

## ПОСТРОЕНИЕ КЛАСТЕРОВ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В. Ю. КЛЮШНИКОВ

*Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, 141070, Королев, Россия  
E-mail: klyushnikovvy@tsnimash.ru*

Представлены типы кластерных группировок малых космических аппаратов (МКА) и способы их построения. Рассматриваются два основных класса: с равномерным распределением целевой функции между множеством однотипных космических аппаратов в кластере (распределенный космический аппарат) и с пространственным распределением (разнесением) функциональных модулей одного космического аппарата (фрагментированный космический аппарат). В обоих случаях элементы кластера связаны друг с другом по радиоканалу и функционируют согласованно. Показано, что развертывание кластеров МКА простимулирует рынок легких и сверхлегких средств выведения, даст импульс развитию и совершенствованию принципиально новых технологий, в том числе молекулярных и атомных нанотехнологий.

**Ключевые слова:** *малый космический аппарат, кластер, распределенный космический аппарат, фрагментированный космический аппарат, целевая функция*

Направлением развития малых космических аппаратов (МКА), помимо дальнейшей микроминиатюризации, является построение из отдельных аппаратов орбитальных структур и, в частности, кластеров. Объединение в кластеры позволяет существенно расширить функциональные возможности МКА, повысить их надежность и живучесть.

Под кластером следует понимать совокупность однотипных МКА или МКА различного целевого назначения, совместно решающих общую задачу и воспринимаемых потребителем космических услуг как единое целое („виртуальный“ космический аппарат). Орбитальные группировки полноразмерных КА и МКА, решающие общую задачу, как правило, нельзя называть кластерами, поскольку в них отсутствует непосредственная связь между КА или эту связь обеспечивает наземный центр управления либо специальный комплекс.

Любая система обладает свойством эмерджентности, заключающимся в несводимости свойств системы к свойствам элементов, из которых она состоит. В кластерах МКА эмерджентность проявляется особенно ярко. В настоящей работе показано, что кластер МКА обладает новыми свойствами и качествами, не присущими отдельно взятым МКА, входящим в его состав.

Исходя из полученных теоретических и практических результатов в области построения спутниковых систем можно выделить следующие типы кластеров МКА:

- 1) распределенный космический аппарат — система МКА на орбите, в которой целевая функция равномерно распределена между множеством однотипных космических аппаратов;
- 2) фрагментированный космический аппарат — система МКА на орбите, в которой каждый космический аппарат имеет свое узкое функциональное назначение.

Идея распределенного КА, предложенная в работах [1—3], предполагает распределение целевой функции между отдельными МКА и ее последующий синтез. Очевидно, что для этого МКА в кластере должны функционировать в высшей степени согласованно.

Кластер типа „распределенный космический аппарат“ должен обладать следующими признаками:

1) состоять из множества однотипных МКА одинаковой размерности („фемто“, „пико“ или „нано“) и, например, из двух-трех специализированных аппаратов большей, по сравнению с остальными, размерности (в частности, такой кластер может быть использован для сбора и увода на Землю „космического мусора“);

2) множество МКА образует распределенную беспроводную вычислительную систему/сеть с возможностью „облачных“ вычислений;

3) каждый МКА выполняет заданную часть целевой функции, соответствующую типовым задачам полноразмерных КА (прием и передача данных, дистанционное зондирование Земли и космоса в различных спектральных диапазонах и т.д.);

4) кластер способен динамически поддерживать и менять свою пространственную структуру за счет управляемого движения отдельных МКА;

5) части целевой функции отказавшего МКА перераспределяются между работоспособными МКА;

6) неисправные МКА и их фрагменты — „космический мусор“ — собираются специализированными МКА для последующего увода в плотные слои атмосферы или уводятся за счет использования собственных возможностей.

Чем больше в структуре элементов — МКА — и чем меньше размерность (не в ущерб функциональности), тем выше надежность и живучесть распределенного КА, проще и дешевле изготовление и запуск МКА для него. Следует заметить, что уже появляются способные выполнять целевую функцию прототипы МКА размерности „фемто“ (массой до 100 г) [4].

Современный уровень развития микроэлектроники и микроэлектромеханических систем (МЭМС) обеспечивает реальные предпосылки для создания распределенного космического аппарата.

Некоторые планируемые и реализуемые в настоящее время проекты космических систем можно интерпретировать как отработку элементов распределенного КА. Так, например, на 2016 г. Израиль наметил развертывание системы из трех МКА SAMSON (Space Autonomous Mission for Swarming and Geolocation with Nanosatellites, Автономная космическая миссия по синхронному полету и геолокации с помощью наноспутников) размерности „нано“, разработкой которых занимается фирма „Технион“ совместно с концернами „Израильская авиационная промышленность“, „Рафаэль“ и „Эльбит Маарахот“ [5]. Главная задача проекта — доказать, что система из трех наноспутников может работать в течение длительного времени в полуавтономном режиме. Один из наноспутников будет играть роль лидера, два остальных — роль ведомых. Предусматривается согласованное маневрирование спутников на орбите (сближение—удаление) с выдерживанием максимального удаления друг от друга не более 250 км.

