

ОТЗЫВ

официального оппонента Петухова Вячеслава Георгиевича
на диссертационную работу Чжоу Сяо на тему
**«Оптимальное управление космическим аппаратом с малой тягой в задаче
некомпланарного сближения с пассивным объектом»**,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 2.5.16 — Динамика, баллистика, управление движением
летательных аппаратов

Актуальность темы исследований. В диссертации рассматривается пространственная задача оптимального управления относительным движением космического аппарата (КА) с малой тягой. Данная задача имеет большое практическое значение для проектирования и баллистического сопровождения многих космических миссий, включая миссии, предусматривающие сближение или стыковку КА, групповой полет нескольких КА, увод с орбит объектов космического мусора.

Задача оптимального управления относительным движением КА, методы ее решения изучались многими авторами, по результатам исследований которых уже сформированы теоретические основы оптимального относительного движения в окрестности круговых орбит. Однако задачи оптимизации пространственных траекторий относительного движения КА с малой тягой к настоящему времени трудно считать полностью изученными, требуется дальнейшая проработка как теоретических вопросов этой задачи, так и разработки эффективных методов для ее решения. Поэтому тема диссертационной работы «Оптимальное управление космическим аппаратом с малой тягой в задаче некомпланарного сближения с пассивным объектом» является *актуальной*.

Структура работы. Диссертационная работа Чжоу Сяо состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во **введении** сформулирована актуальность, приведен краткий обзор существующих работ по теме диссертации, поставлены цель и задачи исследования, а также сформулирована теоретическая и практическая значимость диссертации.

В **первой** главе рассматривается состояние задачи управления относительным движением КА, включая развитие российских и зарубежных технологий сближения КА на орбите, рассмотрение моделей управления КА в задаче сближения с использованием импульсной и конечной тяги, классификацию двигателей КА малой тяги, уравнения относительного движения космических объектов и методы решения краевой задачи, возникающей при использовании принципа максимума Л.С. Понтрягина для решения задачи оптимального управления относительным движением КА.

Во **второй** главе рассматривается оптимальное управление относительным движением КА с свободной ориентацией вектора тяги. Приводятся уравнения



относительного движения в цилиндрической системе координат и выводятся безразмерные уравнения относительного пространственного движения. Приводится постановка задачи оптимизации управления относительным движением в задаче сближения и рассматриваются особенности применения принципа максимума к этой задаче. Выводятся необходимые условия оптимальности для задач минимизации времени перелета и минимизации моторного времени. Рассматриваются особенности типовых оптимальных траекторий. Для задачи оптимального быстрогодействия анализируется влияние начальных фаз и амплитуд начальной периодической составляющей относительного движения на оптимальные траектории. Приведена оценка степени неоптимальности поэтапного управления, когда коррекция продольного и бокового движения выполняется не одновременно, а последовательно.

В **третьей** главе рассматривается оптимальное управление относительным движением КА при ориентации тяги в плоскости местного горизонта, включая оптимальное управление по быстрodeйствию и по моторному времени. Выводятся необходимые условия оптимальности и рассматриваются особенности типовых оптимальных траекторий.

В **четвертой** главе рассматривается задача вычисления номинального управления на этапе дальнего и ближнего сближения активного КА с двигателем малой тяги с пассивным объектом. Приводится методика формирования номинального управления, включающего участок формирования большой полуоси орбиты активного КА, участок фазирования и участок точного наведения. Приводятся численные результаты и оценки точности линейной модели при решении краевой задачи на заключительном участке сближения.

В **заключении** сформулированы основные выводы по данному исследованию.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Как следует из текста диссертации, **научная новизна и теоретическая значимость** работы заключаются в следующем:

1. Разработана безразмерная математическая модель с использованием параметров векового и периодического относительного движения, описывающая пространственное сближение маневрирующего космического аппарата с малой тягой с пассивным объектом на околокруговых орбитах, инвариантная к параметрам опорной орбиты и величине ускорения от тяги.

2. На основе принципа максимума Понтрягина разработана методика вычисления оптимального управления пространственным относительным движением КА с малой тягой при свободной ориентации вектора тяги по критериям быстрогодействия и минимума моторного времени.

3. На основе принципа максимума Понтрягина разработана методика вычисления оптимального управления пространственным относительным движением КА с малой тягой при ориентации вектора тяги в плоскости

местного горизонта.

4. Разработана методика вычисления управления КА с двигателем малой тяги в задаче сближения с пассивным объектом с учётом фазирования на этапах дальнего и ближнего наведения.

Практическая значимость работы связана с возможностью использования полученных в диссертационном исследовании Чжоу Сяо результатов в проектировании перспективных космических миссий, в которых требуется управление относительным движением КА. В число таких миссий можно включить все проекты, требующие сближения и стыковки КА, групповой полет нескольких КА на небольших расстояниях, проекты сервисных КА для увода объектов космического мусора.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным использованием теории обыкновенных дифференциальных уравнений, оптимального управления, механики космического полета и известных вычислительных методов, а также соответствием полученных результатов с известными результатами по исследованию относительного движения КА.

