

# Эх, мчится тройка удалая ....<sup>1</sup>

*М.Ю. Овчинников<sup>2</sup>*

Не так часто происходит смена парадигмы<sup>3</sup> в столь консервативной отрасли науки и техники как космонавтика. Примером тому служат ракетносители, используемые для вывода космических аппаратов на орбиту, которые фактически были разработаны и созданы в эпоху С.П. Королева. Тогда же были заложены и основы пилотируемой космонавтики, методов исследования межпланетного пространства, наблюдения Земли из космоса. Появление миниатюрных космических аппаратов [1] привело к появлению нового взгляда на способы формирования конфигураций космических систем, схемы выполнения экспериментов и на возможность решения новых фундаментальных и прикладных задач в космосе. Коренная миниатюризация спутников способствовала снижению стоимости вывода отдельного аппарата на орбиту, сокращению циклов разработки, испытаний и запуска, уменьшению трудозатрат на создание аппаратов при использовании Commercial off-the-shelf компонент (COTS — готовая к использованию и продаже или лицензированная для публичного использования продукция), привлечению к разработке и созданию аппаратов бизнес-сообщества.

Остановимся лишь на одной такой принципиально новой возможности, не существовавшей или, по крайней мере, не выделявшейся в отдельное направление до появления малоразмерных спутников. Речь идет о формировании в зависимости от размеров отдельного аппарата группы, “роя” или даже “облака” спутников, движущихся по орбите на небольшом удалении друг от друга и решающих единую задачу. Принципиальной особенностью группового полета является автономная навигация отдельного аппарата в составе группы и управление их взаимным относительным положением в группе. Это могут быть статические или меняющиеся во времени конфигурации. В отечественной литературе такие конфигурации носят название группового полета, или формации. В англоязычной литературе появился и стал уже устоявшимся термин Formation Flying (дословно — летающая формация или просто *формация*). Так называют группу спутников, летящих на сравнительно близком взаимном расстоянии — от несколько десятков метров до сотен километров — и работающих совместно над выполнением одной и той же задачи.

---

<sup>1</sup> Статья — победитель конкурса РФФИ на лучшую научно-популярную статью за 2012 год (грант № 12-01-11501).

<sup>2</sup> Михаил Юрьевич Овчинников, заведующий сектором в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической механики и кафедры прикладной математики МФТИ, Действительный член Международной академии астронавтики (IAA), ovchinni@keldysh.ru.

<sup>3</sup> Парадигма (от греч. *παράδειγμα*, «пример, модель, образец») — с конца 60-х годов 20-го века этот термин в философии науки и социологии науки используется для обозначения исходной концептуальной схемы, модели постановки проблем и их решения, методов исследования, господствующих в течение определённого исторического периода в научном сообществе.

Достоинствами формации (в дальнейшем будем использовать этот термин для обозначения Formation Flying) является возможность *одновременного* проведения наблюдений, измерений, других экспериментов в различных точках пространства при заданном и контролируемом взаимном положении спутников, на которых установлена необходимая для решения таких задач полезная нагрузка, или в одной точке пространства, но при наблюдении ее с разных сторон. Другая возможность, которую обеспечивает формация, связана с массовым использованием малогабаритных спутников в составе роя. Такая спутниковая система строится таким образом, что выход из строя одного спутника или даже части этого роя не приводит к потере работоспособности всего ансамбля. Это сродни принципу функционирования Интернета, базирующемуся на протоколе передачи данных, кратко именуемом TCP/IP. С его помощью гарантируется, что выход любого промежуточного элемента на пути от отправителя до получателя не приводит к потере информации. Способность к определению взаимного положения аппаратов и управлению взаимным положением порождает возможность перестроения конфигурации системы, маневрирования, сближения и даже стыковки спутников. Говоря об “облаке” из спутников, имеется в виду семейство таких спутников, которые только условно можно назвать спутниками, фактически это — пассивные микрообразования размером в несколько миллиметров, управляемые внешними воздействиями (давлением солнечной радиации, сопротивлением атмосферы, гравитационным притяжением Земли).

В отличие от так называемого созвездия спутников (constellation), образуемого набором спутников, движущихся по различным, но однотипным орбитам (например, с одинаковыми радиусами и наклонениями, но различными аргументами восходящего узла, обеспечивающими равномерное покрытие поверхности Земли) и решающих единую задачу, но управление которыми осуществляется индивидуально, формация требует обеспечения автономной навигации по измерениям относительной дальности и/или скорости и управления относительным положением. Необходимость управления взаимным положением обусловлена не только требованиями по изменению или поддержанию взаимного положения, но и отличиями, хотя и малыми, в параметрах орбит близко летящих аппаратов. Эти отличия приводят к тому, что орбиты близко движущихся друг от друга спутников под действием возмущающих факторов эволюционируют по-разному. Это приводит к увеличению расстояния между спутниками с течением времени, а попросту говоря, к разрушению формации. Поэтому и приходится корректировать их орбиты, чтобы поддержать требуемую конфигурацию системы.

Созвездие спутников (в отличие от формации) решает задачи на основе заданного, например, равномерного покрытия поверхности Земли для обеспечения связи между удаленными точками, расположенными на ней, решения навигационных задач, когда спутник-клиент должен одновременно “видеть” несколько навигационных спутников, выполнения задач непрерывного наблюдения Земли и мониторинга состояния ее поверхности. Примерами созвездий могут служить спутники глобальных навигационных систем ГЛОНАСС, GPS

(24 спутника<sup>4</sup> — по четыре аппарата в шести плоскостях, высота орбит — 20180 км), спутники связи Iridium (66 спутников, высота орбит — 780 км, наклонение —  $86.4^\circ$ ), которые одновременно покрывают значительную часть Земли. Также примерами могут служить созвездия для обеспечения мобильной связи GlobalStar (48 спутников — по шесть аппаратов в восьми плоскостях, высота орбит — 1400 км и их наклонение —  $52^\circ$ , перспективы существования системы весьма туманные), Orbcomm (29 спутников в семи орбитальных плоскостях, высота орбит — 800 км, наклонение —  $45^\circ$ ), Teledesic (первоначально — размах одного из главных финансистов системы Билла Гейтса — планировалось использовать 840 спутников на орбитах высотой 700 км, затем это число уменьшилось до 288 — по 24 спутника в двенадцати орбитальных плоскостях с высотой орбит 1400 км и наклонением  $98.2^\circ$ , в итоге проект практически “сошел на нет”), Odyssey (12 спутников в трех орбитальных плоскостях на орбитах высотой 10354 км, проект закрыт, лицензия отозвана). Экономический фактор является одним из основных для столь масштабных проектов. Пожалуй, только спутники системы Orbcomm можно отнести к классу микроспутников (массой 42 кг каждый), спутники остальных систем имеют массу в несколько сотен килограмм.

Приведем несколько примеров реализованных или планируемых миссий Formation Flying, а затем проанализируем возможности конфигураций с точки зрения их динамики, являющейся весьма критичной компонентой в базисе устремлений и реализуемых возможностей.

Толчком к созданию систем типа Formation Flying послужило появление миниатюрных создаваемых на базе МЭМС-технологий спутников, вывод на орбиту которых может быть осуществлен одним носителем [2]. В этом случае резко снижается стоимость миссии и время ее подготовки из-за использования одного носителя, а также из-за использования однотипных или даже унифицированных спутников, входящих в состав формации.

