

Обзор характеристик и методов создания группировки малых космических аппаратов

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»*

Рассмотрены типовые задачи, решаемые группировками МКА. Определены преимущества группировки МКА. Дано математическое описание формирования группировки для рационального управления двигательными установками в случае построения группировки с высокой точностью размещения. Предложены алгоритмы выведения и построения группировки МКА с помощью диспенсера. Проведен анализ двигательных установок и обоснован выбор электроракетного двигателя для МКА. Сформирована структура управления двигателем коррекции МКА. Рассмотрен пример группировки малых космических аппаратов дистанционного зондирования земли RapidEye на базе электроракетных двигателей МКА.

Ключевые слова: малый космический аппарат, группировка, кластерный запуск, диспенсер, алгоритм построения, электроракетный двигатель.

Введение

Современные требования и задачи, предъявляемые к космическим аппаратам (КА), постоянно возрастают. Широкий спектр вопросов, принципиально недоступный ранее, сейчас решается группировкой спутников и распределением подзадач внутри группы. Достигнутые технологии позволяют организовать группировку — совместную работу нескольких однотипных КА, находящихся в близких орбитальных позициях. Кроме того, группировка может быть организована при использовании основного тяжелого спутника с высокой энерговооруженностью и технологической насыщенностью в связке с малыми аппаратами. Но в любом случае реализуется преимущество наличия малых спутников в группировке. Современные электронные системы (компьютерные, связи, оптические, навигационные) являются энергоэкономичными, компактными и легкими, что позволяет устанавливать их на микрокосмические аппараты (МКА) для решения сложных космических задач. При этом малая масса и габариты имеют экономическое преимущество, позволяя осуществлять старт одновременно нескольких аппаратов — «кластерный запуск», т.е. выведение группы спутников одной ракетой-носителем (РН), что позволяет удешевить запуск каждого спутника в группе. Формирование группировки возможно также «попутным запуском», с разделением от основного спутника или пилотируемого космического объекта [1]. «Попутный запуск» зачастую экономичнее «кластерного», поскольку основную стоимость покрывает запуск большого КА, а запас массы реализуется микроаппаратом или их группой. Однако существуют и недостатки такого запуска. Не всегда возможно найти подходящий спутник с необходимой орбитой или близкой к ней. Массу полезной нагрузки МКА попутчика выбирают по остаточному принципу. К тому же ожидание пуска такого спутника может занять длительное время.

Из применяемых методов создания спутниковой группировки можно выделить: разделение оконечной ступенью ракеты-носителя (доразгонным

блоком), диспенсером – «раздатчиком» спутников по орбитальному положению или собственными двигательными установками малых космических аппаратов. Особенностью формирования спутниковой группировки является то, что точность и время расстановки спутников в орбитальные позиции, а соответственно и качество поставленной целевой задачи тесно связаны с динамическими характеристиками двигателей конечных ступеней ракеты-носителя — доразгонных блоков, либо диспенсера, либо характеристик двигательных установок, установленных непосредственно на спутниках. Неоспоримым преимуществом группировки МКА на этапе создания и в процессе эксплуатации является одновременный старт и малые сроки формирования группировки. Время создания группировки МКА — от нескольких десятков минут до трех лет, что выгодно отличается по сравнению с мини-спутниками (3-7 лет) и большими (5-10 лет). Сокращение сроков создания группировки МКА приводит к скорейшей окупаемости в решении поставленной целевой задачи. Потеря одного или нескольких спутников в процессе эксплуатации группировки, где малые массы позволяют создать резерв, приводит только к более медленному времени решения задач. При этом потеря единичного мини-или большого спутника при эксплуатации ведет к провалу всей миссии.

Таким образом, формирование спутниковой группировки в современных космических исследованиях является актуальной задачей, которая включает в себя выдерживание требований точности и синхронизации орбитальной позиции, допустимого рассогласования углового положения, допустимого времени формирования с ограничением по стоимости в соответствии с целевым назначением. Это требует рациональных, а для ряда применений оптимальных подходов к средствам, т.е. двигательным установкам и алгоритмам формирования, бортовым сенсорным и вычислительным ресурсам, методам распределения энергии силовых установок конечных ступеней ракет-носителей, диспенсеров или космических аппаратов.

Основная часть

Задачи спутниковой группировки. Каждая группировка спутников нуждается в описании. Описание включает в себя задачи, решаемые группировкой, обоснование использования группировки, вопросы, решаемые при формировании группировки, классификацию видов группировок.