Фрагментированный космический аппарат — система МКА (модулей), собранных в информационную сеть при помощи беспроводной связи и способных объединять информационные и аппаратные ресурсы для выполнения заданной целевой функции.

В отличие от распределенного КА и от используемых многоспутниковых орбитальных группировок, „фрагментированные“ КА не однотипны: каждый элемент кластера выполняет одну из служебных или целевых функций систем полноразмерного КА (вычисления, связь с наземным пунктом управления) или же несет целевую аппаратуру.

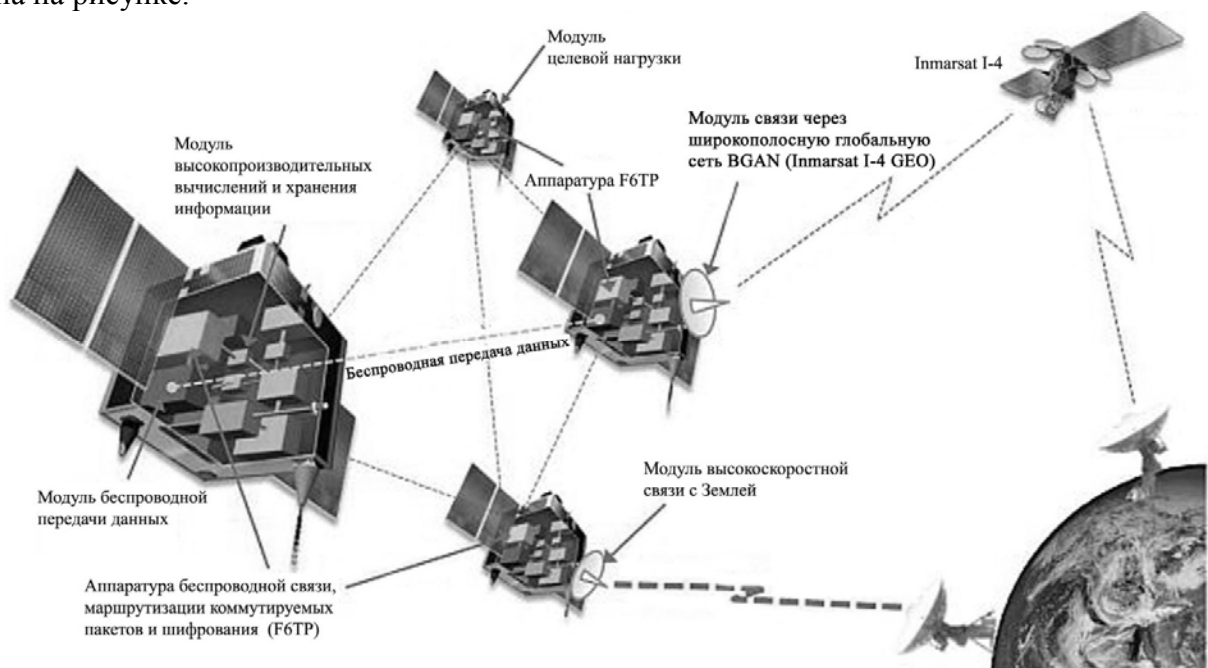
Такая архитектура обеспечивает адаптивность и живучесть кластеров МКА, снижение сроков их разработки и технических рисков: при неудачном запуске заказчик теряет не весь КА, а лишь один его функциональный модуль.

Идея фрагментированного КА восходит к работе 1984 г., в которой П. Моле (P. Molette) с коллегами сделал вывод о том, что выгоды кластеризации КА могут „перевесить“ увеличение массы и стоимости [6].

Термин „фрагментированный спутник“ был предложен О. Брауном (O. Brown) и П. Еременко (P. Eremenko) в серии работ 2006 г., в которых утверждалось, что подобная архитектура обеспечивает большую по сравнению с традиционной архитектурой гибкость и надежность, она менее чувствительна к проектным ошибкам и дешевле в производстве. Способ кластеризации КА по типу фрагментированного КА связи описан в патенте [7].

В 2007 г. агентство DARPA предложило программу System F6 (Future, Fast, Flexible, Fractionated, Free-Flying Spacecraft united by Information eXchange) для проектирования, создания и демонстрации возможностей фрагментированного КА. Согласно представленной концепции, несколько модулей КА (кластер) функционируют на орбите как одна большая платформа [8, 9].