Важным свойством формации, недоступным одиночному спутнику, является возможность одновременного измерения характеристик среды в различных точках пространства. Это свойство особенно важно для метеорологии, задач изучения атмосферы, магнитосферы Земли, гравитационного поля, геомагнитного поля, влияния солнечной радиации на состояние атмосферы, ионосферы — то есть различных локальных процессов в околоземном пространстве, характеристики которых являются не только функцией пространственных координат, но и времени.

Примером использования формации для изучения гравитационного поля Земли является выведенная на орбиту в марте 2002 года формация GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) в рамках программы NASA “Earth System Science Pathfinder”. Формация состоит из двух спутников (масса каждого около 430 килограммов), находящихся на одной околополярной орбите высотой 485 км и наклонением  $89^\circ$ . Скetch миссии в полете показан на рис.1 [3].

В середине миссии спутники, двигающиеся по схеме “лидер-ведомый”, поменялись местами. В начале маневра спутники были удалены на 203 км, затем

---

<sup>4</sup> Здесь и далее приведены ориентировочные характеристики созвездий и формаций, чтобы дать читателю только представление об их типовых значениях.

начали сближаться, пройдя вблизи друг друга, и затем опять разошлись на расстояние 170 км. Операция заняла 39 дней. С помощью полученных измерений ученые планируют показать, что изменение гравитационного поля Земли эффективно отображает изменения в климате планеты [4]. Расчетная длительность миссии – около пяти лет, но спутники работают до сих пор [5].

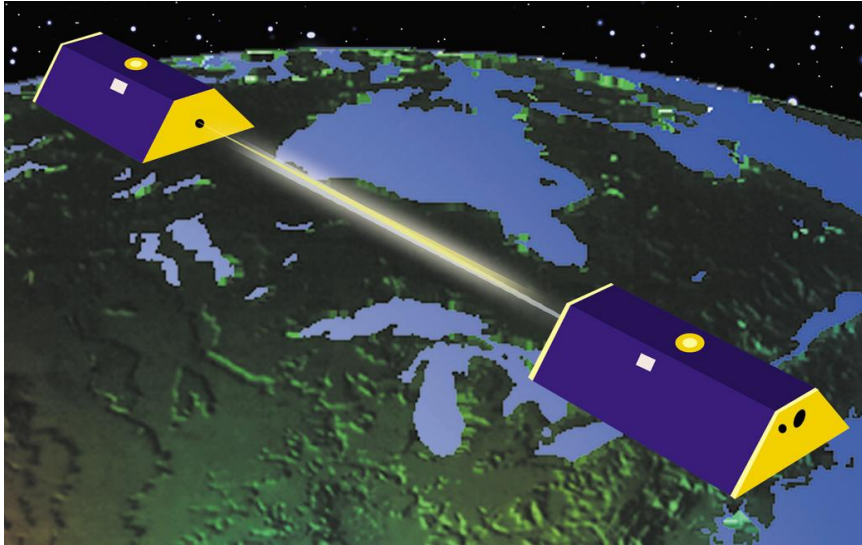


Рис. 1. Скетч миссии GRACE

Еще одним примером использования формации для исследования силовых полей Земли является проект SWARM, предназначенный для исследования геомагнитного поля. Заказчиком спутников является ESA. Масса каждого аппарата составит 320 кг. Два из этих спутников должны двигаться по близким орбитам с одинаковым наклоном  $87.3^\circ$ , высотой 450 км, с запаздыванием по времени в 10 сек и расхождением по аргументу восходящего узла  $1-1.5^\circ$ . Орбита третьего спутника имеет наклонение  $86.8^\circ$  и высоту 530 км. Запуск планируется в 2013 году на российском легком носителе Рокот [6] (здесь же можно найти таблицу с перечнем Formation Flying миссий в 2000-2015 гг., а в [7] приведен перечень планируемых миссий ESA). Образованная этими двумя спутниками формация носит название *side-by-side*, то есть “летающие бок о бок”.

Формация MMS (Magnetospheric MultiScale) включена в состав программы NASA по исследованию магнитосферы Земли и изучению локальных процессов, происходящих в плазме и влияющих на магнитосферу. Формация будет состоять из четырех идентичных спутников, летящих в тетраэдральной конфигурации с изменяемой базой размером от 1 километра. Планируемый год запуска – 2014 [8].

Также для исследования магнитосферы Земли планируется запустить в 2014 году формацию SCOPE (cross Scale COupling in Plasma universE), разрабатываемую в японском аэрокосмическом агентстве JAXA. Главной целью запуска формации является исследование динамики поведения плазмы в земной магнитосфере [9]. Основная идея — научиться различать временные и пространственные изменения физических процессов. Планируется, что формация будет состоять из одного большого материнского спутника и четырех малых дочерних спутников,

движущихся по высокоэллиптической орбите. Три из четырех дочерних спутников движутся на расстоянии от 5 до 5000 километров от материнского, четвертый спутник остается около материнского на расстоянии от 5 до 100 километров. С помощью этой миссии планируется получать как макро-, так и микроинформацию о возмущении плазмы в одно и то же время. Дочерний спутник будет весить около 95 килограммов, неся при этом 15 килограммов полезной нагрузки [10].

Самостоятельную ценность представляют миссии для технологической отработки динамики, навигации и управления формацией. Дело в том, что по сравнению с одиночными миссиями в формации появляется необходимость обеспечения заданного взаимного положения аппаратов, и это не может быть решено в рамках подходов, исповедуемых для одиночных миссий и созвездий, в которых управление осуществляется либо в автономном режиме, либо по командам с Земли. Приходится решать задачу навигационного обеспечения относительного движения по автономным измерениям относительной скорости и относительного расстояния между спутниками в формации. Определение относительного движения по внешнетраекторным измерениям с помощью радиолокационных или даже лазерных средств затруднительно из-за того, что приходится вычитать большие числа для определения относительного движения, что приводит к потере точности. Вторая особенность формаций — это реализация принципа распределенной информационной системы с головным аппаратом, который может выполнять управляющие функции. Именно с этими целями 22 марта 2006 года с помощью крылатой ракеты Pegasus была выведена на орбиту формация ST5 (Space Technology – 5), состоящая из трех автономных спутников (рис. 2). Формация была разработана для тестирования технологий в интересах будущей миссии NASA Magnetospheric Constellation Mission в рамках “New Millennium Program”

