

## ОТЗЫВ

официального оппонента Петухова Вячеслава Георгиевича  
на диссертационную работу 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.

**Актуальность темы диссертации** обусловлена развитием космических систем для решения прикладных и фундаментальных научных задач, включающих в себя большое число малых космических аппаратов (МКА), образующих либо орбитальные группировки с большим удалением МКА друг от друга, либо компактную группу МКА. В обоих вариантах, как правило, требуется формирование и поддержание требуемой конфигурации орбитальной системы. Для решения этой задачи традиционно используются двигательные установки космических аппаратов. Однако, при использовании МКА, не всегда существует возможность включения в их состав двигательных установок, но даже при их наличии требуемые затраты топлива могут существенно ограничивать срок эксплуатации орбитальной группировки. Поэтому актуальной является проблема управления орбитальным движением МКА с использованием внешних сил, таких как сила светового давления или аэродинамическая сила. Решение этой проблемы позволяет обеспечить управление орбитальным движением МКА без расхода топлива, только за счет управления угловым положением МКА, изменяющим величину и направление действующих на МКА внешних сил. Разумеется, такой способ управления имеет определенные ограничения на ориентацию целевой аппаратуры, солнечных батарей и бортовых антенн, на тип и точность исполнения орбитальных маневров. Для обеспечения его эффективности необходимо проведение новых исследований. В связи с этим, диссертационная работа У.В. Монаховой, посвященная разработке методов построения управления относительным движением МКА в групповом полете с использованием аэродинамических сил на низких околоземных орбитах, безусловно, является актуальной.

### Структура и содержание работы

Диссертационная работа У.В. Монаховой состоит из введения, трех глав и заключения.

**Во введении** приведены обзор известных подходов к управлению орбитальным движением в групповом полете МКА, цели и задачи работы, обоснованы ее актуальность и практическая значимость.

**Первая глава** посвящена решению задачи обеспечения орбитального движения группы МКА в пределах малой ограниченной области пространства после их отделения в процессе кластерного запуска. Считается, что каждый МКА оснащен системой для оценки относительного движения других МКА при условии, если расстояние до другого МКА не превышает заданное (малое) значение. Управление относительным орбитальным движением осуществляется с помощью дифференциальной силы аэродинамического сопротивления, реализуемой с помощью различной ориентации различных МКА в орбитальной системе координат. Управление строится на основе линеаризованной модели относительного движения МКА в окрестности круговой опорной орбиты. Для обеспечения компактности группы МКА предлагается управление, пропорциональное либо среднему дрейфу видимой группы МКА, либо взвешенной сумме среднего дрейфа и среднего сдвига вдоль орбиты. В работе разработана методика выбора коэффициентов обратной связи в законе управления и получена аналитическая оценка требуемого радиуса зоны связи МКА для обеспечения связности группы МКА при заданных ошибках векторов скоростей

отделения. Верификация работоспособности предложенного метода управления относительным орбитальным движением в группе МКА проводилась численным исследованием методом Монте-Карло с учетом дисперсии компонент скоростей отделения МКА. Для численного моделирования использовалась модель 3U-кубсата, постоянная плотность атмосферы и модель геопотенциала, учитывающая либо только его основную часть, либо основную часть со второй зональной гармоникой.

**Во второй главе** рассматривается задача обеспечения орбитальной конфигурации в виде равностороннего треугольника для системы из трех МКА при прохождении экваториальной зоны, которая необходима для локализации гамма-вспышек в атмосфере Земли по бортовым измерениям. Предполагается, что в силу особенностей проведения измерений за один год функционирования орбитальной группировки сторона треугольника должна увеличиться от 100 до 1000 км. Рассматривается управление орбитальным движением с использованием сил аэродинамического сопротивления и с помощью выбора начальных условий движения МКА для обеспечения заданной геометрии относительного движения МКА в нецентральной гравитационном поле Земли. Для формирования правильного треугольника рассматривается вариант построения, когда два МКА находятся на одной околокруговой орбите, но с разными аргументами широты, а третий находится на другой орбите с небольшим отличием в наклонении орбиты. Требуемое изменение стороны треугольника, образуемого МКА при прохождении экваториальной зоны, обеспечивается разностью скоростей прецессии орбит с разным наклонением и дрейфом вдоль орбиты, обеспечиваемым управлением силой аэродинамического сопротивления МКА за счет изменения их ориентации. Предложен закон управления в виде линейной обратной связи с ограничениями на предельные величины управляющего воздействия (эффективной аэродинамической площади МКА), позволяющий поддерживать требуемую орбитальную конфигурацию при изменении ориентации МКА не чаще, чем один раз за виток. Проведено численное моделирование движения группы МКА формата 3U с учетом геопотенциала  $10 \times 10$ , динамической модели атмосферы и с учетом вращения атмосферы, включая оценку влияния ошибок в начальных условиях движения МКА, выполненную с использованием метода Монте-Карло. Показана возможность поддержания требуемой конфигурации орбитальной группировки при достаточно малых ошибках в начальных условиях.