К типовым задачам, решаемым группировками МКА, относят: дистанционное зондирование земли, многодиапазонную съемку, техническое обслуживание КА на орбите; демонстрацию технологий, калибровку наземных средств наведения, исследование свойств околоземного пространства и т.д. [2].

Независимо от типа группировки основной задачей в ее формировании является размещение нескольких однотипных космических аппаратов в заданных орбитальных позициях с требуемой точностью, заданным угловым положением с ограничением по времени формирования и стоимости.

Условия формирования. Экономическое преимущество группировки МКА над одиночным дорогим аппаратом — это способность работать в строго оговоренных рамках программ. Преимущества группировки МКА:

- повышение надежности. При работе сразу нескольких спутников в рамках скоординированной программы возможная потеря одного аппарата не ведет к срыву всей миссии;

- оперативность. Одиночные спутники высокого разрешения не способны получать оперативную информацию по заданным координатам, поскольку период повторения сеанса в случае неудачи большой;

- отработка новых технологий. Развертывание группировки МКА происходит постепенно. Последующие запуски выводят на орбиту более высокотехнологичные спутники, при этом замещая собой старые, отработавшие свой ресурс [4].

Группировка спутников имеет отличительную особенность, а именно автономное и групповое автоматическое взаимодействие и функционирование МКА.

Вопросы, решаемые при формировании группировки спутников [5]:

- автономное и групповое маневрирование МКА на орбите;
 - построение и управление группировкой МКА, баллистико-навигационное обеспечение (БНО);

- выбор способа выведения на орбиту группировки МКА;
 - минимизация запаса топлива для двигательных установок группировки МКА;

- стандартизация и унификация систем МКА;

- комплексирование основных систем МКА;

- перераспределение штатных подсистем [6].

Основным требованием к формированию является создание орбитальных позиций спутников в группировке с соответствующими кеплеровыми элементами и орбитальным временем:

$$F_{kep} = f(h_a, e, i, \Omega, \omega, M_o) \tau,$$

где h_a — высота апогея, e — эксцентриситет; i — наклонение орбиты; Ω — восходящий узел орбиты; ω — аргумент перигея; M_o — центральная аномалия; τ — орбитальное время.

Данные параметры обеспечиваются прежде всего ракетой-носителем или ее оконечными ступенями и могут «дорабатываться» диспенсерами или собственными двигательными установками космических аппаратов при малых уровнях рассогласования.

Вторым требованием является формирование функции углового положения космических аппаратов в группировке [12]:

$$u^T = f(l, \varphi, \nu, \psi, X, Y, Z) \tau,$$

где l — вектор углового положения; φ — угол тангажа; ν — угол рыскания; ψ — угол крена; X, Y, Z — связанная система координат; τ — орбитальное время.

В задачах данного класса функция формируется за счет активной системы угловой ориентации и стабилизации, как правило, ортогонально связанных маховиков, что обеспечивает и высокую точность, и малое время приведения главного вектора и вектора тяги спутниковой или диспенсерной двигательной установки к заданным угловым координатам.

Третьим требованием является создание тяги в заданных угловых координатах, которое требует применения анализа вращения связанной системы координат и для вычислительных возможностей малых космических аппаратов может быть выполнено с применением кватернионов. В этом случае основное уравнение характеризует направление и величину вектора тяги:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{F}{m} - \frac{d^2 \rho}{dt^2} = w,$$

где r — радиус вектор материальной точки в системе координат X ; F — главный вектор активных сил, действующих на материальную точку, включая вектор тяги; ρ — вектор характеризующий положение начала системы координат; w — вектор ускорения материальной точки.

В форме кватернионов, описывающей вращение новой системы координат Y относительно X , это дифференциальное уравнение может быть записано следующим λ_+^0 образом:

$$2 \frac{d\lambda_+^0}{dt} = \lambda_+^0 \circ \omega_y + \lambda_o w_y = \lambda_+^0 \circ \omega_y + w_x \circ \lambda;$$

$$2 \frac{d\lambda^o}{dt} = \lambda^o \circ \omega_y + 2\lambda_+^o; \quad 2 \frac{d\lambda}{dt} = \lambda \circ \omega_y,$$

где λ_+^o , λ^o — кватернионные переменные, ω_y , w_y , w_x — гиперкомплексные отображения угловой скорости и ускорений системы координат Y относительно X , \circ — кватернионное произведение.