Схема фрагментированного КА, созданного в рамках программы System F6, представлена на рисунке.



Натурный эксперимент на орбите должен был продемонстрировать полуавтономное длительное поддержание и изменение (в различных режимах полета) структуры кластера, совместное использование информационных ресурсов и т.д.

Ключевыми элементами программы System F6 являлись:

- набор открытых интерфейсов, необходимых для включения в систему новых модулей (МКА);
- аппаратура и программное обеспечение беспроводной связи, маршрутизации коммутируемых пакетов и шифрования, необходимые для создания информационной структуры фрагментированного КА из отдельных модулей;
- доступная спутниковая платформа.

Основной целью программы являлась демонстрация достоинств разрабатываемого фрагментированного КА: живучести, возможности непрерывной модернизации, возможности быстрого реконфигурирования системы, упрощения и ускорения разработки, низкой чувствительности к срыву сроков разработки или несоответствию отдельных модулей требованиям заказчика.

В конце 2015—начале 2016 гг. должно было начаться развертывание System F6. Однако в середине мая 2013 г. было объявлено о прекращении, по ряду причин, работ по системе. Официально было сказано, что ситуация с System F6 не является провалом: задача агентства DARPA состоит в проверке технически сложных концепций, реализация которых сопряжена с высокими техническими рисками. Реализация многих проектов DARPA не доходит даже до стадии прототипов.

Заметим, что фрагментированный КА существенно отличается от распределенного.

Достоинства обоих типов кластерных КА схожи (табл. 1), однако распределенный КА на наш взгляд, более устойчив к выходу из строя отдельных МКА.

Таблица 1

#### Различия фрагментированного и распределенного КА

№	Свойство (характеристика)	Фрагментированный КА	Распределенный КА
1	Количество типов МКА в кластере	4—5 и более	1—2
2	Общее число МКА в кластере	Соответствует количеству типов МКА, т.е. 4—5 и более	Десятки—сотни. Число активных МКА в работающем кластере изменяется в зависимости от их взаимного расположения. Неактивные МКА переходят в „горячий“ резерв
3	Размерность	Формальных ограничений нет. В проекте System F6 рассматривались МКА класса „микро“ (до 50 кг)	Малые КА размерности не выше „нано“
4	Функциональные возможности отдельного МКА в кластере	Каждый МКА в кластере выполняет заданную часть целевой функции	Соответствуют функциональным возможностям полноразмерного КА (с учетом ограничений, связанных с малыми размерами)
5	Последствия отказа одного из МКА в кластере	Необходима немедленная замена отказавшего МКА аппаратом с аналогичными функциональными возможностями	Компенсируются перераспределением целевой функции между исправными МКА
6	Устойчивость связи в кластере	Связь между МКА (модулями) в кластере непрерывная. „Рассыпание“ кластера — нештатная ситуация	Связь между отдельными КА в кластере динамическая, определяется текущим орбитальным положением отдельных КА

Существует ряд проблем в создании распределенного КА, обусловленных современным уровнем технологического развития отечественной промышленности. Помимо отсутствия отечественной высоконадежной, радиационно стойкой электронной компонентной базы, это проблемы удаления с орбиты „космического мусора“ (МКА, прекративших активное функционирование), приема/передачи слабых сигналов в условиях помех, а также реализации целевой функции, связанной с обработкой больших объемов информации от распределенных целевых модулей. Однако, на наш взгляд, эти и иные проблемы преодолимы (табл. 2).

Таблица 2

#### Проблемы создания распределенного КА и возможные направления их решения

№	Проблема	Пути преодоления
<i>Фундаментальные проблемы</i>		
1	Образование „космического мусора“	Удаление с орбиты МКА, прекративших активное существование
2	Прием/передача слабых сигналов в условиях помех	Методы выделения слабых сигналов на фоне шума. Адаптивное помехоустойчивое кодирование
3	Обработка больших объемов информации от распределенных целевых модулей	„Облачные“ вычисления
<i>Проблемы элементной базы МКА</i>		
4	Обеспечение устойчивости электронной компонентной базы к: перепадам температур, ионизирующему излучению, электростатическому разряду, факторам электризации	Создание полупроводниковых и конструкционных материалов, устойчивых к факторам космического пространства. Создание легких материалов, экранирующих ионизирующие излучения
5	Повышение удельного импульса, тяги и надежности микроракетных двигателей	Совершенствование технологии МЭМС, методов обеспечения и контроля качества
6	Повышение точности, стабильности характеристик и надежности МЭМС-датчиков	Комплексирование устройств

