ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Сергаевой Елизаветы Андреевны «ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ С ЭЛЕКТРОРАКЕТНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16 Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

Диссертация Елизаветы Андреевны Сергаевой посвящена задаче оптимизации управления космического аппарата (КА) при полете с электроракетной двигательной установкой (ЭРДУ) для исследования малых тел Солнечной системы (СС). Малые тела Солнечной системы зачастую имеют неправильную форму со сложным полем гравитации, которое, к тому же, обычно плохо известно. Это затрудняет разработку методики и алгоритма формирования управления полетом КА в окрестности малого тела (астероида, ядра кометы и т.д.).

Автором предложен и использован для решения данной задачи оригинальный подход, основанный на моделировании небесного тела как системы гравитирующих точек и на принципе максимума Понтрягина Л.С. Представляется, что важным для практического построения оптимальной программы управления является применение диссертантом локально-оптимальных законов управления. В результате автором разработаны методика и алгоритмы решения задачи управления движением КА с использованием ЭРДУ при полете от Земли к малому телу и в его окрестности. В работе приведены примеры полученных траекторий КА.

Актуальность работы определяется все увеличивающимся масштабом применения ЭРДУ для космических операций, с одной стороны, и актуальностью исследования малых тел, с другой стороны. Исследование малых тел Солнечной системы важно в силу ряда факторов: – это, во-первых, помогает лучше понять процесс возникновения и развития Солнечной системы, так как вещество малых тел несет большую информацию об этих процессах; – это, далее, важность малых тел в изучении проблемы астероидно-кометной опасности для Земли; и, далее, это – важность малых тел как источников для получения дефицитных материалов. Исследование данной задачи с помощью оптимизации траектории с учетом

Входящий № 206-1827
Дата 25 МАР 2024
Самарский университет

сложной структуры силового поля вблизи малого небесного тела позволяет математически корректно решить данную сложную проблему.

Научная методология исследования. Диссертант решает задачу методами математического моделирования. При этом оптимальная траектория, для которой минимален расход топлива, получается непрямыми методами. В качестве основы своего метода анализа диссертант использует принцип максимума Л. С. Понтрягина. Автор выписывает систему дифференциальных уравнений управляемого движения КА с учетом ряда возмущений при заданной начальной орбите и условиях трансверсальности в конце траектории. Для решения задачи диссертант с успехом применяет ряд приемов, помогающих улучшить сходимость решения краевой задачи, в частности, использует сначала упрощенное начальное приближение, затем уточняет его, решая задачу.

Основное содержание, результаты работы

Во **Введении** автор дает сначала **Общую характеристику работы** с анализом задачи предварительного, номинального проектирования траектории полета к малому телу СС. Затем анализируется **актуальность** проблемы; **степень разработанности;** формулируется **цель** работы – разработка методики баллистического проектирования миссий КА с ЭРДУ к малым телам СС; **решаемые задачи** – разработка математической модели объектоцентрического движения КА с ЭРДУ с учетом возмущений от Солнца и астероида; разработка модели притяжения малого тела для случая двух точек; разработка модели оптимального номинального управления на гелиоцентрическом участке с учетом условий трансверсальности; разработка модели оптимального управления на объектоцентрическом участке движения КА с ЭРДУ для маневров и поддержания орбиты; разработка программ автоматизации проектирования миссий к малым телам СС; баллистический анализ модельных миссий. Далее автор описывает **Методы проведения исследования**; формулирует **объект** и **предмет** исследования.

Научная новизна работы состоит в следующих результатах: разработка математической модели объектоцентрического движения КА с ЭРДУ с учетом гравитационных возмущений от Солнца и астероида, как совокупности притягивающиеся точек; разработка модели притяжения малого тела как множества точек для случая двух точек; разработка модели оптимального номинального управления на гелиоцентрическом участке с учетом притяжения Солнцем и условий трансверсальности; разработка

модели оптимального управления на объектоцентрическом участке движения КА с ЭРДУ для некоторых маневров и поддержания орбиты.

Достоверность результатов работы обеспечивается, прежде всего, с моей точки зрения, выбором моделей управления и небесно-механических моделей, адекватностью примененных и разработанных моделей и методик современным теориям и данным. Используемое в процессе исследований программное обеспечение протестировано на объектах с заведомо известными особенностями и характером движения. Кроме того, правильность полученных результатов подтверждается сравнением некоторых из них с результатами других авторов.

Практическая значимость результатов заключается в том, что ряд построенных в работе алгоритмов, а также построенное на их основе программное обеспечение могут быть использованы в космонавтике для космических исследований малых тел Солнечной системы.

Далее описаны **Апробация работы** и **публикации**.

Описаны **Положения, выносимые на защиту**. Отмечено, что результаты, выносимые на защиту, получены автором **лично**. Описано **соответствие работы паспорту специальности**. Описаны структура и объем диссертации.