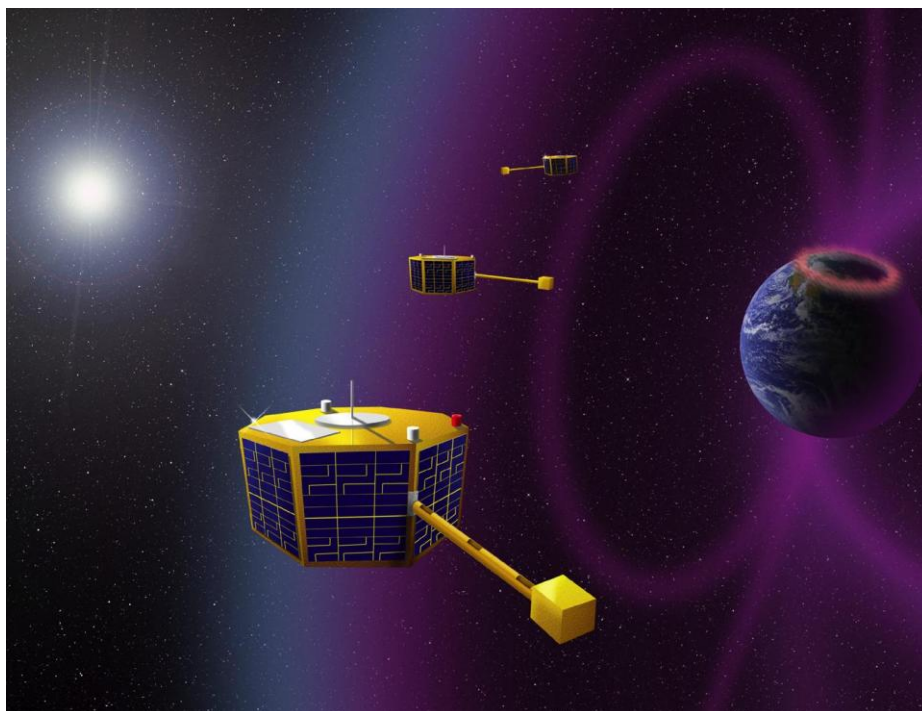


Рис.2. Формация Space Technology – 5

как демонстратор возможностей Formation Flying для решения измерительных задач (например, определения влияния солнечного ветра на магнитное поле Земли). Масса каждого спутника — 25 кг, диаметр 53 см и высота 48 см. Вид сборки трех спутников на испытательном стапеле, имитирующем адаптер для использования на ракете-носителе Pegasus, приведен на рис. 3. Именно так выглядит устройство Pegasus Support Structure (PSS) [11], аналогичное ASAP-платформе, разработанной Arianespace для группового вывода микро- и наноспутников. PSS позволяет отделять спутники подобно “летающим тарелочкам” (типа “фрисби”), закрученным вокруг оси симметрии. После отделения от носителя образуется “цепочка” (*string of pearls*) из летящих друг за другом на расстоянии от 40 до 140 км аппаратов. Миссия была закончена 30 июня 2006 года.



Рис.3. Спутник миссии ST5 на технологической стойке — имитаторе системы отделения от крылатой ракеты Pegasus

Также при поддержке проекта NASA Magnetospheric Constellation разрабатывалась формация Constellation Pathfinder в рамках университетской программы создания наноспутников. Это кластер из трех пикоспутников (масса каждого менее одного килограмма), которые будут запущены для демонстрации возможности координирования работы сотен малых спутников в целях измерения напряженности магнитного поля. Сама Magnetospheric Constellation миссия должна была состоять из «роя» из 50 спутников, включая “материнский” спутник для координации и управления, целью которого является исследование “хвоста” магнитосферы Земли. Как вариант рассматривалась возможность использования лазеров для межспутниковой связи. Миссия планировалась к запуску в 2010 году

[12], но запуск не состоялся [13]. Чем не отработка космического сегмента технологий “сетевых войн”, которые интенсивно обсуждаются в литературе [14].

Чтобы получить представление о проблемах формирования и поддержания конфигураций Formation Flying, достаточно обратиться к простой модели относительного движения близко летящих аппаратов в гравитационном поле и рассмотреть хотя бы основное возмущающее их орбитальное движение его действие.

В простейшем случае, если считать, что спутники движутся в центральном ньютоновском поле в отсутствии возмущений от несферичности Земли, атмосферы, солнечного давления, Луны и других планет, их движение будет описываться следующим образом. Для спутника, относительно которого рассматриваем движение остальных спутников в формации (назовем его главным), уравнение движения имеет вид

$$\ddot{\mathbf{R}} + \frac{\mu \mathbf{R}}{R^3} = 0,$$

где  $\mathbf{R}$  — радиус-вектор спутника относительно центра Земли,  $\mu$  — гравитационный параметр Земли, точкой обозначено дифференцирование по времени. Для остальных дочерних спутников в формации при условии, что орбита главного спутника круговая, а расстояние до главного спутника мало по сравнению с расстоянием до Земли, уравнения движения описываются в орбитальной системе координат<sup>5</sup> системой линейных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}\ddot{x} + 2\omega_0 \dot{z} &= 0, \\ \ddot{y} + \omega_0^2 y &= 0, \\ \ddot{z} - 2\omega_0 \dot{x} - 3\omega_0^2 z &= 0,\end{aligned}$$

известных как уравнения Хилла или уравнения Клохесси-Уилтшира [15], где  $\omega_0$  — угловая скорость движения главного спутника по орбите;  $x, y, z$  — координаты дочернего спутника в орбитальной системе координат. Уравнения интегрируются в элементарных функциях. Это решение может быть проинтерпретировано как гармонические колебания дочернего спутника относительно плоскости орбиты главного спутника и гармонические колебания по вертикали и вперед-назад по направлению движения центра масс главного спутника при монотонном дрейфе в сторону движения. Фактически проекция траектории дочернего спутника на плоскость орбиты представляет собой мгновенный эллипс с дрейфующим центром. Выбором начальных условий движения дочернего спутника можно устранить его

<sup>5</sup> Орбитальная система координат OXYZ. Начало координат O помещено в центр масс главного спутника, ось OZ направлена вдоль радиус-вектора, соединяющего центры масс Земли и спутника; ось OX перпендикулярна оси OZ и лежит в плоскости, проходящей через радиус-вектор и вектор скорости центра масс спутника, составляя с последним угол меньше  $90^\circ$ ; ось OY дополняет систему координат до правой ортогональной “тройки”. Система, вращаясь вокруг оси OY, движется вместе со спутником по орбите. Такая система координат удобна тем, что движение объектов относительно нее представляется так, как если бы мы наблюдали объекты, находясь на главном спутнике.

движение перпендикулярно плоскости орбиты, убрать дрейф и уменьшить размеры мгновенного эллипса. Таким образом, становится понятным, какое относительное движение спутников можно выбрать в качестве расчетного, не пытаясь бороться с силами природы. Если обеспечить необходимый сдвиг фаз движения между несколькими дочерними спутниками, то можно сконструировать весьма экзотические формации.

К сожалению, сконструированные таким образом конфигурации формаций неустойчивы. Дело в том, что на спутники помимо основной силы притяжения от центрального ньютоновского гравитационного поля действуют возмущающие силы из-за сопротивления атмосферы, давления солнечной радиации, несферичности Земли. В частности, последние, причину появления которых нельзя устранить, приводят к тому, что параметры орбиты каждого спутника начинают эволюционировать. Эволюция зависит от параметров орбиты, в частности, от ее наклона и радиуса. Из-за небольшого, но существующего различия в параметрах орбит близких материнского и дочерних спутников они эволюционируют по-разному. Это и приводит к расхождению спутников и к разрушению начальной выстроенной конфигурации. Если говорить о влиянии, пожалуй, самого существенного возмущающего фактора — полярного сжатия Земли, то оно приводит к эволюционному (от витка к витку) изменению положения аргумента восходящего узла и аргумента перицентра — орбита медленно прецессирует вокруг оси вращения Земли и при этом поворачивается в своей плоскости. Установка на спутнике системы коррекции орбитального движения, сопряженной с системой идентификации и управления относительного движения спутников, позволяет компенсировать действие этих и других возмущений, а также осуществлять переконфигурирование формации.

