, расположенных в $N_{пл}$ плоскостях орбит, а взаимное расположение КА в системе определяется углом $\omega_{n,n-1}$ между плоскостями орбит ($n = 1, N$) и углом $\theta_{m(m-1)n}$, характери-



Рис. 5. Обобщенные параметры КС наблюдения и ее составные элементы

зующим взаимное расположение КА в n -й плоскости. Здесь $m = \overline{1, M}$, M_n – число КА в n -й плоскости. На борту КА, находящего на своей орбите с наклоном i_{mn} , высотой H_{mn} и периодом $(T_o)_{mn}$, устанавливается комплекс аппаратуры, состоящий из $(P_1)_{mn}$ информационных систем и $(P_2)_{mn}$ обеспечивающих служебных систем.

Задачи, которые необходимо решать КС наблюдения, можно характеризовать вектором (см. рис. 5)

$$\overline{\Phi}(T) = [F^*(T), k_1^*, k_2^* \dots k_{\xi}^*],$$

где $F^*(T)$ и k_{ξ}^* – предельные значения целевой функции $F(T)$ [13] и целевых характеристик k_{ξ} (показателей), которые необходимо достичь в процессе наблюдения наземных объектов за время T . Ограничения на процессы функционирования КА и сопутствующих систем можно задавать вектором ограничений на ресурс и режимы работы КА:

$$\overline{H} = (R_r, R_B, R_{\phi}),$$

где R_r – «главный» ресурс КА (например, вес, стоимость и др.); R_B – вектор ограничений на режимы работы бортовых информационных систем; R_{ϕ} – вектор ограничений на расход ресурса КА (расход рабочего тела, электроэнергии и т. д.).

Представим, что процесс решения КС задач по наблюдению наземных объектов характеризуется параметрами вектора:

$$\overline{Q} = (\overline{X}_1, \overline{X}_2 \dots \overline{X}_9).$$

Для удобства можно записать векторы \overline{X}_k и \overline{Q} ($k = \overline{1, 9}$) в следующем виде:

$$\overline{X}_k = (x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kl}),$$

где X_{kl} – значение l -го параметра вектора \overline{X}_k ($l = \overline{1, L_k}$);

$$\overline{Q} = \begin{pmatrix} \overline{X}_1 \\ \overline{X}_2 \\ \dots \\ \overline{X}_k \\ \dots \\ \overline{X}_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1l} & \dots & x_{1L_1} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2l} & \dots & x_{2L_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{k1} & x_{k2} & \dots & x_{kl} & \dots & x_{kL_k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{91} & x_{92} & \dots & x_{9l} & \dots & x_{9L_9} \end{pmatrix}.$$

Далее должна быть установлена связь:

$$Y = Y(\overline{Q}),$$

где $Y \subset A_1 = \{F(T), k_1, k_2, \dots, k_{\xi}, \dots\}$, и на её основе должны решаться: *задачи анализа* (прямые задачи), связанные, главным образом, с оценкой эффективности функционирования КС с заданными характеристиками в различных условиях их применения, влияния внешних условий, внутренних факторов и параметров КА и системы в целом на его эффективность; *задачи синтеза* (обратные задачи), связанные с оптимизацией состава системы и их основных технических характеристик [12].

Как упоминалось выше, еще одной существенной особенностью концепции МКА является необходимость снижения стоимости запуска с целью повышения экономической эффективности создания многоспутниковых ОГ.

Экономичность многоспутниковой ОГ определяется прежде всего стоимостью единичного аппарата. А стоимость запуска, естественно, является одним из существенных ее слагаемых.

В настоящее время реализуются три основных варианта запуска МКА средствами выведения на базе РН легкого (ЛК), среднего (СК) и тяжелого (ТК) классов:

- одиночный (целевой) запуск МКА;
- групповой запуск – когда одним носителем выводится два и более МКА (преимущественно для многоспутниковых систем с несколькими МКА в одной орбитальной плоскости);
- МКА в виде дополнительной полезной нагрузки к основному КА, выводимому РН (попутной).

Распределение запущенных за последние 8 лет МКА (1996 – 2003 гг.) различного класса РН и способам запуска представлено на рис. 6 и 7 соответственно [7].