Таким образом, условия формирования предусматривают управление движением космического аппарата с помощью двигательной установки до достижения заданной орбитальной позиции отдельным спутником в группировке и их взаимосвязью в заданных координатах как при формировании диспенсером, так и автономными двигательными установками МКА. При этом угловое положение вектора тяги формируется с помощью отдельной активной системы ориентации и стабилизации космического аппарата.

Методы построения группировок. Взаимозависимое пространственное и временное движение группировки МКА управляется конфигурированием положения. Это возможно благодаря обмену данными и приданию МКА способности к согласованному программному изменению параметров своей орбиты в рамках запасов и допусков в соответствии с характеристиками орбит и аппаратов. Для этого в качестве актуаторов применяют активные системы стабилизации и ориентации с маршевой двигательной установкой [7].

В сложившихся условиях формирования спутниковых группировок можно классифицировать их виды (рис. 1):

- «строй» — группировка спутников постоянно упорядоченных друг относительно друга в пространстве. Каждый МКА придерживается заданного программного положения относительно других МКА в группировке [8];

- «рой» — группировка спутников переменного во времени строя в пределах программных границ группировки.

С учетом траекторных параметров (высота полета и наклонение группировки), рассмотренных в работе [9], классификация может быть дополнена орбитальным разделением, где выделяют:

- опорную орбиту — траектория полета группировки МКА как единого аппарата;

- центральный МКА — МКА, относительно которого остальные члены группировки координируются и выстраиваются для поддержания конфигурации.

С учетом иерархии построения также можно идентифицировать участников группировки [10], которые разделяют на следующие виды:

- лидер – МКА, управляющий пространственным положением всей группировки;

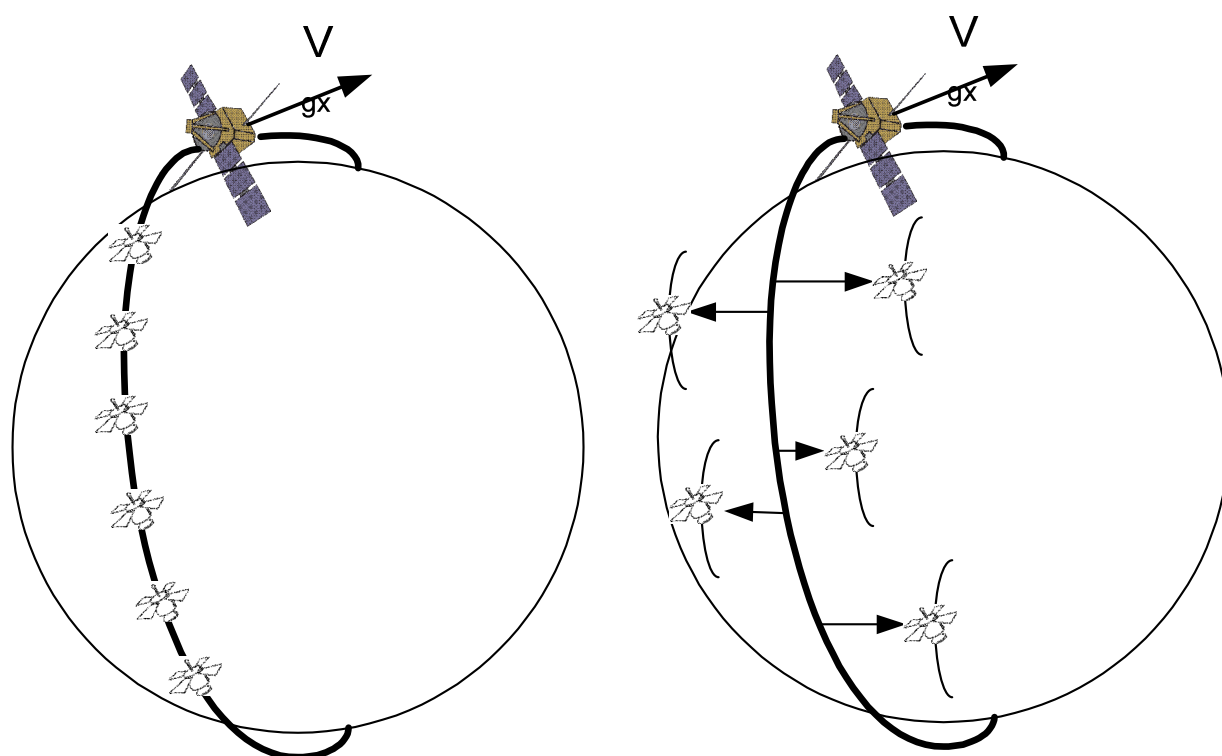
- ведомый – МКА, координирующий свое положение в группировке относительно лидера.

