

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки

«Институт космических исследований
Российской академии наук»



Д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

Петрукович А.А.

май 2024 г

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Институт космических исследований Российской академии наук»

на диссертацию Монаховой Ульяны Владимировны

«Исследование динамики управляемого относительного движения группы малых
космических аппаратов на низкой околоземной орбите»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин»

К настоящему времени большое практическое и научное применение получили группировки, или созвездия, малых космических аппаратов (МКА), находящиеся на околоземных орбитах. Такие группировки состоят из некоторого количества спутников, работающих как единая система, и служат для связи, навигации, дистанционного зондирования и решения других прикладных и научных задач. При этом требуется поддерживать заданную конфигурацию входящих в группировку спутников; это может быть достигнуто путём корректирования орбит спутников их собственными двигательными установками (ДУ). Однако это крайне нежелательно для миниатюрных наноспутников или спутников класса CubeSat, поскольку наличие ДУ на борту снижает полезную нагрузку, а время существования группировки ограничено запасами топлива (или рабочего тела в случае использования ЭРДУ).

В своей диссертационной работе Монахова У.В. предлагает использовать для поддержания заданной конфигурации группировки спутников аэродинамические силы, которые относятся к так называемому классу бестопливных: для их реализации не требуется наличия двигательной установки. Такой подход делает предлагаемую диссертационную работу **актуальной и практически значимой**.

Общая характеристика работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка использованной литературы. Общий объём диссертации составляет 103 страницы, включая 37 рисунков и 1 таблицу. Список литературы состоит из 99 наименований.

Во Введении приводится обзор существующих подходов к управлению относительным движением группы космических аппаратов, а также показывается актуальность и практическая значимость проводимого исследования. Ставятся цели и задачи исследования, приводится список основных публикаций по теме диссертации и обосновывается соответствие диссертации паспорту специальности.

В первой главе рассматривается задача обеспечения ограниченного относительного расстояния между МКА после их кластерного запуска и отделения от верхней ступени ракеты-носителя. Задача решается с использованием децентрализованного алгоритма управления относительным движением МКА. При этом предполагается, что каждый МКА может определять относительное движение только тех аппаратов в группе, которые находятся в его зоне видимости, т.е. в пределах заданного расстояния от него (радиуса видимости). Основной идеей предложенного в работе алгоритма управления является уменьшение среднего относительного дрейфа каждого МКА. Для исследования относительного движения под действием закона управления используется представление группы МКА в виде графа, вершинами которого являются МКА, а рёбра между вершинами появляются лишь в случае, когда аппараты попадают в зону видимости друг друга. Показано, что эволюция дрейфов каждого МКА относительно орбитальной системы координат описывается системой линейных дифференциальных уравнений, матрица которой связана с нормированной матрицей Кирхгофа этого графа (линеаризация в рассматриваемом случае допустима, так как расстояния между МКА предполагаются относительно небольшими). Это означает, что в случае связности графа все дрейфы аппаратов сходятся к одному и тому же значению, т.е. группа будет двигаться как целое и не будет распадаться на подгруппы. Приводятся аналитические оценки необходимого радиуса видимости в зависимости от скорости и ошибок отделения МКА, обеспечивающего сохранение связности графа. Эти аналитические оценки в дальнейшем подтверждаются при помощи метода Монте-Карло. Также проводится анализ влияния внешних возмущений и предлагается ещё один алгоритм управления на основе средних дрейфов и сдвигов, который демонстрирует улучшенную сходимость.

Вторая глава посвящена задаче построения и поддержания треугольной спутниковой формации трёх МКА. Исходной предпосылкой здесь является то, что МКА должны образовывать правильный треугольник в проекции на поверхность Земли при пролете экваториальной зоны, причём размер этого треугольника в ходе миссии должен изменяться от 100 до 1000 км. Для решения этой задачи в работе предлагается использовать влияние второй зональной гармоники гравитационного потенциала Земли и аэродинамическое сопротивление. Влияние второй зональной гармоники на скорость дрейфа долготы восходящего узла (ДВУ) зависит от наклона орбиты, что используется в работе для обеспечения заданной скорости изменения размеров треугольника. Аэродинамическое же сопротивление используется для фазирования аппаратов по аргументу широты, что позволяет сохранять правильность треугольника в ходе миссии. Для этого предлагается алгоритм управления площадью поперечного сечения МКА типа пропорционально-дифференциального регулятора. Также при помощи метода Монте-Карло проводится исследование влияния внешних возмущений, таких, как более высокие

гармоники разложения гравитационного потенциала, неточность знания модели атмосферы и ошибок начальных данных, на «качество» треугольной формации.

