ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Чжоу Сяо
"Оптимальное управление космическим аппаратом с малой тягой в задаче некомпланарного сближения с пассивным объектом", представленную на соискание
учёной степени кандидата технических наук по специальности
2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

Диссертационная работа Чжоу Сяо относится к классу задач оптимального управления тягой космического аппарата (КА) для аккуратного сближения с пассивной целью на околокруговых орбитах при наличии малого угла некомпланарности. Выбор законов управления ориентацией вектора тяги предполагает поиск решений, оптимальных по критерию быстродействия или по критерию продолжительности работы двигательной установки КА. Ускорение, создаваемое двигательной установкой КА, принимается постоянным по модулю и является малым по сравнению с ускорением силы притяжения. Величина управляющего ускорения выбрана на основе анализа имеющихся реальных разработок электроракетных двигателей малой тяги.

Используемая математическая модель основана на описании относительного движения маневрирующего КА в цилиндрической системе координат, связанной с целью. Показаны особенности перехода к линеаризованной модели движения в форме уравнений Хилла-Клохесси-Уилтшира, оговорены ограничения по погрешностям, возникающим при использовании такой модели. Далее рассмотрены безразмерные уравнения движения в отклонениях от базовой круговой орбиты, при этом они модифицированы так, чтобы выделить периодические и вековые составляющие в продольном движении и отдельно – составляющую бокового движения.

Используя модифицированные безразмерные уравнения в отклонениях от круговой орбиты, автор многократно применяет принцип максимума Л.С. Понтрягина для поиска строго оптимальных решений в центральном гравитационном поле, что позволяет получать законы управления ориентацией вектора тяги как в пространственном случае, так и при ограничении управления в плоскости местного горизонта. В последней главе предложен алгоритм управления, учитывающий разбиение подлётной траектории на различные функциональные участки, которым соответствуют коррекции выбранных параметров движения.

Интересной особенностью работы является применение метода гомотопии с тем, чтобы перейти от решения задачи быстродействия к задаче минимального времени работы двигательной установки КА. Для этого вводится специальный параметр, варьирование которого от 0 до 1 позволяет постепенно изменить оптимизируемый функционал и обеспечить, сохраняя сходимость алгоритма, итерационное

Входящий № 206-787
Дата 28 ОКТ 2024
Самарский университет

уточнение начальных значений сопряжённых переменных, поиск которых при использовании принципа максимума, как правило, является проблематичным.

Актуальность работы.

По мере совершенствования систем управления ориентацией вектора тяги применение электроракетных двигателей и связанная с этим необходимость оптимизации активных участков траектории КА становятся всё более востребованными. В настоящее время в России и в других странах созданы и испытаны линейки двигательных установок малой тяги, которые позволяют осуществлять межорбитальные перелёты в околоземном пространстве при малом расходе рабочего тела. Одновременно такие манёвры позволяют привести КА к нужному вектору состояния с лучшей точностью по сравнению с классическими химическими двигателями. Большая протяжённость активных участков траектории и особенности программной реализации принципа максимума формируют высокие требования к квалификации специалиста, отвечающего за планирование траектории КА.

Двигатели с малой тягой последние 20 лет используются для оснащения малых КА и микроспутников, что позволяет им не только поддерживать свою орбиту, но и решать целевые задачи в составе спутниковых систем и спутниковых групп. Известны экспериментальные полёты с малой тягой к Луне; в мировой научной литературе широко представлены исследования, рассматривающие оптимальные перелёты таких КА в окрестность точек либрации. Управление относительным движением двух объектов имеет большое значение в задачах стыковки с орбитальной станцией, а также при проведении инспекции состояния объекта или для последующего выполнения с ним сервисных операций.

В научной литературе, как правило, рассматриваются компланарные задачи и/или перелёты между круговыми орбитами, что существенно уменьшает применимость получаемых результатов. В данной работе предпринята попытка учесть слабую эллиптичность и малые углы некомпланарности реальных околокруговых орбит, а приведение активного КА в окрестность цели выполняется с учётом прицельного вектора, параметры которого также являются предметом анализа.