По возможности совершения маневра членами группировки спутники подразделяют на такие:

- активный — аппарат, способный совершать маневры;

- пассивный — аппарат без возможности совершения маневров.

В зависимости от вида группировки методы построения можно разделить на два типа: централизованный и децентрализованный. Первый характерен для применения управляемой оконечной ступени или диспенсера, второй – для активных космических аппаратов, он более сложный по алгоритму, но позволяет более точно скорректировать орбитальное положение.



Формирование группировки «строй»

Формирование группировки «рой»

Рис. 1. Виды группировок МКА

Алгоритмы построения группировок. Таким образом, для предложенных типов группировок можно сформировать ряд алгоритмов построения, которые в целом содержат этапы:

- выведение на опорную орбиту диспенсера в виде оконечной ступени ракеты-носителя, доразгонного модуля или космического буксира с энергодвигательной установкой;

- формирование углового положения диспенсера и последовательное разделение микроспутников упругими толкателями для варианта активных космических аппаратов или дополнительная коррекция траектории с помощью двигателей диспенсера и последующее разведение пассивных спутников;

- коррекция орбитального положения активных микроспутников собственными двигателями коррекции;

- увод диспенсера с опорной орбиты для выполнения ряда возможных задач по группировке: применение диспенсера в виде ретранслятора, лидера, заправщика, эвакуатора группировки или его утилизация как космического мусора.

В общем случае алгоритм построения группировки диспенсером может быть представлен в виде схемы (рис. 2). Здесь предусматривается программно-аналитическое взаимодействие сенсорной группы диспенсера, актуаторов углового положения, направления и тяги маршевого двигателя и толкателей разделения микроспутников с нормированным ускорением к расчетному орбитальному положению, что обеспечивается определенной структурой управления двигателем коррекции (рис. 3).

С учетом необходимости взаимодействия разнородных устройств важным является минимизация энергетических затрат при ограничениях на время анализа и стоимость специализированного программного обеспечения бортового компьютера или контроллера двигательной установки.