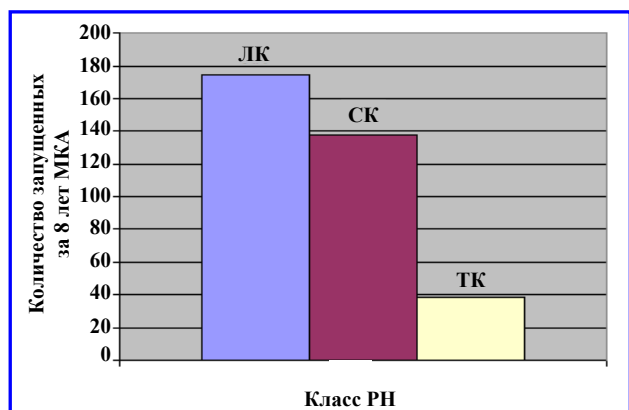


Рис. 6. Запуски МКА РН различного класса

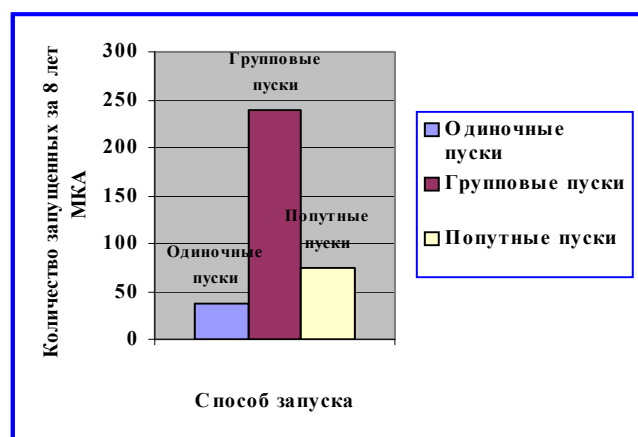


Рис. 7. Запуски МКА различными способами

На первых этапах работ по созданию МКА самыми рентабельными средствами запуска оправданно являлись российские конверсионные ракеты (МБР РС-18-РН «Стрела» и «Рокот»; МБР РС-19-РН «Днепр» и др.). Стоимость запуска находилась в пределах 8 – 14 млн. долл.

В качестве возможных средств выведения (СВ) МКА можно рассматривать отечественные РН легкого класса типа «Штиль-21» (ГЦ «КБ им. академика Макеева»), пуск которых производится из шахт подводных лодок, СВ на базе оперативно-тактических ракет (ОТР «Искандер»), а также различные авиационно- и аэростатнокосмические комплексы и специальные электродинамические ускорители.

Ниже подробно остановимся на двух последних вариантах указанных выше СВ.

Некоторые зарубежные специалисты отмечают, что в настоящее время существует единственная работоспособная система воздушного запуска – американская крылатая ракета-носитель (КРН) Pegasus. Первый старт ракеты состоялся 7 декабря 1989 г. С помощью КРН Pegasus выведены на орбиту малые ИСЗ DARPA и NASA. В марте 2007 г.

РН воздушного базирования Pegasus XL [14] успешно вывела на орбиту новый спутник AIM массой 200 кг.

Стоимость миссии AIM согласно опубликованным данным составила около 140 млн. долл., включая затраты на носитель и на запуск.

Авиационно-космические системы (АКС), использующие воздушный старт РН, обладают рядом преимуществ перед системами наземного старта, привязанными к ограниченному числу стартовых комплексов и оборудованных трасс запуска: расширением диапазонов азимутов пуска, меньшей потребной характеристической скоростью, доставкой РН самолётом-носителем в плоскость орбиты назначения, возможностью перелёта АКС по желанию заказчика на нужный аэродром для необходимой интеграции РН с полезной нагрузкой и запуском КА.

По оценкам специалистов [15] для запуска МКА массой до 150 и до 300 кг необходим ракетоноситель воздушного старта массой 10 – 17 т соответственно.

В некоторых работах анализируются перспективы создания МКА массой до 300 кг и средств их выведения на орбиту. Показано, что для индивидуального запуска таких КА целесообразно использовать легкие РН авиационного старта. Рассмотрены варианты использования ряда эксплуатируемых самолётов (МИГ-31, АН-26 и др.) в качестве первых ступеней АКС.

Удельные стоимости основных СВ легкого класса по данным ЦНИИМаш [7] сведены в табл. 2.

Новый проект воздушного запуска – «Высокий старт» представляет собой отечественный проект запуска сверхлегких КА и геофизических ракет с высотных дирижаблей. В случае успеха этого проекта в России может быть создан первый аэростатно-космический комплекс (АКК), способный относительно недорого выводить на орбиту частные микро- и наноспутники.