В третьей главе рассматривается задача обеспечения орбитальной стабилизации вытянутого МКА при помощи магнитных катушек. Эта задача возникает в том числе при реализации предложенных ранее алгоритмов управления относительным движением: для обеспечения необходимой площади поперечного сечения требуется ориентировать аппарат заданным образом относительно орбитальной системы координат. В частности, в работе рассматриваются два положения: аппарат ориентирован вытянутой стороной вдоль радиус-вектора, и аппарат ориентирован продольной стороной вдоль вектора скорости. Для поддержания ориентации используется алгоритм на основе прямого метода Ляпунова с шестью весовыми коэффициентами. При этом учитывается, что магнитные катушки не могут обеспечить управляющий момент вдоль вектора магнитного поля. Для выбора шести управляющих коэффициентов применяется теория Флоке и численная оптимизация степени устойчивости в упрощенной постановке задачи, когда аппарат движется по круговой кеплеровской орбите, а в качестве модели магнитного поля используется прямой диполь. В дальнейшем эффективность предложенного алгоритма исследуется при наличии различных возмущений, в том числе аэродинамического момента, более сложной модели магнитного поля и неточности знания тензора инерции. Также, на примере задачи поддержания треугольной спутниковой формации, показывается возможность применения этого алгоритма для обеспечения требуемого относительного движения.

В заключении представлены основные достигнутые в работе результаты.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Достоверность результатов диссертации подтверждается как корректным выбором методов исследования, так и достаточно массивным численным анализом, что показывает адекватность полученных аналитических результатов.

Апробация. Результаты работы докладывались на многочисленных российских и международных конференциях и научных семинарах, а также полно представлены в 10 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК, из которых 5 индексируются базами научного цитирования SCOPUS и/или Web of Science, 3 – статьи в сборниках трудов конференций, индексируемых в SCOPUS и/или Web of Science.

Научная новизна представленного исследования не вызывает сомнений. В частности, к новым результатам можно отнести: сведение задачи анализа управляемого движения группы МКА с ограниченными зонами видимости к исследованию соответствующего графа; выбор начальных орбит и алгоритм фазирования аппаратов для обеспечения заданного движения треугольной спутниковой формации; стабилизация различных орбитальных положений при помощи магнитных катушек.

Теоретическая значимость работы определяется применением классических методов теоретической механики, теории устойчивости и теории графов.

Практическая значимость работы обусловлена возможностью применения предложенных подходов по управлению относительным движением в реальных космических миссиях, в том числе по исследованию магнитосферы Земли и исследованию гамма-вспышек земного происхождения. Полученные оценки необходимого радиуса видимости окажутся полезны при проектировании систем относительной навигации, а

алгоритм орбитальной стабилизации позволяет расширить возможности МКА, оснащенных только магнитной системой ориентации.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации. Основные результаты диссертационного исследования могут быть использованы профильными организациями (НПО им. С.А. Лавочкина, РКК Энергия, ИСС им. М.Ф. Решетнёва и др.) при проектировании космических миссий группового полёта на низкой околоземной орбите.

Имеется ряд замечаний к диссертационной работе:

1. Введённая на стр. 18 орбитальная система координат определена неоднозначно: оси x и y заданы с точностью до знака. Это не влияет на результат, тем не менее следовало задать систему координат однозначно или указать, что имеющаяся неоднозначность не влияет на результат.

2. В табл. 1 на стр. 31 среднеквадратическое отклонение ошибочно названо дисперсией.

3. На стр. 49 приводится информация о том, что конфигурация группировки из 80 спутников типа CubeSat компании Planet Labs поддерживалась аэродинамическими силами. Однако не указано, чем отличается подход Planet Labs от предложенного автором диссертации подхода.

4. На стр. 51 указано, что средний радиус Земли составляет 6378 км. Однако это величина не среднего, а экваториального радиуса; средний радиус Земли равен 6371 км.

5. На стр. 54 рассматриваются почти круговые орбиты, при этом предполагается, что $e = 0$ и $p = a$. Однако почти круговые орбиты тем и отличаются от круговых, что для них $0 < e \ll 1$ и соответственно $p \neq a$. Т.е. фактически в этом разделе речь идёт о круговых орбитах.

6. На стр. 58 вводятся коэффициенты k_1 , k_2 без объяснения, что они собой представляют; неясно, задаются эти коэффициенты или каким-то образом определяются, не указаны их области значений.

Оценка работы в целом. Упомянутые недостатки не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертация выполнена на высоком научном уровне, а выводы и результаты являются полностью обоснованными. В целом диссертационная работа Монаховой У.В. является законченной научно-исследовательской работой, а поставленные цели и задачи исследования решены в полном объеме.

Диссертация Монаховой Ульяны Владимировны «Исследование динамики управляемого относительного движения группы малых космических аппаратов на низкой околоземной орбите» удовлетворяет всем требованиям Положения ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной выше специальности.

Отзыв обсужден и одобрен на Семинаре ИКИ РАН "Механика, управление и информатика" под руководством д.т.н. Назирова Р.Р. (протокол № 3-04/24 от 25.04.2024).

Отзыв составил

Суханов Александр Александрович
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
отдела «Космическая динамика и
математическая обработка информации»
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
«Институт космических исследований
Российской академии наук» (ИКИ РАН),
117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32
Тел.: +7-495-333-20-88, e-mail: iki@cosmos.ru

14 мая 2024



Подпись руки Суханова А.А. заверяю.
Садовский А.М.
Учёный секретарь ИКИ РАН

“16” мая 2024 г.

