

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по научной и
инновационной деятельности ОмГТУ,

д.т.н., доцент


П. С. Ложников

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет» (г. Омск) 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

1. Актуальность темы диссертации

Задача оптимизации управления относительным движением космического аппарата (КА) с двигателем малой тяги имеет большое практическое значение для задачи выведения космических объектов на околоземную орбиту, задачи формирования группы орбитальных спутниковых систем, задачи управления движением специальных КА, предназначенных для захвата космического мусора.

Существующие уравнения движения КА малой тяги при большом времени перелета нелинейные и имеют плохую сходимость при решении задач оптимального управления.

Диссертационная работа Чжоу Сяо посвящена сравнительно новой задаче оптимизации программ пространственного относительного движения при свободной ориентации или ориентации тяги в плоскости местного горизонта по критерию быстродействия. Таким образом, поставленная соискателем цель диссертационной работы является актуальной.

2. Оценка содержания работы и личный вклад автора

Диссертация Чжоу Сяо состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы (71 наименование). Объём работы составляет 113 страниц, она содержит 30 рисунков и 12 таблиц.

Во введении сформулирована цель исследования, обоснована её актуальность. Поставлены задачи исследования и обозначены положения, по которым автор претендует на

научную новизну.

В первой главе проанализированы известные исследования по направлению оптимизации траекторий и сближения КА. Автором прояснены существующие классификации двигателей малой тяги. Рассмотрен ряд методов для решения краевых задач, связанных с задачей оптимального управления пространственным движением КА с малой тягой.

Вторая глава посвящена исследованию программ оптимального управления с свободной ориентацией тяги. Автором разработана безразмерная математическая модель, описывающая относительное движение КА в его вековых и периодических переменных для получения универсальных решений. Приведена формальная постановка задачи оптимального управления КА. С применением принципа максимума Понтрягина автором представлена методика получения решения формирования оптимального управления пространственным относительным движением КА с малой тягой при свободной ориентации вектора тяги по критерию быстродействия. Определены оптимальные программы управления при фиксированном общем времени перелёта с теми же граничными условиями. Автором представлено применение метода коллокации и метода гомотопии в задаче сближения по критерию моторного времени для увеличения и обеспечения сходимости краевой задачи при любых граничных условиях.

Третья глава посвящена исследованию программ оптимального управления относительным движением КА с ориентацией тяги в плоскости местного горизонта. Автором разработана безразмерная математическая модель для варианта ориентации тяги в плоскости местного горизонта. Автором также определено оптимальное управление пространственным относительным движением с применением принципа максимума Понтрягина и рассмотрены задачи сближения по критерию быстродействия при типовых граничных условиях. Проведён анализ степени неоптимальности управления по критерию моторного времени при ограничении ориентации тяги при типовых граничных условиях.

В четвертой главе автором рассмотрена задача о некомпланарном перелёте маневрирующего КА с двигателем малой тяги, с околокруговой орбиты выведения в окрестность пассивного КА, находящегося на более высокой орбите. На основе проведённого моделирования перелёта с использованием исходной нелинейной модели относительного движения автором разработана методика формирования номинального управления КА с двигателем малой тяги, в задаче сближения с пассивной целью, находящейся на низкой околоземной орбите с учётом фазирования на этапах дальнего и ближнего наведения.

В заключении кратко перечислены основные результаты работы.

Полученные в диссертационной работе Чжоу Сяо. результаты и выводы могут быть

рекомендованы к использованию на предприятиях космической отрасли для предварительной оценки затрат рабочего тела и времени на довыведения и поддержания орбиты КА, расположенных на низкой околоземной орбите, и в силу универсальности модели движения, других КА, расположенных на круговых околоземных орбитах. Кроме того, *рекомендуется* использовать результаты работы при проведении научно-исследовательских работ и в учебном процессе образовательных организаций при подготовке кадров для авиационной и ракетно-космической промышленности.

Личный вклад автора заключается в проведении теоретических исследований и вычислительных экспериментах, подтверждающие основные положения, вынесенные на защиту.

Диссертация написана ясным научным языком, содержание её глав логически взаимосвязано и в полном объёме раскрывает постановку, методы и алгоритмы решения поставленных задач. Основные результаты исследований опубликованы в 5 работах, в том числе две статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, одна статья в изданиях, индексируемых международными базами Scopus и Web of Science.