По расчетам специалистов масса транспортно-пускового контейнера вместе с ракетой составит около 350 кг, а масса выводимого в космос аппарата до 5 кг (стоимость запуска дирижабля оценивается в 150 тыс. долл.).

К недостаткам АКК относятся: невозможность придания ракете дополнительной скорости с помощью платформы-носителя; ограничение стартовой массы РН (для поднятия нескольких сотен килограмм на высоту запуска необходим объём аэростата в десятки, а то и сотни тысяч метров в кубе); существенное влияние ветра на движение системы и обеспечение безопасности экипажа.

К достоинствам относятся:

- возможность выбора места старта и отказ от зон отчуждения, связанных с падением отдельных частей РН;
- снижение аэродинамических потерь характеристической скорости;
- уменьшение гравитационных потерь за счет возможности увеличения тяговооруженности ступеней;
- возможность более раннего начала отработки оптимальной программы тангажа из-за малых ограничений по пространственному углу атаки.

В ряде публикаций рассматривается нетрадиционный, принципиально новый способ запуска малых и сверхмалых КА с помощью электричества, позволяющий значительно снизить затраты по выводу полезной нагрузки на орбиту. Группа специалистов из лаборатории «Sandia National» считает реальным создать весьма дешёвый способ доставки грузов на орбиту, используя вместо ракеты электромагнитный ускоритель (ЭМУ), как его иногда называют электродинамический ускоритель (ЭДУ) или просто соленоидная пушка (СП). По их мнению, в течение десятилетия может быть создана установка, способная выводить на орбиту грузы массой до 300 кг, причём затраты составят всего лишь несколько процентов нынешней стоимости доставки полезной нагрузки на орбиту.

Принципиально ЭМУ массы уже существуют, они называются рельсотронами, с их помощью не-

большие массы (0,3 кг) разгонялись до скорости несколько км/с. Известны и другие типы ЭМУ.

В основе различных вариантов ЭМУ лежит создание быстродвижущейся волны магнитного поля, которая в свою очередь генерирует вихревое электромагнитное поле (ЭМП) в индукторе, закреплённом непосредственно на полезной нагрузке. Взаимодействие указанных полей приводит к тому, что снаряд втягивается в движущееся магнитное поле (МП) и разгоняется вслед за ним. Электромагнитная пушка состоит из набора соленоидов, к которым последовательно прикладывается необходимое напряжение.

Быстро меняющееся МП инициирует электрические токи во внешней оболочке снаряда. В результате воздействие на снаряд наводимого в последовательно расположенных соленоидах МП приводит к его ускорению. При этом движущийся снаряд «висит» в ускоряющем его МП, не касаясь обмоток соленоидов.

Запускаемые с помощью ЭДУ наноспутники должны заменить большой и дорогостоящий КА, выводимый в космос один раз в несколько лет (в лучшем случае). В соответствии с предлагаемым проектом может осуществляться запуск многих, возможно 10 – 50 идентичных небольших и относительно недорогих КА ежегодно.

Таблица 2

Средства выведения	Грузоподъемность, кг	Удельная стоимость выведения, долл./кг	
		$H_{орб} = 225 \text{ км},$ $i = 51,6^\circ$	$H_{орб} = 700 \text{ км},$ $i = 9,8^\circ$ (солнечно-синхронная)
Россия			
АКС МИГ-31	300	5000	8000
РН «Космос 3М»	1400	8570	12900
РН «Рикша Р2»	975	11300	5500 Проект
РН «Рокот/Бриз Р»	1900	6300	15000
РН «Стрела»	1800	5500	13300 Проект
РН «Штиль 1Н», «Штиль 3Н»	430,670	139500,11950	32400,19500 Проекты
РН «Старт», «Старт 1»		11400	16700, 22200
США			
ВКК «Пегас XL»	575	24350	56000
ВКК «Пегас»	355	33800	75000
РН «Таурус»	1315	13770	25500
«Таурус-Ком»	1400	14770	25560
РН «Атэна 1»	700	22800	45500