Понятно, что для различных миссий требуются различные типы формаций в зависимости от поставленных задач. Например, для случая, когда необходимо иметь много снимков одной области на поверхности Земли, подходит формация *same ground-track*. В этом случае одна и та же область поверхности наблюдается сначала одним спутником, затем через определенное время другим с одной и той же точки над поверхностью Земли. Это важно, например, в случае необходимости обнаружения движущегося объекта (лодки, самолета). Обнаружение происходит путем сравнения нескольких снимков одной и той же области, сделанных с известным временным интервалом. Круговая формация подходит для создания большой распределенной антенны. Для задач стереографической съемки, когда важно иметь несколько одновременных снимков одного и того же объекта с разных точек, замечательно подходит формация *Leader-Follower*. В этом случае спутники движутся друг за другом по одной и той же орбите, но с разными эпохами, то есть одну и ту же точку орбиты спутники проходят в разное время. В качестве примера приведем конфигурацию миссии LISA (Laser Interferometer Space Antenna). Орбиты каждого спутника выбираются так, чтобы минимизировать изменение расстояний между аппаратами при движении вокруг Солнца (рис.4). В 2011 году из-за изменения сценария международной кооперации проект получил новое название New Gravitational wave Observatory (NGO) [16].



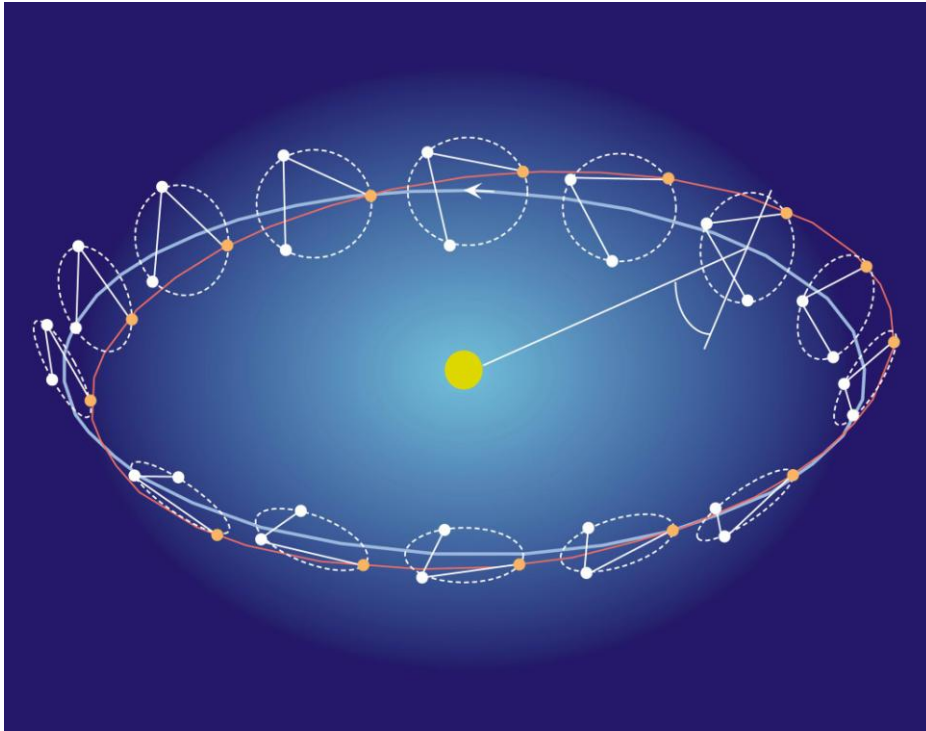


Рис.4. Пространственная конфигурация формации из трех аппаратов миссии LISA в их годовом движении вокруг Солнца

С помощью нескольких синхронизированных спутников можно создать нужную базу для получения стереофотографий поверхности Земли, а также для увеличения разрешения снимков, в то время как в случае одиночного спутника мы ограничены его максимальным поперечным размером. Кроме того, согласованное использование нескольких синхронизированных спутников позволяет проводить обзор цели под различными углами одновременно, а значит, получать достоверную стереоинформацию об этом объекте.

К классу задач, где важны перечисленные свойства формации, относится задача дистанционного зондирования Земли<sup>6</sup>, включающая в себя несколько способов получения информации об объектах на поверхности Земли: уже упомянутая стереографическая съемка, интерферометрия, радиолокация. Стереографическая съемка используется, например, для создания топографических карт местности, радиолокация — для составления рельефа местности.

Примером формации, предназначенной для дистанционного зондирования Земли, стала пара EO-1 и LandSat-7, которая кроме всего прочего стала первой миссией Formation Flying. Спутник EO-1 (Earth Observing 1) был создан в целях испытаний перспективных технологий и приборов для наблюдения и зондирования

<sup>6</sup> В широком смысле дистанционное зондирование (наблюдение) — это получение информации об объекте или явлении с использованием либо записей, либо устройств наблюдения в реальном времени, но не в физическом контакте с объектом, а например, при помощи спутника. Дистанционное зондирование позволяет получать информацию с опасных или труднодоступных территорий, наблюдать за влиянием изменения климата на льды в Арктическом и Антарктическом регионах, а также проводить, например, глубинное зондирование океана.

Земли. Он разработан в рамках программы “New Millennium Program”, начатой в 1995 году NASA. Основная идея разработки EO-1 состояла в поиске замены аппаратам дистанционного зондирования Земли серии LandSat. Наблюдения, выполненные с LandSat, охватывают период почти в 30 лет и составляют бесценный банк данных по сельскому и лесному хозяйству, океанографии, росту городов и загрязнению атмосферы, распределению ресурсов и природным катастрофам. Для того чтобы провести корректное сравнение данных со старой и новой аппаратуры, был запланирован совместный полет EO-1 со спутником Landsat-7. Спутник EO-1 был выведен в плоскость орбиты Landsat-7 (солнечно-синхронная орбита с прохождением нисходящего узла в 10:00 по местному времени) 18 декабря 2000 года. Его орбита должна была быть такой же, как и у LandSat, но движение аппарата должно было происходить с отставанием на 1 мин (или 450 км вдоль орбиты). Спутники не поддерживали точное относительное положение на орбите, но поддерживали точное временное разделение вдоль траектории. Это позволяло им наблюдать одни и те же наземные объекты при одинаковых атмосферных условиях для стереографической съемки. Высота орбиты составляла около 700 км, наклонение орбиты —  $98.7^\circ$ . Масса спутника составила 530 кг [17].

Использование формаций спутников позволяет делать одновременные измерения из разных точек пространства, а значит, позволяет проводить астрономические наблюдения или наблюдения объектов на поверхности Земли с высоким разрешением, используя систему спутников как телескопическую систему с разнесенной апертурой. Базой интерферометра<sup>7</sup> в данном случае будет относительное расстояние между спутниками. Реализация подобной базы на одиночном спутнике потребовала бы превышающего все разумные пределы увеличения массы и увеличения потребления топлива, необходимого для запуска и управления такой системой. Поэтому революционной идеей стала идея комбинации спутников в автономные формации, поведение которых было бы подобно поведению твердого тела.

