

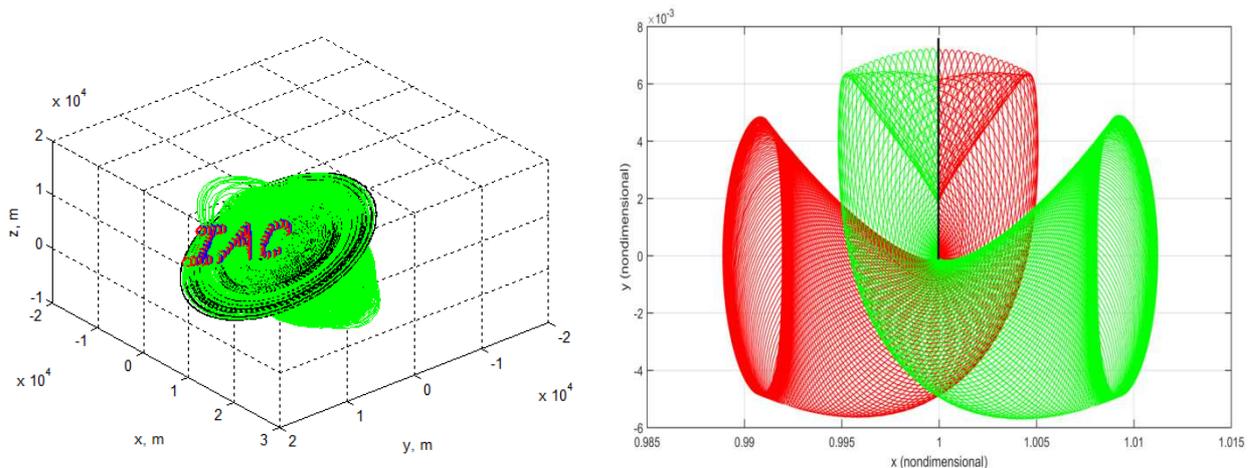
## МАЛЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТ И ДАЛЬНЕГО КОСМОСА. ПРОБЛЕМЫ ДИНАМИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

Овчинников М.Ю.

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва

e-mail: [ovchinni@keldysh.ru](mailto:ovchinni@keldysh.ru)

Появление малых космических аппаратов (МКА) в последней декаде прошлого века привело к революционному переосмыслению парадигмы полета в космос – на чем лететь, как разрабатывать, конструировать, изготавливать, испытывать, кто это должен и может делать, какие полезные задачи можно возложить на МКА и, в конце концов, как управлять их движением, обеспечивая решение поставленных задач с учётом новых ограничений и особенностей их создания и эксплуатации. Пионерские работы были выполнены, как и следовало ожидать, в университетах. Именно там сконцентрирована инициативная, ищущая, зачастую без комплексов и зашоренностей, но и не обладающая необходимыми знаниями и практическим опытом творческая рабочая сила.



Если говорить о предмете нашего исследования – динамике и управлении движением, то использовались раскрываемые гравитационные штанги со сферическим магнитным демпфером, гистерезисными стержнями, токовыми катушками, аэродинамические стабилизаторы, постоянные магниты с гистерезисными стержнями, стабилизация собственным вращением с нутационным демпфером. Состав датчиков и актюаторов во многом определялся слабой энергетикой и низкими мощностями бортовых вычислительных средств, поэтому доминировали пассивные или полупассивные методы ориентации. Об управлении орбитальным движением речи и не шло. Но активно рождались старт-ап'ы, стали проявлять интерес к МКА и большие фирмы. Технологии создания МКА совершенствовались, появилась достаточно мощные бортовые компьютеры, энергоёмких аккумуляторы и эффективные солнечные батареи. Это способствовало внедрению активных способов ориентации, ранее бывших прерогативой больших КА. Энергетики стало хватать на обеспечение работы маховиков и токовых катушек, магнитометров, звездных камер и, главное, достаточно мощных бортовых компьютеров, что позволило эффективным алгоритмы идентификации движения и управления реализовывать на борту в режиме реального времени. Появление малогабаритных реактивных двигателей привело, наконец, к реализации многоспутниковых систем - как типа конstellация (созвездий), когда МКА разводят по орбите, образуя сети для решения задач навигации, наблюдения Земли, интернета вещей, так и типа формаций, когда аппараты летят в непосредственной близости друг от друга, решая совместную задачу по принципу распределенной системы. Те и другие требуют управления относительным положением, ибо гравитационное поле Земли, в основном за счёт полярного сжатия, разрушает и весьма эффективно изначально выстроенную конфигурацию. Наличие движителей как активных, так и использующих эффекты сопротивления атмосферы, электромагнитного взаимодействия, позволяет решать задачи поддержания заданной пространственной конфигурации и переконфигурирования в зависимости от требований полезной нагрузки. Следует отметить, что конstellации на базе МКА уже реализованы или реализуются, но формации пока носят демонстрационный характер, за исключение, пожалуй, парных спутников типа GRACE, выполнявшие гравиметрические измерения. Отдельно стоят МКА для межпланетных перелетов. С точки зрения динамики необходимо уметь решать проблему отлёта от планеты старта и

торможения у планеты назначения. При наличии у МКА двигателя малой тяги типа электрореактивного двигателя можно уйти по спиральной траектории из сферы действия и после перехода в сферу действия планеты назначения также по спирали приблизиться к ней. Так летал европейский SMART. Однако радиационный условия около Земли все равно требуют доставки МКА на достаточно высокую орбиту, чтобы за время "раскрутки" спирали аппарат не успел набрать критическую дозу радиации. Если же есть возможность "уйти" от Земли попутным запуском на разгонном блоке или, как на планируемой сейчас миссии с использованием SLS, уйти с КА Орион, то возникнет задача торможения у планеты назначения. Усилий двигателя малой тяги здесь недостаточно - он просто не успеет затормозить МКА и тот перейдет в сферу влияния Солнца. Кстати, в этом случае Солнце может и помочь ведь надо уменьшить константу энергии в ограниченной задаче Земля-Луна-МКА и внешнее гравитирующее тело - Солнце вполне этому может помочь. Требуются расчеты и весьма точные, чтобы МКА, совершив гравитационный маневр около Луны, ушел к Солнцу, которое затормозит его настолько, чтобы, вернувшись в систему Земля-Луна, сблизиться Луной и оказаться захваченным ее гравитационным полем. Правда, двигатель малой тяги все равно понадобится чтобы помочь Солнцу снизить значение константы Якоби и выстроить нужную орбиту вокруг Луны и поддерживать ее на околулунном этапе миссии. Интересные идеи привносит использование инвариантных многообразий, возникающих в окрестности неустойчивых точек либрации в задаче трех тел.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-11-00256, <https://rscf.ru/project/19-11-00256/>.