В **I главе** диссертации «Особенности управления космическими аппаратами, предназначенными для полета к малым телам СС» Е.А. Сергаева описывает сначала разработанные **проекты исследования малых тел СС**. Рассматривается актуальность малых КА (МКА). Анализируется **использование ЭРДУ для исследовательских миссий**, их плюсы и минусы. Анализируются указанные миссии: «Розетта», «Deep Space 1», «SMART-1», «Hayabusa», «Dawn», анализируются «**Астероиды и кометы как цели научных миссий**», рассматривается «**Проблема баллистического проектирования миссий к малым телам СС**», обсуждаются методические вопросы, связанные с полетом к малым телам СС.

Во **II главе** рассматриваются математические модели гелиоцентрического и объектоцентрического движения КА с ЭРДУ. Описывается разработанный автором алгоритм определения параметров математической модели гравитационного поля объекта исследования неправильной формы в случае использования двух притягивающих точек.

В **III главе** рассматривается методика формирования законов управления КА на гелиоцентрическом и объектоцентрическом участках движения. Приводится вычислительная процедура формирования оптимального

номинального управления на гелиоцентрическом участке движения с использованием принципа максимума Понтрягина и условий трансверсальности для определения начального приближения для оптимальной даты старта. Описывается методика формирования номинального управления на объектоцентрическом участке движения для планирующихся в данной миссии манёвров, в том числе для межорбитальных переходов, и поддержания заданной орбиты. Приведены два алгоритма формирования управления, направленного на поддержание рабочей орбиты относительно небесного тела неправильной формы, выполнено их сравнение, определены области применимости.

В **IV главе** описывается применение разработанной методики баллистического проектирования для двух миссий КА с ЭРДУ: к комете Чурюмова-Герасименко и к астероиду Эрос. Для миссии к комете Чурюмова-Герасименко выполнено сравнение полученных баллистических данных с характеристиками успешной миссии европейского космического агентства «Розетта». Для пятилетней миссии по исследованию потенциально-опасного астероида Эрос с околокруговой объектоцентрической орбиты радиусом 90 км проведено сравнение двух вариантов баллистического расчёта: с использованием традиционной модели (когда астероид рассматривается, как шарообразное тело) и уточнённой модели гравитационного поля (когда астероид рассматривается как суперпозиция двух массивных точек). Сделан вывод о необходимости использовать уточнённую модель гравитационного поля небесного тела, это позволяет получить более обоснованные характеристики Проекта.

Оценивая содержание диссертации, следует отметить, диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной проблемы и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается непротиворечивой методологической платформой и взаимосвязанностью выводов. Структура диссертации соответствует заявленной теме, цели и задачам исследования. Каждая из глав диссертации органически связана с другими главами и темой диссертации. Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые автором для публичной защиты, что свидетельствует о личном вкладе автора в науку.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведённых в диссертации

Разработанные методы, алгоритмы и программные комплексы могут найти применение при проектировании перспективных миссий к малым телам Солнечной системы, имеющим неправильную форму для формирования оптимальных баллистических схем перелёта КА с ЭРДУ.

Соответствие диссертации и автореферата паспорту специальности

Область исследования диссертации соответствует паспорту специальности 2.5.16 Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов по пунктам: 1 «Разработка и совершенствование математических моделей, используемых для описания движения и управления летательным аппаратом на различных режимах полёта»; 5 в части «Создание методов анализа и проектирования траекторий одиночных летательных аппаратов…»; 7 в части «Оптимальное планирование проведения динамических операций для решения целевых задач ЛА…»

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации, верно отражает основные положения и выводы диссертационной работы.

Замечания по диссертации

1. В работе нет обоснования глобальной оптимальности получаемых с помощью принципа максимума решений задачи. Возможны, в принципе, случаи, когда есть несколько локальных экстремумов.

2. Нет сравнения с решением задачи с помощью прямых методов оптимизации.

3. В Диссертации не учтено влияние возмущающего ускорения от светового давления, которое может оказывать решающее влияние на движение КА.

4. В работе отсутствует сравнительный анализ существующих методик определения гравитационного поля астероида. Нет объяснений, почему нельзя было использовать уже существующие модели и методики.

Перечисленные замечания не влияют на общую положительную оценку проделанной диссертационной работы и не вызывают сомнений в высокой квалификации диссертанта.

Заключение

Диссертация Сергаевой Елизаветы Андреевны «Программы управления космическим аппаратом с электроракетной двигательной установкой для

исследования малых тел Солнечной системы» является завершенной научно-квалификационной работой, содержит результаты, обладающие научной новизной и имеющие теоретическую и практическую значимость. Она удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, соответствует паспорту специальности 2.5.16 Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов, а ее автор, Сергаева Елизавета Андреевна, безусловно заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по данной специальности.

Официальный оппонент
Главный научный сотрудник
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,

д.ф.-м.н., профессор В.В. Ивашкин
v.v.ivashkin@mail.ru

13/III-2024

Подпись доктора физ.-мат. наук,
профессора Ивашкина В.В. заверяю
ученый секретарь ИПМ им. М.В. Келдыша А.А. Давыдов

Федеральное государственное учреждение "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук"
Адрес организации: 125047, г Москва, Миусская пл., д.4.
Сайт организации: https://keldysh.ru/
e-mail: office@keldysh.ru