Примером системы для составления топографической карты поверхности Земли с большой точностью служит формация TanDEM-X, разработанная DLR, Германия. TanDEM-X состоит из двух спутников, образующих большой интерферометр, способный проводить картографирование с точностью в 2 метра (рис. 5). Такая точность превосходила все доступное на момент разработки миссии. Запуск осуществлен в 2010 году. Расчетное время работы спутников – 5 лет.

---

<sup>7</sup> Интерферометрия. Метод исследования, основанный на явлении интерференции (сложения) волн. Пространственная интерферометрия применяется в астрономии для исследования тонкой структуры космических источников излучения. Применяемые измерительные приборы, принцип действия которых основан на интерференции волн, называются интерферометрами. Разрешающая способность двухлучевого интерферометра равняется  $L/D$ , где  $L$  — длина волны, а  $D$  — база интерферометра, и чем больше база, тем разрешающая способность выше. Разрешающей способностью называется минимальное угловое расстояние между точечными объектами, при котором эти объекты различимы отдельно.

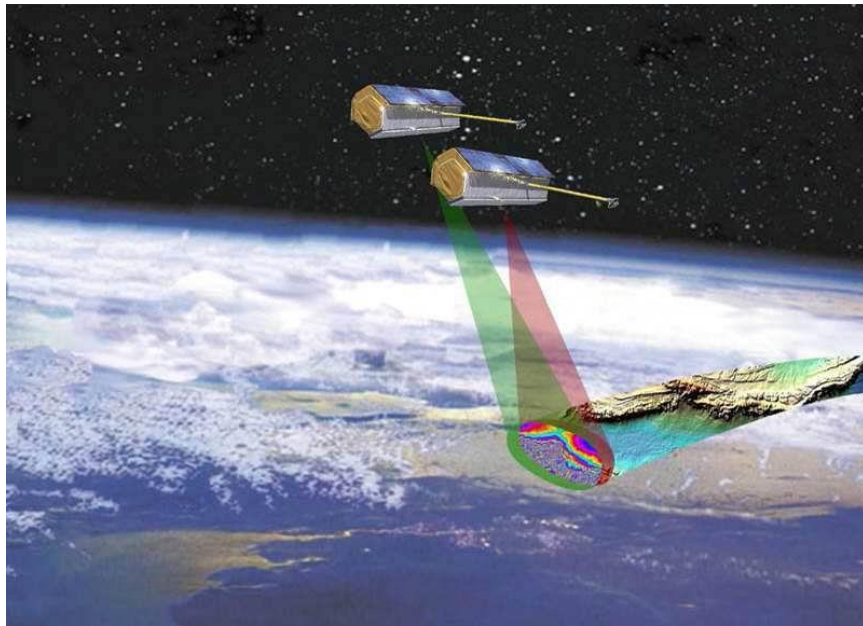


Рис.5. Два спутника для картографирования местности TanDEM-X

Примером весьма насыщенной по измерительным инструментам формации для наблюдения Земли из космоса является A[fternoon]-Train [18]. Этот в дословном переводе “послеобеденный поезд” ведет спутник Aqua, движущийся по солнечно-синхронной орбите с прохождением восходящего узла орбиты в 13:30 — после обеда, отсюда и название формации. Aqua сопровождается спутниками CloudSat, CALIPSO, PARASOL и Aura (рис. 6). Спутники с минимальным временным запаздыванием проводят измерения подстилающих облачного покрова, аэрозолей, микрочастиц с использованием оптических инструментов, лидара, спектроскопов, химических датчиков.

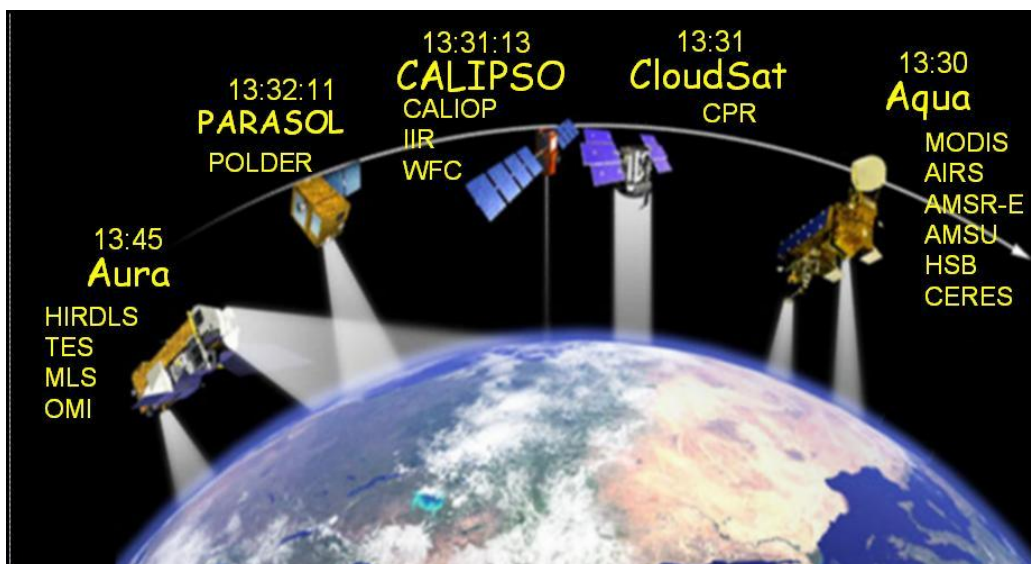


Рис. 6. Конфигурация формации A-Train (указаны времена прохождения восходящего узла орбиты каждым спутником)

Неплохим кандидатом для создания формаций служит наноспутник PRISM (Pico-satellite for Remote sensing and Innovative Space Missions), разработанный Университетом Токио в Японии группой профессора Шиничи Накасука (Shinichi Nakasuka). При массе спутника 8 кг и размерах 19x19x40 см разрешение на поверхности Земли составило 30 метров. Попутный запуск осуществлен в 2009 году совместно с основным спутником GOSAT японской ракетой-носителем H-IIA.

С обзором по приборам, спутникам, методам наблюдения Земли из космоса, включая и возможности формаций, можно ознакомиться в объемной работе доктора Николаса Шорта [19].

Еще одним классом задач, где предпочтительно применение формаций, являются задачи исследования дальнего космоса. Предпочтительность применения формации для таких задач обоснована теми же фактами, что и в задачах наблюдения Земли. Это возможность создания большой апертуры, а значит, увеличения разрешения снимков при уменьшении суммарной массы, уменьшения затрат на топливо, уменьшения финансовых рисков.

Для обнаружения и изучения черных дыр при детектировании фотонов предлагается размещение двух спутников (зеркала и детектора), размещенных в лагранжевой точке либрации  $L_2$ <sup>8</sup> и разнесенных на расстояние нескольких метров, что будет являться фокусным расстоянием телескопа. Причем для формации XEUS (X-Ray Evolving universe Spectroscopy, ESA и ISAS), планировавшейся к запуску после 2010 года, предполагается поддержание относительного расстояния с точностью до 1 мм, фокусное расстояние системы – около 50 метров.