Выводы

1. Рассмотрены концептуальные вопросы создания и применения МКА, показаны их преимущества перед тяжелыми КА.
2. Представлен широкий круг задач, решаемый с помощью МКА, в различных областях (науке, народном хозяйстве, разведке и военных действиях) на конкретных примерах, и показана целесообразность перехода от больших КА к малым КА.
3. Приведены особенности концепции МКА:
 - целесообразность применения нано- и пикоспутников исключительно в образовательных и научных целях, а также для опробования новых технологий;
 - использование МКА по целевому назначению без существенной модернизации космической техники ограничено массой 100 – 150 кг;
 - повышение эффективности выполнения целевых задач связано с использованием оптимизированных орбитальных спутниковых группировок из МКА;
 - главные проблемы создания перспективных КС МКА лежат, в основном, в области создания новейших информационных технологий и систем управления, включая разработку принципиально новых микродвигателей;
 - перспективность создания и использования новейших средств выведения МКА, включая РН легкого класса, авиационно-космические системы, аэростатно-космические комплексы и нетрадиционные средства в виде электромагнитных ускорителей массы для запуска малых и сверхмалых КА.

Литература

1. Keynote Address. The enigma of small satellites for earth observation // Acta Astronautica. – 1996. – Vol. 39. – № 9 – 12.
2. Международные тенденции создания и эксплуатации малых космических аппаратов / В.И. Лукьященко, В.К. Саульский, В.А. Шучев [и др.] // III Международная конференция – выставка «Малые спутники» 27 – 31 мая 2002. г. Королев, Моск. обл. ЦНИИМАШ. – Кн. 1.
3. Малые ИСЗ стран мира. Обзор. – М: НТЦ «Компас», 1996.

4. Анализ состояния работ по МКА наблюдения и возможностей использования их в интересах мониторинга природной среды / Ю.Г. Пичурин // Труды НИИ космических систем. – 2000.
5. Mars Program Independent Assessment Team (MPIAT) report. // National Aeronautics and Space Administration, California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory, Media Relations office, Pasadena, Calif. 91109, April, 4, 2000. – California, 2000. – URL: <http://www.jpl.nasa.gov>.
6. Гершензон Е.В. Обзоры по микроспутникам «Технологические малыши завоевывают космос» [Электронный ресурс] // Сайт МГТУ им. Н.Э. Баумана Проект студенческого микроспутника. – М., 2008. – Режим доступа: <http://microsat.sm.bmstu.ru/source/mreview.html>, свободный.
7. Анализ космического рынка малых спутников и средств их выведения / Вахниченко В.В., Осадченко А.С., Ромашкин А.М. // 3-я Международная конференция – выставка по малым спутникам. – М.: ЦНИИМАШ, 2002.
8. С.В. Стреж. Технологические проблемы и направления исследования в области создания перспективных космических систем нового поколения // 8-й Международный форум «Высокие технологии XXI века. ВК «Экспоцентр». – М., 2009.
9. Общая теория систем: пер. с англ. / под редакцией В.Я. Алтайского. – М.: Мир, 1966.
10. Камке Э. Справочник по дифференциальным уравнениям в частных производных первого порядка / Э. Камке. – М.: Наука, 1966. – 260 с.
11. Е.В.Трошин. Космические системы на базе сверхмалых аппаратов – новый класс систем // 8-й Международный форум «Высокие технологии XXI века. ВК «Экспоцентр». – М., 2009.
12. Ханцеверов Ф.Р., Остроухов В.В. Моделирование космических систем ИПРЗ / Ф.Р. Ханцеверов, В.В. Остроухов. – М.: Машиностроение, 1989.
13. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров): пер. с англ. / Г. Корн, Т. Корн – М.: Наука, 1973. – 832 с.
14. Малоразмерные авиационно-космические системы – перспективное средство выведения легких полезных нагрузок / В.В. Балашов, Е.А. Свириденко, А.В. Смирнов. // Труды XXIV Академических чтений по космонавтике.
15. Б.Х. Давидсон. Авиационно-космические системы для запуска малых КА // Труды МФТИ. – М., 2005.

Поступила в редакцию 18.02.2010

Леонид Алексеевич Макриденко, д-р техн. наук, генеральный директор-генеральный конструктор, т. 365-56-10, e-mail: vniiem@orc.ru.

Сергей Николаевич Волков, д-р техн. наук, 1-й зам. генерального директора-генерального конструктора, т. 366-42-56, e-mail: vniiem@orc.ru.

Владимир Павлович Ходненко, д-р техн. наук, начальник лаборатории, т. 624-94-98, e-mail: vniiem@orc.ru.

Сергей Анатольевич Золотой, канд. техн. наук, директор, e-mail: zolotoy@itk2.basnet.by.