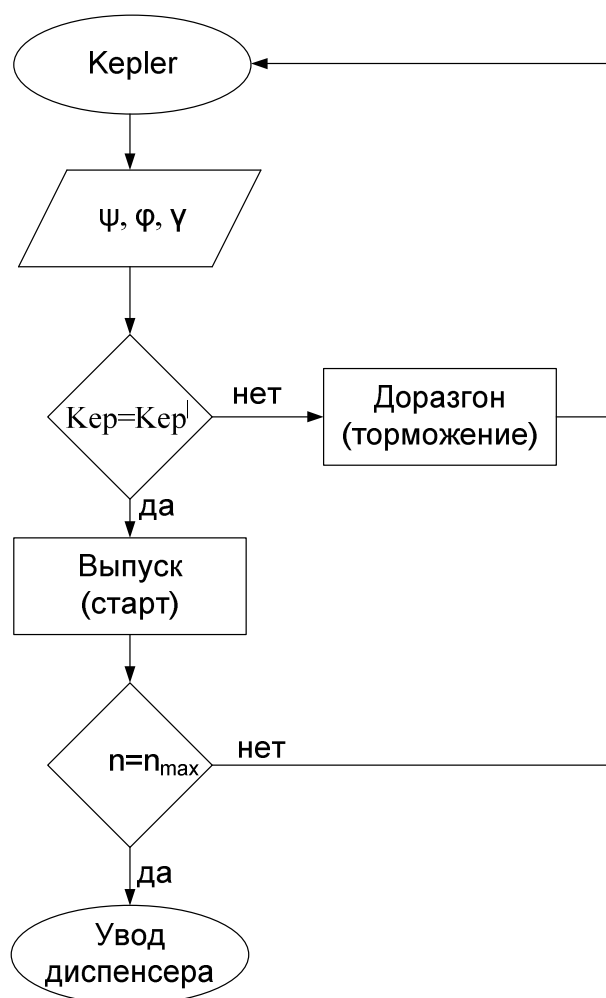


Рис. 2. Алгоритм построения группировки МКА с помощью диспенсера

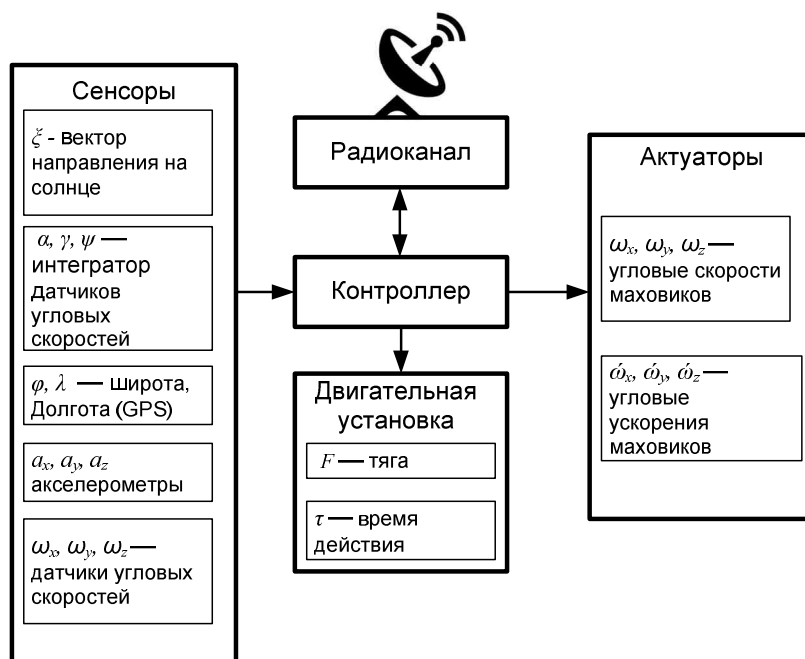


Рис. 3 Структура управления двигателем коррекции МКА

Постановка задачи. Таким образом, задача построения группировки диспенсером как для активных, так и для пассивных спутников, может быть разделена на две части — программно-аналитическую, учитывающую чувствительность и динамические свойства сенсоров и актуаторов, и физическую, учитывающую тяговые характеристики двигателей коррекции, в том числе суммарную удельную тягу и динамические параметры, а также динамические свойства механизмов отделения. Для активных спутников кроме названных параметров как в диспенсере, так и в аппарате учитываются характеристики радиоканала и доплеровские смещения, что усложняет задачу, но позволяет значительно повысить точность формирования орбитальной группировки и обеспечить маневренность. Поэтому в целом задача сводится к рациональному управлению двигательной установкой для достижения заданного орбитального положения.

Электроракетные двигатели в группировке. Из постановки задачи следует, что практическое выполнение требований по созданию группировки лежит в плоскости применения двигателей малых тяг. Если для окончательных ступеней ракет-носителей или доразгонных модулей задача формирования группировки однозначно выполняется с применением микроЖРД, то для автономных диспенсеров или активных МКА по ряду причин рациональнее применение или газореактивных для краткосрочных задач, или электрореактивных двигательных (ЭРД) установок для более длительного срока активного существования. Ограничивающим фактором применения ЭРД на микроспутнике выступает несогласованность энерговооруженности малого космического аппарата и относительно нее высокое энергопотребление двигателя. Однако, создание и отработка малых двигателей типа СПД-12, СПД-20 [14], применение электронагревных двигателей и электродуговых [17, 19], создание на их базе энергодвигательных модулей [18], позволяет найти технические решения, удовлетворяющие задачам активных спутников. Решение

задачи «расстановки» пассивных спутников эффективно в области создания энергодвигательного диспенсера на основе электроракетных двигателей более высокой мощности, например СПД-100 [15]. Разработки такого двигателя с повышенной эффективностью и применение принципа прямого электропитания [16] создают условия для многофункционального универсального энергодвигательного модуля и нового подхода к спутниковым группировкам, включая возможность ретрансляции, дозаправки, утилизации.

Существующие технические решения. Примером группировки МКА является группировка спутников ДЗЗ RapidEye [11]. Пять спутников массой 150 кг каждый решают задачу многодиапазонной съемки и исследования околоземного пространства, для чего каждый спутник группировки оснащён мультиспектральной оптико-электронной камерой производства Jena-Optronik.