Основные научные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на XXV Всероссийском семинаре по управлению движением и навигацией летательных аппаратов. (г. Самара, 2022 г.). Международном семинаре «Навигация и управление движением» (NMC 2022, г. Саратов, 2022 г.). XXVI Всероссийском семинаре по управлению движением и навигацией летательных аппаратов (г. Самара, 2023 г.).

3. Научная новизна, теоретическая и практическая значимость, достоверность полученных результатов

В диссертации получены новые *научные результаты*:

1. Разработана безразмерная математическая модель с использованием параметров векового и периодического относительного движения, описывающая пространственное сближение маневрирующего КА с малой тягой и пассивного объекта на околокруговых орбитах и получена оценка точности модели.

2. На основе принципа максимума Понтрягина разработана методика получения решения формирования оптимального управления пространственным относительным движением космического аппарата с малой тягой при свободной ориентации вектора тяги по критерию быстродействия, по критерию минимума моторного времени.

3. На основе принципа максимума Понтрягина разработана методика получения решения формирования оптимального управления пространственным относительным движением КА с

малой тягой при ориентации вектора тяги в плоскости местного горизонта.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным использованием линейной теории возмущений, классических вычислительных методов, апробированных методов теории оптимального управления и согласованностью полученных результатов с известными результатами по исследованию относительного движения КА.

Теоретическая значимость работы заключается в построении методик определения оптимального управления при некомпланарном сближении КА с непрерывной и дискретной малой тягой методом принципа максимума Понтрягина.

Практическая значимость заключается в разработанном программно-математическом обеспечении, которое предназначено для формирования оптимального номинального управления относительным движением КА с малой тягой.

4. Замечания по диссертационной работе

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. В диссертационной работе приведены научные результаты, но не сформулирована в чем заключается научная новизна, а также чем разработанная методика отличается от существующих.

2. Автором указано, что достоверность полученных результатов обеспечивается согласованностью с известными результатами по исследованию относительного движения КА, однако в работе не приведен данный сравнительный анализ с известными результатами. Приведены только результаты расчета оценок точности линейной модели, что относится к её верификации.

3. В диссертационной работе построена безразмерная математическая модель относительного движения, которая, как показано самим же автором, инвариантна к параметрам опорной орбиты и проектным характеристикам КА. Однако автором приводятся численные расчёты только для низкой орбиты с высотой 1000 км в четвёртой главе.

4. Автором получено универсальное номинальное оптимальное управление в задаче сближения на безразмерной модели для трёх типовых граничных условиях. Автором не упоминается допустимая область применения этого решения, связанная с ошибкой между линейной и нелинейной моделями.

Несмотря на отмеченные недостатки, данные замечания *не снижают* общей положительной оценки теоретической и практической значимости представленной диссертации. Они носят частный характер и могут рассматриваться как рекомендации на дальнейшее развитие работы.

5. Общее заключение по диссертационной работе

Диссертационная работа Чжоу Сяо является законченной работой, которая выполнена на высоком уровне, содержит результаты, обладающие научной новизной, и соответствует паспорту специальности 2.5.16. Динамика баллистика, управление движением летательных аппаратов.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Представленная диссертация «Оптимальное управление космическим аппаратом с малой тягой в задаче некомпланарного сближения с пассивным объектом» соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Правительством РФ от 24 сентября 2013 года №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Чжоу Сяо, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16. Динамика баллистика, управление движением летательных аппаратов.

Диссертационная работа Чжоу Сяо, автореферат диссертации, а также отзыв ведущей организации рассмотрены и одобрены на заседании кафедры «Авиа- и ракетостроение» (протокол № 2 от 13.09.2024 г.).

Отзыв ведущей организации подготовили:

Заведующий кафедрой «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ,

канд. техн. наук, доцент

А.Б. Яковлев

Профессор кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ,

д-р техн. наук, профессор

В.И. Трушляков

Старший преподаватель кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ,

канд. техн. наук

В.А. Урбанский

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет»

Почтовый адрес:

пр. Мира, 11, г. Омск, 644050

телефон: +7 (3812) 65-34-07

e-mail: info@omgtu.ru

Подписи: А.Б. Яковлева, В.И. Трушлякова, В.А. Урбанского
И.о. начальника управления персоналом С.Н.А. Жакочева
07.10.2024