Апробация результатов исследования осуществлялась на российских и международных научных конференциях. Основные результаты диссертации автором опубликованы в журналах, индексируемых в базах, входящих в перечень ВАК (2 статьи) и Scopus/Web of Science (1 статья). В публикациях изложены основные результаты диссертации.

Соответствие диссертации и автореферата паспорту специальности

Полученные в работе результаты соответствуют следующим пунктам паспорта специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов: пункту 1 – Разработка и совершенствование математических моделей, используемых для описания движения и управления летательным аппаратом на различных режимах полета; пункту 8 – Синтез терминального управления движением ЛА; пункту 12 – Совершенствование методов навигации и управления движением летательных аппаратов, совершенствование баллистико-навигационного обеспечения полёта летательных аппаратов. Разработка новых методов оптимизации состава навигационных измерений и методов планирования навигационных измерений. Разработка методов оптимальной обработки навигационной информации.

К тексту диссертации имеются следующие **замечания**:

1) Страница 4, 3 абзац: «Однако из-за малой тяги и большего времени перелёта обычно уравнения движения часто сильно нелинейные и имеют плохую сходимость при решении задач оптимального управления». Нелинейность уравнений движения не связана с малостью тяги и большим временем перелета. Малость тяги и большое время перелета не являются непосредственной причиной плохой сходимости численных методов при решении краевых задач принципа максимума.

- 2) Страница 8, предпоследний абзац: «задача оптимизации траекторий относительного движения с малой тягой для случая сближения космических объектов на некомпланарных орбитах ставилась редко». Сложно согласиться с этим утверждением. См., например, А.А. Баранов «Маневрирование космических аппаратов в окрестности круговой орбиты», М., изд.-во Спутник, 2016 и многочисленную библиографию в этой монографии.
- 3) Страница 10, раздел «Научная новизна»: не указано, в чем состоит отличие разработанной безразмерной математической модели от аналогичных моделей, длительное время используемых в работах других авторов. Не указано, чем именно отличаются разработанные методики от уже известных.
- 4) Страницы 40-41, формулы (2.9)-(2.11): не приведена связь переменных l_x, l_y, l_{zx}, l_{zy} с координатами и компонентами скорости.
- 5) Страница 42, формула (2.12): Неправильно: 1) после первого знака равенства не хватает δ , чтобы был верен второй знак равенства; 2) правая часть равна характеристической скорости, а не моторному времени. Для моторного времени в правой части должна равняться δ .
- 6) Страницы 43-44: «Критерий быстрогодействия стремится минимизировать общее время сближения между КА, что может быть важно в случаях, когда требуется быстрое достижение цели, например, для выполнения манёвров в условиях ограниченной доступности топлива или для обеспечения безопасности миссии». В условиях ограниченности топлива нужен не критерий минимизации времени перелета, а критерий минимизации затрат топлива, который равносителен критерию минимизации моторного времени при постоянной величине тяги (реактивного ускорения) и удельного импульса.
- 7) Страница 44: «Для задачи оптимального управления по быстрдействию $\delta \equiv 1 \dots$ и для задачи оптимального управления по минимуму моторному времени, $\delta \in [0; 1]$, который определяться из условия максимума Гамильтониана для уравнения относительного движения.». В задаче оптимального быстрогодействия тождество $\delta \equiv 1$ тоже определяется из условия максимизации гамильтониана по δ . Страница 48, перед формулой (2.26) и далее: «И соответствующая функция переключения имеет вид $\delta=1$ ». Это функция тяги или функция дросселирования. Функция переключения – это множитель при этой функции в гамильтониане.
- 8) Страница 94, формула (4.7): непонятны два последних обозначения во второй формуле 4.7. Чему равны 4 последних переменных?
- 9) В тексте диссертации замечены грамматические и стилистические ошибки, а также случаи неточного использования терминов и определений.

Однако указанные недостатки не затрагивают сути работы и не снижают её общую оценку.

Таким образом, диссертационная работа Чжоу Сяо на тему «Оптимальное управление космическим аппаратом с малой тягой в задаче некомпланарного сближения с пассивным объектом» является завершённой

научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи разработки методики управления движением космического аппарата с двигателем малой тяги в окрестности круговой орбиты, имеющей значение для развития механики космического полета. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.5.16 — «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов» и отвечает требованиям пп. 9-11, 13, 14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Чжоу Сяо, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16 — «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Официальный оппонент

Доктор технических наук
член-корреспондент РАН,
директор 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

Тел: +7(499) 158-00-20

«22» 10 2024 г.



В.Г. Петухов