Кластерный запуск осуществлялся РН «Днепр» с площадки Байконур. Спутники равномерно распределены на орбите. Оперативность информации со спутников определяется тем, что они облетают Землю с севера на юг и пересекают экватор в 11 часов по местному солнечному времени с дистанцией около 660 км и интервалом в 20 минут.

Группировка спутников ДЗЗ RapidEye движется упорядоченно по орбите, образуя «строй». Отличительной особенностью спутников в группировке является наличие на каждом из них электронагревной двигательной установки с ксеноном в качестве рабочего тела, т.е. спутники являются активными. Двигатель обеспечивает удельную характеристику I_{sp} в диапазоне 50...100 с при тяге 10...100 мН, что обеспечивает приращение скорости ΔV до 35 м/с для полной массы аппарата. В системе хранения и подачи рабочего тела применен сферический бак объемом 7,4 дм³ с массой газообразного Хе 12 кг при давлении 70 бар. Электрическая мощность силовой установки составляет до 30 Вт.

К задачам двигательной установки относят компенсацию аэродинамического сопротивления и точное фазирование орбиты группировки, т.е. каждого спутника относительно состава группировки [20].

Таким образом, разработчики применили техническое решение, позволяющее максимально повысить точность формирования группировки и ее устойчивость, но при этом увеличен запас системы, что, с одной стороны, увеличило массу, но с другой, позволило продлить срок активного существования с 7 до 10 лет.

Заключение

Рассмотренные особенности группировок МКА позволяют определить круг решаемых задач. Классификация группировок дает возможность вычленить особенности для ряда подзадач и необходимости применения двигательных установок на отдельных спутниках и формализации типов двигателей для диспенсера. Математическое описание формирования группировки создает условия рационального и для ряда применений оптимального управления двигательными установками с высокими удельными характеристиками для построения группировки с высокой точностью. Основной сложностью при решении задачи будет динамический анализ и совмещение динамических характеристик сенсоров, актуаторов и двигателей.

Существующее техническое решение в группировке МКА ДЗЗ RapidEye позволяет сделать вывод о высокой эффективности применения двигателей

коррекции на отдельных спутниках группировки с учетом высокой точности диспенсера. Аналитическое исследование эффективности такого решения с применением двигателей с более высокими показателями можно будет верифицировать по показателям существующей системы RapidEye.

Список литературы

1. Овчинников, М. Ю. Малые мира сего [Текст] / М. Ю. Овчинников // Компьютерра – 2007. — № 15. — С. 37 - 43.
2. Палкин, М. В. Концептуальные вопросы создания и применения космических аппаратов группового полета [Электронный ресурс] / М. В. Палкин. – Режим доступа <http://scimgtu.elpub.ru/jour/article/view/211/213>. — 02.01.2017.
3. Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли [Текст] / Н. Н. Севастьянов, В. Н. Бранец, В. А. Панченко, и др. // Сборник статей МФТИ. – 2009. – Т.1. – №3. — С. 153 – 166.
4. Dan Ward. Faster, Better, Cheaper Revisited. Program Management Lessons from NASA / Defense AT&L. – 2010. – P. 48 — 52.
5. Черный И. Н. Мечтатели из DARPA [Электронный ресурс] / И. Н. Черный – режим доступа <http://novosti-kosmonavtiki.ru/mag/2013/869/>. - 02.01.2017
6. Палкин, М. В. Повышение эффективности летательных аппаратов путем перераспределения ресурсов штатных подсистем [Электронный ресурс] / М. В. Палкин. – режим доступа <http://technomag.edu.ru/doc/325917.html>. - 02.01.2017
7. Макриденко, Л. А. Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов [Текст] / Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, В. П. Ходненко // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. [Текст] 2010. — Т. 114. — С. 15 — 26.
8. Лисов, И. Наноспутники полетят [Текст] / И. Лисов // Новости космонавтики. – 2015. - №3.- С. 59.
9. Лысенко, Л. Н. Теоретические основы баллистико- навигационного обеспечения космических полетов [Текст] // Л. Н. Лысенко, В. В. Бетанов, Ф. В. Звягин // Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. [Текст] 2014.— С. 518 — 522.
10. Gill E. Autonomous Formation Flying for the PRISMA Mission / E Gill, O. Montenbruck, S. D'Amico // Journal of Spacecraft and Rockets. — 2007. — Vol. 44. — P. 671 — 681. — 02.01.2017
11. Дворкин, Б. А. Группировка спутников ДЗЗ RapidEye: уникальные возможности для решения задач мониторинга [Электронный ресурс] / Б. А. Дворкин - режим доступа http://old.geomatica.ru/pdf/2009_03/2009_03_002.pdf. - 02.01.2017
12. Челноков Ю. Н. Кватернионные модели и методы динамики, навигации и управления движением [Текст] / Ю. Н. Челноков. — М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2011. – 560 с.