Продолжение таблицы 2

№	Проблема	Пути преодоления
<i>Системотехнические проблемы</i>		
7	Разработка принципов построения отдельных систем МКА:	
	целевого модуля	Создание технологий распределенных систем и МЭМС
	энергетического модуля	Создание технологий полупроводниковых материалов, устойчивых к факторам космического пространства, Технология ионисторов сверхвысокой емкости и др.
	системы управления	Разработка оптимальных структур систем управления, реализация принципов мультиагентного управления, методов комплексирования элементов. Твердотельные датчики по технологиям МЭМС
8	Выведение на орбиту и поддержание распределенного КА	Разработка сверхлегких ракет-носителей и средств выведения на новых физических принципах
9	Управление распределенным КА	Разработка технологии мультиагентного управления МКА в распределенном КА

Можно предположить, что развертывание кластеров МКА простимулирует рынок легких и сверхлегких средств выведения, даст импульс развитию и совершенствованию принципиально новых технологий, в том числе молекулярных и атомных нанотехнологий.

Гарантией широкого распространения в ближайшем будущем кластеров МКА, включая и распределенные, и фрагментированные КА, являются общие закономерности развития технических систем и прогресс в областях нанотехнологий, микромеханики и информатики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коротеев А. С., Ризаханов Р. Н., Собкалов О. Г.* Концепция распределенных космических аппаратов на базе нанотехнологических разработок // Матер. VI Науч.-практ. конф. „Микротехнологии в авиации и космонавтике“. М., 2008.
2. *Клюшников В. Ю.* Концепция распределенной системы космических аппаратов сверхмалого класса („роя“) // Актуальные проблемы Российской космонавтики: Тр. XXXVI Академических чтений по космонавтике. М.: Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, 2012. С. 276—278.
3. *Клюшников В. Ю.* Возможные направления реализации функций распределенного космического аппарата // Космонавтика и ракетостроение. 2014. Т. 75, № 2. С. 66—74.
4. НАСА запустило три смартфона на орбиту [Электронный ресурс]: <<http://habrahabr.ru/post/177903>>.
5. В 2016 году Израиль запустит в космос звено наноспутников [Электронный ресурс]: <<http://poprunews.ru/nauka-i-tehnologii/print:page,1,15070-v-2016-godu-izrail-zapustit-v-kosmos-zveno-nanosputnikov.html>>.
6. *Molette P., Cougnet C., Saint-Aubert P. H., Young R. W., Helas D.* Technical and economical comparison between a modular geostationary space platform and a cluster of satellites // Acta Astronautica. Pergamon Press Ltd. 1984. Vol. 11, N 12. P. 771—784.
7. Pat. № 6633745 USA. Satellite cluster comprising a plurality of modular satellites / *G. Bethscheider*. October 14, 2003.
8. *Brown O., Eremenko P.* The Value Proposition for Fractionated Space Architectures // AIAA Space 2006. San Jose, CA: American Institute of Aeronautics & Astronautics. Paper no. AIAA-2006-7506.
9. Exploring the F6 fractionated spacecraft trade space with GT-FAST // AIAA SPACE 2009 Conference & Exposition. 14—17 September 2009, Pasadena, California. 22 p.

#### Сведения об авторе

**Валерий Юрьевич Клюшников**

— д-р техн. наук; ЦНИИмаш; главный научный сотрудник;  
E-mail: [klyushnikovvy@tsniimash.ru](mailto:klyushnikovvy@tsniimash.ru)

**Ссылка для цитирования:** Ключников В. Ю. Построение кластеров малых космических аппаратов // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 6. С. 423—428.

## CONSTRUCTION OF SMALL SPACECRAFT CLUSTERS

V. Yu. Klyushnikov

Central Research Institute for Machine Building (TSNIImash), 141070, Korolev, Russia  
E-mail: klyushnikovvy@tsniimash.ru

Classification and methods of constructing of small satellites clusters are presented. The two basic classes of the small spacecraft clusters are considered: the clusters with uniform distribution of the objective function between the set of satellites of the same type constituting the cluster (distributed spacecraft), and the clusters with spatially dispersed functional modules of a single spacecraft (fragmented spacecraft). In the both cases, the cluster elements are supposed to be connected to each other via radio and operate in concert. Deployment of small spacecraft clusters is anticipated to stimulate the market of light and ultra-light launch vehicles, to give an impetus to the development and improvement of innovative technologies, including molecular and atomic nanotechnologies.

**Keywords:** small spacecraft, cluster, distributed spacecraft, fragmented spacecraft, objective function

### Data on author

**Valery Yu. Klyushnikov** — Dr. Sci.; TSNIImash; Chief Scientist;  
E-mail: klyushnikovvy@tsniimash.ru

**For citation:** Klyushnikov V. Yu. Construction of small spacecraft clusters // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2016. Vol. 59, N 6. P. 423—428 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-6-423-428