Данная работа является существенным развитием кандидатской диссертации Г.А. Филиппова, предлагаемые решения позволяют применять численно-аналитические методы к более широкому классу околоземных орбит, в связи с чем работа является актуальной и вносит вклад в общую теорию маневрирования КА с малой тягой на основе принципа максимума. Методики определения законов управления тягой, разработанные в рамках работы, могут быть использованы в качестве начальных

приближений для более точных моделей движения, учитывающих возмущающие ускорения различной природы.

Новизна проведённых исследований и полученных результатов.

Автором выполнен анализ большого объёма как российской, так и зарубежной научной литературы, посвящённой особенностям адаптации принципа максимума к задачам маневрирования с малой тягой. Особенно важен анализ ограничений, накладываемых на линеаризованные модели движения, которые потом используются для получения законов оптимального управления. В диссертации, по утверждению автора, применяются несколько алгоритмов, обеспечивающих сходимость краевой задачи: классический метод Ньютона, метод коллокации и метод гомотопии. Последние два метода являются относительно новыми, хотя и используемыми на практике отдельными российскими и зарубежными исследователями. Идея последнего метода заключается в том, что решение задачи оптимизации по быстродействию используется в качестве начального приближения для последующего пошагового уточнения решения задачи по минимизации продолжительности работы двигательной установки.

Автором определены структуры оптимального управления для разной постановки задачи маневрирования и оценены предельные минимальные затраты времени работы двигателя КА. Стоит отметить, что формализм, предлагаемый принципом максимума, является нетривиальным. Несмотря на 50 лет, прошедшие с момента разработки этого метода, его применение и сегодня вызывает трудности, связанные с поиском начального приближения для сопряжённых переменных, а также с учётом реальных ограничений на параметры траекторий ракет и КА.

Автором показано, что в задаче сближения двух КА с малой тягой оптимальное управление имеет сложную структуру при разных типовых граничных условиях и обычно состоит из двух характерных областей. В работе рассмотрены оптимальные управления на линеаризованной модели относительного движения при свободной ориентации вектора тяги для трёх типовых граничных условий: а) доминирование требования коррекции периодического движения; б) доминирование требования коррекции бокового движения; в) доминирование требования коррекции векового движения. Полученные функции управления углом между трансверсальным ортом и вектором проекции тяги на базовую плоскость круговой орбиты содержат разрывы второго рода, при этом производные двух управляющих углов в окрестности точек разрыва принимают большие значения. Для того, чтобы исключить такое нереализуемое на практике управление, автор вводит пассивные участки траектории, позволяющие сгладить управляющие функции, незначительно увеличивая продолжительность перелёта.

В целом, данная работа характеризуется новизной в части адаптации принципа максимума к модифицированным безразмерным уравнениям относительного движения, что позволяет проводить анализ траекторий мягкого сближения с целью, учитывая заранее задаваемые ограничения. Некомпланарная постановка задачи лучше других аналогов соответствует случаям, встречающимся на практике.

Степень обоснованности и достоверности полученных положений, выводов и заключения.

Диссертационная работа написана с использованием строгого математического аппарата, характеризуется полнотой приводимых математических преобразований и адекватностью как самой модели движения, так и входных данных. Для приведения модели к формализму принципа максимума используются известные линеаризованные уравнения Хилла-Клохесси-Уилтшира и уравнения движения в отклонениях от круговой орбиты. Обозначения, применяемые автором в математических моделях, полностью соответствуют общепринятым в научных специальностях 2.5.16 и 1.1.7.