**Третья глава** посвящена задаче управления движением МКА относительно центра масс для задания требуемой площади поперечного сечения относительно набегающего потока. В качестве исполнительных органов системы ориентации МКА рассматриваются электромагнитные катушки. Рассматривается случай, когда моменты инерции МКА относительно поперечных осей связанной системы координат равны и больше момента инерции относительно продольной оси, которой соответствует типичному МКА фактора 3U. Для синтеза закона управления в диссертации используется прямой метод Ляпунова. Управление строится таким образом, чтобы обеспечить сходимость к опорному движению, представляющему собой движение МКА в состоянии устойчивого или неустойчивого положения гравитационного равновесия. Для синтеза управления используется математическая модель магнитного поля Земли в виде прямого диполя, орбита МКА считается круговой. Для демонстрации работоспособности разработанного метода управления проведено численное моделирование, учитывающее точную модель магнитного поля Земли IGRF, модель атмосферы (постоянной плотности или динамическую), модель геопотенциала (центральное поле или геопотенциал  $10 \times 10$ ), ошибку бортовых измерений вектора магнитной индукции магнитного поля Земли, ошибку знания тензора инерции МКА, отклонение центра масс МКА от его геометрического центра. Показано, что при достаточно малом смещении центра масс МКА от его геометрического центра достижима точность стабилизации углового движения порядка  $4-6^\circ$ , а при переориентации МКА между положениями устойчивого и неустойчивого

гравитационного равновесия переходной процесс занимает несколько часов. Продемонстрирована возможность применения предложенного управления ориентацией МКА к задаче поддержания треугольной формации, рассмотренной во второй главе.

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в ходе диссертационного исследования.

Автореферат соответствует содержанию диссертации и достаточно полно его отражает.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

В работе предложены новые алгоритмы управления относительным движением МКА за счет дифференциальной силы аэродинамического сопротивления. Разработан новый алгоритм управления компактной группой МКА с учетом ограничений на радиус зоны связи между отдельными МКА. Получена аналитическая оценка зависимости требуемого радиуса связи от разброса вектора скорости отделения отдельных МКА и новые результаты аналитического исследования управляемого движения, подтвержденные статистическим моделированием. Предложен новый подход к управлению движением группы из трех МКА, образующих треугольную формацию в окрестности экватора для регистрации и локализации гамма-вспышек в атмосфере Земли по бортовым измерениям. Для обеспечения нужной величины аэродинамического сопротивления предложен новый алгоритм активного магнитного управления ориентацией с матрицей параметров управления, выбор которых осуществляется с использованием теории Флоке.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается использованием известных математических моделей и методов, а также численным моделированием с учетом основных факторов, оказывающих воздействие на движение рассматриваемых динамических систем.

**Практическая значимость** определяется применимостью предложенных в работе подходов к использованию в перспективных космических миссиях.

По диссертации можно сделать следующие замечания:

- 1) Представленный в первой главе алгоритм управления компактной группой МКА не обеспечивает управление эксцентриситетом (параметра  $A_i$  в системе (2)), в результате чего выход отдельных МКА за пределы радиуса зоны связи возможен не только за счет дрейфа, но и из-за периодической компоненты относительного движения. Несмотря на то, что в работе делается допущение о малости начального значения  $A_i$ , отсутствие контроля этого параметра может привести к его увеличению в процессе управления относительным смещением и скоростью дрейфа МКА и, соответственно, к ускорению выхода МКА из зоны связи. Возможно, стоило бы рассмотреть вариант управления, гарантирующий невозрастание  $A_i$  (например, «разгон» только в районе апогея и «торможение» только в районе перигея).
- 2) При численном моделировании компактной группы МКА (раздел 1.6) используется постоянное значение плотности атмосферы. Понятно, что в рассматриваемой малой области пространственная вариация плотности атмосферы будет мала, однако в зависимости от времени величина плотности атмосферы на такой высоте может изменяться более, чем на порядок. Это приведет к вариации дифференциальной силы аэродинамического сопротивления и к изменению траекторий относительного движения МКА.
- 3) Не вполне понятно, почему в численных примерах использовалось значение коэффициента аэродинамического сопротивления  $c_x = 1$ . Для тел простой геометрической формы этот коэффициент обычно имеет значения порядка 2.2...2.5.

- 4) В задачах управления компактной группой МКА (глава 1) и поддержания треугольной формации МКА (глава 2) управление относительным орбитальным движением осуществляется изменением ориентации МКА на большие углы (порядка 90 градусов). Необходимость решения целевой задачи (например, фиксация вспышек оптическими датчиками МКА треугольной формации) может накладывать ограничения на программу управления, которые не были рассмотрены в работе.
- 5) Переходные процессы предложенного в третьей главе алгоритма управления угловым движением с помощью активной магнитной системы ориентации занимают несколько часов, поэтому, вероятно, он не может быть использован для задачи управления относительным движением компактной группы МКА, рассмотренной в первой главе.
- 6) В работе присутствует ряд неточностей, например коэффициент аэродинамического сопротивления  $c_x$  называется баллистическим коэффициентом.

Перечисленные замечания **не влияют** на общую положительную оценку работы. Научные положения, выводы и результаты, сформированные в диссертации, являются **обоснованными**.

**Заключительные выводы.** Диссертационная работа У.В. Монаховой по содержанию и представленным результатам **соответствует** паспорту специальности 1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин» и **удовлетворяет** требованиям Положения ВАК (в текущей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор – Монахова Ульяна Владимировна – **заслуживает** присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин».

Официальный оппонент  
доктор технических наук  
член-корреспондент РАН,  
и.о. директора Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Вячеслав Георгиевич Петухов

125080, Москва, Ленинградское шоссе, д. 4, а/я 43

E-mail: [PetukhovVG@mai.ru](mailto:PetukhovVG@mai.ru)

Тел.: +7 (499) 158-00-20

«27» 09 2024 г.

В.Г. Петухов

Подпись сотрудника МАИ  
В.Г. Петухова удостоверяю:  
Зам. начальника управления по работе  
с персоналом МАИ



М.А. Иванов