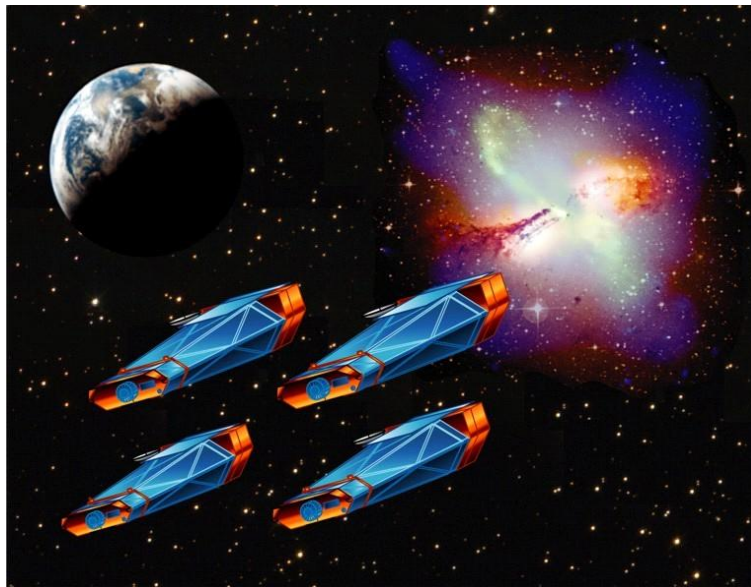


Рис. 7. Четыре спутника миссии Constellation-X в точке либрации  $L_2$

<sup>8</sup> Точки либрации — точки в пространстве, где спутники находятся в относительном равновесии по отношению к двум массивным небесным телам, например, в системе Земля-Луна. Различают треугольные (лагранжевы) и коллинеарные (эйлеровы) точки. В системе Земля-Луна первые находятся на одинаковых расстояниях от планет, равных расстоянию между планетами. Эти точки устойчивы. Физическая причина существования точек либрации — равенство нулю суммы гравитационных сил и переносных сил инерции, действующих на спутник в этих точках во вращающейся вместе с планетами системе координат.

К подобным проектам относятся проекты Constellation-X (четыре спутника, 2015 год) и Generation-X (шесть спутников, 2020 год). Их целью будет исследование эволюции массивных черных дыр, исследование темной материи, эволюции квазаров, взрывов звезд. Фокусное расстояние у Constellation-X планируется равным 10 метрам, а диаметр телескопов — около 1,6 метра (рис. 7), у Generation-X диаметр телескопа будет 4,5 метра, а фокусное расстояние увеличено до 150 метров. Однако в связи с объявленной ESA (Европейское космическое агентство) новой стратегией космических исследований на 2015—2025 годы – Cosmic Vision – указанная миссия не вошла в планы на ближайшую реализацию.

Целью проекта TPF (Terrestrial Planet Finder) является обнаружение планет вне солнечной системы, похожих на Землю. TPF состоит из двух дополняющих друг друга небесных обсерваторий: коронографа видимого света (TPF-C, 2016) и инфракрасного астрономического интерферометра (TPF-I, 2020), причем TPF-I является формацией. Этот Проект NASA много раз откладывался и в итоге был отменён. “В ответ” на миссии NASA ESA также планирует несколько подобных миссий, например, LISA и DARWIN.

Проект DARWIN включает инфракрасный пространственный интерферометр, представляющий собой кластер из четырех спутников: три телескопа и одно устройство для сведения лучей. Диаметр телескопов — не менее трех метров. Запуск спутников планируется не ранее 2015 года. Телескопы будут исследовать инфракрасную часть электромагнитного спектра. Благодаря высокому разрешению, можно будет не только исследовать планеты, подобные Земле, но и детально изучать разнообразие астрофизических процессов [20]

Проект LISA (Laser Interferometer Space Antenna, 2018) — кластер из трех спутников на слабоэллиптической гелиоцентрической орбите с периодом обращения, равным одному году (рис.4). Удаление спутников друг от друга предполагается равным пяти миллионам километров. Целью этой формации является обнаружение гравитационных волн от массивных черных дыр и двойных звезд, а также исследование сезонных вариаций в химическом составе атмосфер планет для обнаружения признаков жизни. Роль формации заключается в устранении любых внешних возмущающих воздействий на тестовые массы внутри спутника. Формация ведет себя как интерферометр Майкельсона [21]. В связи с выпуском Национальным исследовательским советом США (US National Research Council) в феврале 2011 года Доклада по перспективным межпланетным исследованиям на следующее десятилетие и принятием ESA нового плана межпланетных исследований эти две миссии “отложены в долгий ящик”.

Понятно, что запуск формации спутников для исследования дальнего космоса является достаточно рискованным в финансовом плане предприятием, поэтому они проходят отработку на околоземных орбитах. Примером околоземной миссии в целях отработки миссии DARWIN является проект PRISMA, включающий два спутника, один из которых оснащен в большей степени и обладает большей маневренностью, чем второй. Массы спутников 140 кг и 40 кг соответственно. Спутники были успешно запущены в 2010 году на солнечно-синхронную орбиту высотой 700 километров. Во время полета проведены тестирование автономного

управления для Formation Flying, проверка алгоритмов навигации и управления, тестирование двигателей малой тяги на холодном газе, стыковка аппаратов [22]. Эта миссия, пожалуй, остается единственной успешной реализованной формацией.

Особый интерес представляют собой группировки Formation Flying, разрабатываемые университетами при участии студентов. Основные задачи таких спутников — реализация и проверка различных алгоритмов, применимых к формациям, и тестирование различного оборудования, а также участие будущих разработчиков спутников в реальных проектах. Примером такого проекта является формация ION-F, включающая три наноспутника, которые движутся по орбите с наклоном  $51.5^\circ$  и высотой 370 км. Масса каждого из спутников от 10 до 15 кг. Цель миссии ION-F — измерение электронной плотности ионосферы и оценка ее влияния на прохождение сигнала GPS. В течение первого месяца спутники находятся на расстоянии 10 км друг от друга. Во время второго месяца работы спутники сохраняют расстояние 100 км и меньше. За следующие три месяца спутники поддерживают дистанцию 1000 – 2000 км. То есть в эксперименте ION-F формулируется и технологическая задача — отработать маневрирование спутников на орбите. По командам с Земли будет реализовано маневрирование двух спутников относительно третьего спутника. Спутники разработаны студентами [23].

Ближайший по времени реализации “массовый” студенческий проект QB50, включающий в себя кубсаты (CubeSat) — пикоспутники размером 10x10x10 см и массой около 1 кг, разрабатывается европейскими университетами при поддержке европейской исследовательской программы FP7 [24]. Целью столь масштабной миссии является исследования постоянных и временных вариаций параметров атмосферы на высотах от 320 до 90 км над Землей с помощью формации из пятидесяти двойных или даже тройных кубсатов, несущих идентичные датчики, во время снижения и входа в плотные слои атмосферы. Отрадно, что в этом проекте принимает участие Самарский авиационно-космический университет со спутником SamSat [25].