Сравнивая результаты, полученные после добавления пассивных участков перелётной траектории, с результатами оптимизации задачи сближения по критерию быстродействия, автор справедливо отмечает наблюдаемое уменьшение продолжительности работы двигателя КА для большого разнообразия граничных условий. Фактически речь идёт об использовании естественного фазирования, эффективность которого всё более возрастает по мере доминирования требования коррекции векового движения. Кроме того, вид функции переключения и временные интервалы, на которых появляются пассивные участки, зависят от угла отклонения β вектора тяги от плоскости базовой круговой орбиты. Пассивный участок появляется тогда, когда этот угол достаточно велик, что, скорее всего, соответствует наибольшему удалению КА от линии пересечения плоскостей орбит.

Весьма показательным является анализ неоптимальности программ управления при ориентации вектора тяги в плоскости местного горизонта по сравнению со свободной ориентации вектора тяги. Для коррекции вековых расхождений степень неоптимальности в рассмотренном примере составляет не более 0.06%, а для коррекции бокового движения – не более 0.12%. Фактически это хорошо согласуется с теорией импульсного маневрирования на околокруговых орбитах, которая утверждает, что использование радиальных импульсов скорости не является эффективным ни для коррекции большой полуоси, ни для коррекции вектора эксцентриситета.

В диссертации приведено достаточное количество таблиц и поясняющих рисунков, на которых отображены результаты расчёта с применением численно-аналитических алгоритмов, реализующих управление с использованием принципа максимума. Эти данные отображают динамику приведения КА в нужную точку без разрывов и специфических особенностей. Алгоритмы тестируются не менее,

чем на 6 наборах начальных условий, отличающихся по смысловой нагрузке корректируемых отклонений. Каждая из глав диссертации содержит выводы, корректно отражающие суть проведённых исследований. Используемые методы математического анализа и численные методы решения дифференциальных уравнений являются хорошо отработанными и не должны приводить в неадекватным результатам моделирования.

Значимость результатов для науки и практики. Практическая значимость

Данная диссертация является научно-квалификационной работой, в которой отражена специфика применения принципа максимума для поиска оптимальной траектории приведения КА с малой тягой в заданную окрестность пассивного объекта. В работе рассмотрены орбиты, имеющие незначительные отклонения по долготе восходящего узла и наклонению, что соответствует реальным случаям выведения КА на низкую опорную орбиту или непосредственно в окрестность цели. Методика получения оптимальной траектории с малой тягой, разработанная автором, позволяет проводить вычисления в центральном гравитационном поле. Получаемые решения могут быть использованы в качестве начального приближения при моделировании движения в более сложных математических моделях, учитывающих гравитационные возмущения и сопротивление от остаточной атмосферы.

Автор справедливо отмечает, что большинство исследователей относительного движения КА применяют математические модели, построенные с использованием уравнений Хилла-Клохесси-Уилтшира, а не уравнений относительного движения в цилиндрической системе координат, характеризующихся более высокой точностью. Рядом отечественных и зарубежных учёных показано, что первый тип уравнений хорошо работает только на участке конечного сближения с целью.

В работе выполнен детальный анализ влияния начальных отклонений в продольном (периодические и вековые) и боковом направлениях на продолжительность работы двигательной установки КА. Показано, что при коррекции периодических составляющих движения влияние относительной фазы КА на продолжительность сближения с объектом мало по сравнению с другими составляющими. Проанализированы условия появления пассивных участков траектории и их связь со значениями управляющих параметров (углов, задающих ориентацию вектора тяги).

Автором продемонстрирована эффективность метода гомотопии для решения краевой задачи при смене критерия оптимальности (от задачи быстродействия к задаче минимизации расхода топлива). Вместе с тем, нельзя не отметить явный недостаток комментариев о том, как изменение параметра гомотопии влияет на структуру управляющей функции и на параметры траектории активного КА

В диссертации рассмотрена методика формирования номинального управления КА с двигателем малой тяги в задаче сближения с пассивным объектом, находящимся на низкой околоземной орбите, с учётом фазирования на этапах дальнего и ближнего наведения. Показана необходимость введения упреждающих точек и предварительных коррекций, обеспечивающих необходимую плавную стыковку участка точного наведения и участка причаливания. Предложенная методика предполагает коррекцию большой полуоси, фазовой разницы и бокового отклонения в три этапа. Она имеет практическое значение для решения таких задач, как стыковка КА с космическими станциями, сближение с объектом космического мусора.