13. Агеева, Е. Г. Формирование структуры энергодвигательного модуля для малых космических аппаратов на базе стационарного плазменного движителя [Текст] / Е. Г. Агеева, С. В. Губин // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. Вып. 57. — Х., 2012. — С. 153-159 : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им Н.Е. Жуковского «ХАИ».

14. Лоян, А. В. Моделирование трехмерного течения плазмы в СПД малой мощности. [Текст] / А. В. Лоян, С. С. Левин, Ю. К. Чернышов // Авиационно-космическая техника и технология. — 2009. — № 10. — С. 190-193.

15. Лоян, А. В. Анализ конструкции стационарного плазменного двигателя типа СПД-100 на стартовые нагрузки [Текст] / А. В. Лоян, А. И. Цаглов, Писаный А. И. // Авиационно-космическая техника и технология. — 2016. — № 7 — С. 117-120.

16. Лоян, А. В. Исследование возможности непосредственного электропитания (без промежуточных преобразователей) двигателя холловского типа от высоковольтной батареи фотоэлектрической [Текст] / А. В. Лоян // Авиационно-космическая техника и технология. — 2015. — № 9. — С. 103-107.

17. Губин, С. В. Энергодвигательный модуль малого космического аппарата с графеновым накопителем рабочего тела [Текст] / С. В. Губин, А. С. Долгов, Ю. Л. Жабчик // Авиационно-космическая техника и технология. — 2015. — № 3. — С. 67-72.

18. Губин, С. В. Анализ функциональных возможностей энергодвигательного модуля для малых космических аппаратов [Текст] / С. В. Губин, И. Г. Бурым // Авиационно-космическая техника и технология. — 2014. — № 2. — С. 109-112.

19. Корельский, А. В. Моделирование процессов нагрева рабочего тела в аммиачном ракетном двигателе [Текст] / А. В. Корельский, В. Л. Джеппа, В. М. Дураченко // Авиационно-космическая техника и технология. — 2010. — № 10. — С. 79-82.

20. RapidEye Earth Observation Constellation [Электронный ресурс] / режим доступа <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/r/rapideye#space>.

Поступила в редакцию 16.03.2017

Огляд характеристик і методів створення угруповання малих космічних апаратів

Розглянуто типові завдання, які вирішуються угрупованнями МКА. Визначено переваги угруповання МКА. Дано математичний опис формування угруповання для раціонального управління руховими установками в разі побудови угруповання з високою точністю розміщення. Запропоновано алгоритми виведення і побудови угруповання МКА за допомогою диспенсера. Проведено аналіз рухових установок і обґрунтовано вибір електроракетного двигуна для МКА. Сформовано

структуру управління двигуном корекції МКА. Розглянуто приклад угруповання малих космічних апаратів дистанційного зондування землі RapidEye на базі електроракетних двигунів МКА.

Ключові слова: малий космічний апарат, угруповання, кластерний запуск, диспенсер, алгоритм побудови, електроракетний двигун.

Overview of the Characteristics and Methods of Creating a Grouping of Small Spacecraft

Typical problems solved by the MSC groupings are considered. The advantages of the MSC grouping are determined. A mathematical description of the formation of a group for the rational management of propulsion systems is given in the case of constructing a grouping with high accuracy of location. Algorithms for deducing and constructing an MSC grouping using a dispenser are proposed. The analysis of propulsion systems is carried out and the choice of the electric propulsion engine for MSC is justified. The structure of engine control correction MSC is formed. An example of a grouping of small space vehicles for remote sensing of the Earth RapidEye based on MSC electric rocket engines is considered.

Key words: small spacecraft, grouping, cluster launch, dispenser, construction algorithm, electric propulsion system

Сведения об авторах:

Погудин Андрей Владимирович – аспирант кафедры космической техники и нетрадиционных источников энергии Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

Губин Сергей Викторович – кан. техн. наук, профессор кафедры космической техники и нетрадиционных источников энергии Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.