Делаются попытки и наземной отработки маневрирующих спутников в составе формации. При этом приходится имитировать не только их индивидуальное и относительное движение, но и вводить имитацию навигационных сигналов, солнечного излучения и магнитного поля, звездного неба. В качестве примера следует привести макеты управляемых объектов, разработанные в Space Systems Simulation Laboratory Virginia Polytechnic Institute and State University, USA (рис. 8).

Более наглядный подход исповедуют наши коллеги из Центра космических технологий и микрогравитации (ZARM) Бременского университета, Германия. Они создали макет (LUVEX), способный на воздушной подушке скользить над поверхностью гладкого горизонтального стола [26]. Макет снабжен баллоном со сжатым воздухом, который используется для создания воздушной подушки, управляющей реактивной силой, а также датчиками и актюаторами для обеспечения как поступательного, так и вращательного движения. На рис. 9 мы видим организатора проекта доктора Штефана Тайля (Stephan Theil, DLR) с макетом на стадии его отработки. Совместными усилиями макет доукомплектован алгоритмами

идентификации и управления, которые позволили провести испытания относительного управляемого движения таких двух макетов [27].

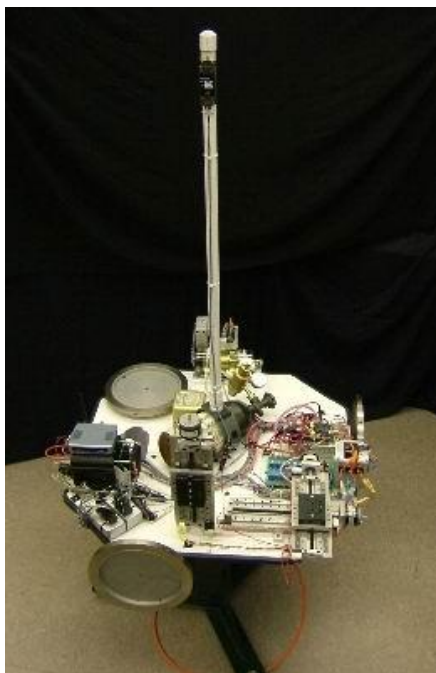


Рис.8. Имитатор углового движения на трехстепенном подвесе



Рис.9. Макет LUVEX, имеющий три степени свободы (две поступательного движения по столу и одну вращательную), в руках руководителя работ доктора Штефана Тайля

К сожалению, реализованных и запущенных, а самое главное, корректно отработавших проектов формаций не так уж и много. Многие проекты остались только проектами, но, несмотря и на такие результаты, ценность формации даже “на бумаге” достаточно велика, так как при разработке других формаций можно

пользоваться наработанными материалами, учитывая удаchi и ошибки предыдущих разработчиков. Начинать надо с простых демонстрационных миссий, базирующихся на уже прошедших технологическую отработку в условиях космического полета одиночных спутниках, например, на отечественном наноспутнике ТНС-0. Одноосная ориентация такого спутника позволяет при весьма простом оборудовании осуществить разведение [28], поддержание [29] и относительное маневрирование на орбите [30] с помощью так называемого одноосного управления, когда вектор тяги маневрирующего двигателя ориентируется в пространстве с помощью пассивного управления, например, по вектору индукции геомагнитного поля, а управление орбитальным движением осуществляется только величиной тяги двигателя. Аналогично можно использовать одноосную ориентацию спутника в инерциальном пространстве, например, на Солнце. При всей своей простоте идея разделения управления ориентацией и поступательным движением вполне может быть использована для обеспечения относительного движения в формации как с помощью импульсного управления, так и с помощью двигателя малой тяги.

Теперь с учетом применения группировок спутников отметим преимущества и недостатки, возникающие при использовании формаций, состоящих из специализированных малогабаритных спутников вместо многофункционального одиночного спутника. Перечислим преимущества формаций спутников:

- формации позволяют использовать единой разработки спутники, учитывая опыт создания первого спутника, а это означает экономию времени и средств;
- гибкость в применении (“мультизадачность”), возможность реконфигурации формации, а значит, и возможность применения одной формации для нескольких миссий, в то время как одиночный спутник практически всегда создается под выполнение одной или ряда определенных задач;
- возможность добавления новых элементов или улучшения старых, то есть по мере доработки и устранения недочетов возможен постепенный “upgrade” всей формации;
- большая отказоустойчивость по сравнению с одиночным спутником за счет достаточного количества дублирующих элементов, а также возможность замены неисправного спутника новым; при этом следует учесть, что во время поломки одного элемента система все еще может оставаться работоспособной, чего нет в случае поломки одиночного спутника;
- возможность разнесения полезной нагрузки на разные элементы формации;
- уменьшение индивидуального веса и размера спутника внутри формации, а значит, и значительное снижение стоимости запуска, так как стоимость запуска напрямую зависит от массы запускаемых аппаратов;
- создание новых способов сбора информации и обмена информацией между космическими объектами и наземными станциями;
- унификация спутников и уменьшение их размеров и массы позволяют осуществлять их одновременный вывод на орбиту.

А вот их недостатки:



- сложность разработки алгоритмов по выведению формации, поддержанию и ее реконфигурации из-за ограниченных информационного и энергетического ресурсов;
- так как масса спутников мала, то и запас энергии на таких спутниках мал, поэтому время активной жизни каждого спутника много меньше времени жизни большого спутника;
- размещение датчиков на разных спутниках вносит дополнительные ошибки измерений, возникающие за счет неточного выдерживания и определения относительного положения объектов в формации.

Переход от одиночного спутника к формации является качественным скачком в задачах исследования космического пространства, так как формации являются не просто увеличением количества спутников, но и толчком для разработки новых технологий, новых алгоритмов управления и новых, более эффективных способов решения полезных и нужных задач в космосе.

Даже при перечисленных недостатках разработка формаций малых спутников, а также алгоритмов идентификации и управления, является хорошей наглядной исследовательской задачей для студентов и аспирантов научных и инженерных специальностей. Использование малогабаритных спутников, требующих относительно короткого по времени технологического цикла идея-разработка-изготовление-испытание-запуск-эксплуатация, позволяет реализовать проект в рамках периода обучения. Именно поэтому формации, состоящие из малогабаритных спутников, — рабочее поле для университетов.

Международное космическое сообщество уделяет пристальное внимание развитию рассматриваемого направления – раз в два года проводятся специализированные конференции, например, IAA и IAF регулярно проводят International Workshop on Satellite Constellation and Formation Flying, на всех основных научных мероприятиях организуются отдельные секции по формациям, национальные и международные научные фонды и программы поддерживают процесс накопления знаний в этой области (в частности, РФФИ, Минобрнаука) и разработку конкретных проектов (FP7).

Отдельная проблема, которая возникает или вскорости возникнет при массовом использовании формаций, особенно состоящих из столь миниатюрных аппаратов типа кубсат, – это их увод после окончания работы с орбиты. Такую задачу можно рассматривать как предтечу для задачи очистки пространства от космического мусора – ведь проще не мусорить, чем потом убирать. Задача, на самом деле, тесно соприкасается с задачей формирования и поддержания формаций, то есть те же средства управления орбитальным движением можно попытаться использовать и для увода аппаратов. Но это уже другие выполняемые в настоящее время исследовательские проекты и тема другой статьи.