Достоинства и недостатки по содержанию и оформлению, мнение о работе в целом.

Диссертационная работа Чжоу Сяо является законченным научно-техническим исследованием. Она представляет интерес для специалистов, занимающихся оптимизацией программ управления КА с двигателем малой тяги. Замечания к тексту диссертации можно разбить на три типа: замечания по содержанию, замечания по оформлению и замечания общего характера.

Замечания по содержанию.

1. На стр. 17 присутствует утверждение, смысл которого следующий: «Если взять в качестве примера околоземную орбиту, то возмущения от несферичности геопотенциала, от третьих притягивающих тел, атмосферного сопротивления и давления солнечного света будут оказывать значительное влияние на движение КА». Такое обобщение некорректно, поскольку для различных типов орбит (низкие средние, высокие, высокоэллиптические и др.) вклад перечисленных возмущений сильно отличается: например, для низких орбит не имеет смысла учитывать гравитационные возмущения от Луны и Солнца, а для высоких орбит – сопротивление верхних слоёв атмосферы.

2. В работе указано, что автор использовал метод градиентного спуска, метод коллокации и метод гомотопии. Из текста работы не совсем ясно, где и каким образом был применён метод коллокации.

3. Формула (2.12) не объяснена и неочевидна, хотя активно используется в дальнейших рассуждениях. Фактически приведённая запись позволяет найти изменение скорости при некотором времени работы двигательной установки.

4. На стр. 60 говорится о том, что «можно отдельно рассматривать продольное движение от бокового. Поэтому представляется разумным разделить управления на этапы. На первом этапе происходит коррекция продольного движения, а на втором — коррекция бокового». Здесь необходим отдельный комментарий о том, что это утверждение справедливо только в центральном

гравитационном поле. Учёт полярного сжатия Земли приведёт к тому, что такое независимое управление не позволит решить краевую задачу, если продолжительность перелёта превышает даже один виток.

5. Среди выводов к главе 3 присутствует спорное утверждение о том, что при ориентации вектора тяги в плоскости местного горизонта по сравнению со свободной ориентацией вектора тяги для случая доминирования требований коррекции бокового движения степень неоптимальности управления по критерию быстродействия достаточно высока. В Таблице 6 расхождение составляет всего 0.12%, при этом расхождение для случая доминирования требований коррекции векового движения составляет 0.06% и принято приемлемым. Такой странный подход к критерию «приемлемости» противоречит данным, представленным на рис. 21.

6. На стр. 44 указано, что «критерий быстродействия 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». Это утверждение вызывает сомнения, поскольку, как правило, минимизация расхода топлива и минимизация времени перелёта являются критериями, противоположными друг к другу.

7. В работе никак не проанализирована устойчивость и сходимость численно-аналитических алгоритмов в реальных условиях полёта на околоземных орбитах с учётом значимых возмущающих ускорений различной природы. Данное замечание является основным.

Замечания по оформлению.

1. В работе присутствует некоторая терминологическая путаница: «расстояние от центра Земли до проекции КА на плоскость орбиты (имеется в виду на плоскость базовой круговой орбиты)», «угол, отсчитываемый в плоскости орбиты от некоторой начальной оси по направлению полета КА (на самом деле от восходящего узла к радиус-вектору КА)», «расстояние от плоскости орбиты до КА (имеется в виду на плоскость базовой круговой орбиты)», «вектор относительной дальности между активным и пассивным КА (на деле – наоборот между пассивной целью и активным КА), «КА, который вращается в инерциальном пространстве (имеется в виду движется по окружности), «угол истинной аномалии (вместо истинной аномалии)», «средняя угловая скорость орбиты (угловая скорость радиус-вектора)», «центр эллипса движется с постоянной положительной скоростью (с положительной проекцией вектора скорости на некоторое направление)» и т.д.

2. На стр. 23 присутствует грубая ошибка записи – должна быть производная вектора, а не вектор производной; присутствует запись типа «модуль модуля», отсутствует вектор у управления и т.д. В формуле (1.3) должен быть вектор дальности, в формуле (1.5) пропущены векторы, неверно записано ускорение Кориолиса (!). Конечно, это опечатки, потому что итоговые уравнения (1.6) записаны верно.

3. В третьей главе угол α не соответствует углу α, введённому во второй главе.

4. Вместо задачи, подвергнутой дискретизации, используется крайне неудачный с точки зрения русского языка термин «дискредитация».

5. Написание фамилий зарубежных коллег выполнено вперемешку как в оригинале, так и в переводе на русский язык, причём перевод на русский язык не всегда правильный (например, на стр. 18 вместо Р. Эпеной должно быть Р. Эпенуа).

6. В формуле 1.10 введены, но не раскрыты параметры относительного движения.

7. На стр. 41 и 46-47, стр. 61, 64 одними и теми же буквами (*A*, *B*, *C*) в рамках одной главы обозначены разные величины.

8. В пункте 2.5.1 рассматриваются три вида граничных условий (№1, №2, №3), в пункте 2.5.3 снова три, но других вида граничных условий, которые тоже обозначены как №1, №2, №3.

9. На стр. 63 говорится о принципе максимума Гамильтониана (видимо – Понтрягина).

10. На стр. 91 и 92 на рисунках скорее всего указаны метры, а не километры.

11. Не все рисунки переведены на русский язык.

Замечания общего характера.

Нет сомнений, что работа написана аспирантом самостоятельно. В тексте присутствуют не совсем удачные лексические обороты, типичные для человека, для которого русский язык не является родным. Некоторое непонимание вызывает явное отсутствие внимательного редактирования рукописи перед её подачей в диссертационный совет. Вместе с тем, в работе содержится лишь небольшое количество именно терминологических ошибок (например, на стр. 26 говорится о матрице перехода состояния, матрице переноса состояния), а правильность выполненных расчётов не вызывает сомнений, поскольку отдельные полученные результаты характеризуются хорошим соответствием с импульсной теорией маневрирования на околокруговых орбитах.

На странице 14 утверждается, что США «последовательно завершили сборку на орбите телескопа "Хаббл", сборку на орбите и техническое обслуживание Международной космической станции». Это странное утверждение: телескоп «Хаббл» ремонтировался пять раз, но не собирался на орбите, а строительство и обслуживание МКС выполнялось и продолжает выполняться в рамках международной кооперации.

На стр. 60 присутствует утверждение, смысл которого понять сложно: «Из законов Кеплера знаем, что текущая разница трансверсальных скоростей в этот момент составляет половину теоретического значения при невозмущенном движении».

Указанные недостатки **не влияют** на общую положительную оценку работы.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, опубликованы в 3 статьях, две из которых – в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК, одна – в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus.

Автореферат соответствует диссертации.

Считаю, что работа "*Оптимальное управление космическим аппаратом с малой тягой в задаче некомпланарного сближения с пассивным объектом*" удовлетворяет требованиям Положения ВАК (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов, а её автор – Чжоу Сяо – заслуживает присуждения ему искомой степени.

Отзыв составил официальный оппонент
Гришко Дмитрий Александрович
кандидат физико-математических наук по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика»,
доцент кафедры ФН3 «Теоретическая механика» им. профессора Н.Е. Жуковского, доцент,
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования **«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»**
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, https://bmstu.ru/
тел. (499)263-63-75 , E-mail: dim.gr@bmstu.ru

09 октября 2024 г. Д.А. Гришко

Подпись официального оппонента Д.А. Гришко удостоверяю

ВЕРНО.
СПЕЦИАЛИСТ ПО ПЕРСОНАЛУ
ОТДЕЛА КАДРОВОГО
АДМИНИСТРИРОВАНИЯ
ЦЕПОК М. Ю.