И, наконец, надо отметить, что наряду с широко применяемыми на практике *созвездиями* (\constellation), начинающими применяться *формациями* (Formation Flying), введены понятия *роя* (swarm) — группы идентичных спутников, объединенных для достижения одной цели без фиксации взаимного положения, каждый спутник определяет свое положение и управляет положением относительно

остальных спутников, а также *кластера* (cluster) — распределенной системы из разнородных объектов (спутников), предназначенной для достижения в кооперации общих целей [31].

Настоящая статья подготовлена по результатам исследований, выполненных при поддержке РФФИ (гранты №№ 11-01-01800-э\_б, 09-01-00431\_а, 07-01-92001-ННС\_а, 07-01-05004-б), а также ряда трэвэл-грантов, позволивших доложить полученные результаты на зарубежных научных мероприятиях, что, несомненно, способствовало установлению новых научных связей и расширению международного сотрудничества через FP7 и проекты Минобрнауки. Выражаю искреннюю благодарность И.Е. Зараменских за помощь в подготовке статьи.

### Список литературы

1. М.Ю.Овчинников. Малые мира сего. // Компьютерра, 2007, № 15 (683), С.37-41, вариант — <http://www.keldysh.ru/events/ovch.pdf><sup>9</sup>
2. C.D. Jilla, D.W. Miller, Satellite Design: Past, Present and Future // International Journal of Small Satellite Engineering, 1995, Vol.1, No.1.
3. GRACE. Gravity Recovery and Climate Experiment. URL: <http://www.csr.utexas.edu/grace/>
4. M. Kinnersley, Y. Viertel, K. Schefold, Commercial Operations of the Rockot Launch Vehicle for Small and Medium Payloads into Low Earth Orbit // Acta Astronautica, 2003, V. 52, № 9, pp. 931-938.
5. GRACE. Gravity Recovery and Climate Experiment. Mission Operations Status. URL: [http://www.csr.utexas.edu/grace/operations/mission\\_status/](http://www.csr.utexas.edu/grace/operations/mission_status/)
6. W. Xiang, J.L. Jorgensen, Formation Flying: a Subject Being Fast Unfolding in Space // Digest of the 5th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation, Berlin, April 4-8, 2005, Paper IAA-B5-0309P, pp. 85-89.
7. ESA. Future Missions Preparation Office. URL: <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=37936>
8. The Magnetospheric Multiscale Mission. URL: <http://mms.gsfc.nasa.gov/>
9. Y. Saito, M. Fujimoto, K. Maezawa, H. Kojima, T. Takashima, A. Matsuoka, I. Shinohara, Y. Tsuda, K. Higuchi, T. Toda, System Design and Instrument Development for Future Formation-Flying Magnetospheric Satellite Mission SCOPE. URL: <http://www.cosis.net/abstracts/COSPAR2006/01804/COSPAR2006-A-01804.pdf>
10. The SCOPE mission. URL: [http://sprg.isas.jaxa.jp/scope\\_en/index\\_en.html](http://sprg.isas.jaxa.jp/scope_en/index_en.html)
11. NASA's Space Technology 5 Project. URL: [http://www.nasa.gov/vision/universe/solarsystem/st5\\_gallery.html](http://www.nasa.gov/vision/universe/solarsystem/st5_gallery.html)
12. STP Mission Status. URL: <http://stp.gsfc.nasa.gov/documents/mc/magconmissdoc.pdf>
13. Constellation Pathfinder (Nanosat 1). URL: [http://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/constellation-pathfinder.htm](http://space.skyrocket.de/doc_sdat/constellation-pathfinder.htm)

<sup>9</sup> Все ссылки на интернет-ресурсы, приведенные в списке литературы, действительны на 13.05.2013 г.

14. В. Азов. О реализации в США концепции ведения военных действий в едином информационном пространстве // Зарубежное военное обозрение. — 2004. — № 6. — С. 10.
15. W.H. Clohessy, R.S. Wiltshire, Terminal Guidance System for Satellite Rendezvous // Journal of the Aerospace Science, 1960, V. 27, № 9, pp. 653–674.
16. Next Steps for LISA. URL: <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=48728>
17. И. Лисов. EO-1 — экспериментальный аппарат наблюдения Земли // Новости космонавтики. — №1, 2000.
18. S.Q. Kidder, J.A. Kankiewicz, T.H. Von der Haar, The A-Train: How Formation Flying is Transforming Remote Sensing // Paper at Joint AMS/EUMETSAT Satellite Meteorology Conference, Amsterdam, The Netherlands, 24–28 September, 2007.
19. Nicolas Sort, Remote Sensing Tutorial, URL: <http://www.e-booksdirectory.com/details.php?ebook=3163>
20. Darwin (spacecraft). URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Darwin\\_%28ESA%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Darwin_%28ESA%29)
21. Laser Interferometer Space Antenna. URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Laser\\_Interferometer\\_Space\\_Antenna](http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_Interferometer_Space_Antenna)
22. PRISMA - The “Prototype Research Instruments and Space Mission technology Advancement”. URL: <http://www.psatellite.com/prisma/>
23. M. Campbell, R. Rees Fullmer, Ch. D. Hall, The Ion-F Formation Flying Experiments // AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, Clearwater, Florida 23–26 January 2000.
24. QB50 Project Description. URL: <https://www.qb50.eu/>
25. I. Belokonov, I. Glukhova, D. Ivanov, A. Kramlikh, M. Ovchinnikov, I. Timbai, Choice of Project Parameters of the Aerostabilized Nanosatellite for Thermosphere Exploration within QB50 Project // Paper at the 5th European CubeSat Symposium, 3-5 June, 2013, Brussels, Belgium.
26. Space Technologies. URL: <http://www.zarm.uni-bremen.de/>
27. M. Ovchinnikov, D. Bindel, D. Ivanov, G. Smirnov, S. Theil, I. Zaramenskikh, Development and Laboratory Verification of Control Algorithms for Formation Flying Configuration with a Single-Input Control // Acta Astronautica, 2010, V. 67, № 9-10, pp.1157-1163.
28. M.Yu. Ovchinnikov, S.P. Trofimov, Hao-Chi Chang, Deployment of Radio Occultation Constellation via Single-Input Control // Acta Astronautica, 2013, V. 82, № 1, pp. 80–87. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.04.032>
29. A. Baranov, A. Prado, M. Ovchinnikov, A. Baranov (Jr), Using of Constant Low Thrust for Deployment and Maintenance of Satellite Constellation // Paper at 6th International Workshop on Satellite Constellation and Formation Flying, Taipei, Taiwan, 1-3 November, 2010, 12 p.
30. A. Guerman, M. Ovchinnikov, G. Smirnov, S. Trofimov, Formation Flying with a Single-Input Control: Existence and Stabilization of Closed Trajectories, Special Issue on "Mathematical Methods Applied to the Celestial Mechanics of Artificial

Satellites", *Mathematical Problems in Engineering Journal*, Vol.2012, Article ID 967248, 20 p.

31. К. Schilling, Preparing Technologies for Pico-satellite Networks: the UWE-3 and UWE-4 Missions // Paper IWSCFF-2013-01-06 at the 7th International Workshop on Satellite Constellations and Formation Flying, Lisbon, Portugal, 13-15 March, 2013, 6 p.