

ОТЗЫВ

официального оппонента

д.ф.-м.н. Баранова Андрея Анатольевича

на диссертацию Хоанга Ву Тана

«Разработка алгоритмов управления движением космического аппарата системы обслуживания геостационарных спутников связи»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

В настоящее время вопросами обслуживания спутников земли автоматическими космическими аппаратами занимаются практически все крупнейшие аэрокосмические фирмы. С помощью автоматических обслуживающих космических аппаратов можно выполнять инспекцию, перемещение, дозаправку, ремонт или дооснащение спутников связи на геостационарной орбите в автоматическом (беспилотном) режиме и, тем самым, продлевать срок их активного существования. Реализация идеи обслуживания на орбите требует создания высокоточных и устойчивых алгоритмов автономной навигации и управления движением обслуживающих космических аппаратов – сервисных модулей (СМ). В России проблемам обслуживания на орбите посвящены работы ряда авторов, в которых в основном рассматриваются задачи баллистического построения обслуживающих орбитальных группировок, задачи маршрутизации перелетов между обслуживаемыми объектами, или проблемы техники и технологии дозаправки и ремонта. Однако вопросам автономного управления динамическими операциями СМ, оснащенных двигателями малой тяги, на геостационарной орбите уделялось относительно мало внимания.

Диссертационная работа Хоанг Ву Тана посвящена разработке алгоритмов управления движением сервисного модуля системы обслуживания геостационарных спутников связи, что и определяет ее **актуальность**.

Отдел документационного
обеспечения МАИ

« 30 03 20 21

Для достижения поставленной цели в работе разработаны математические модели управляемого движения СМ и целевого модуля (ЦМ) на различных этапах обслуживания, решена задача синтеза субоптимального управления квазилинейной стохастической системой, создано программное обеспечение имитационного моделирования управляемого движения СМ и ЦМ, с помощью которого проведена отработка и исследование разработанных алгоритмов.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации могут быть следующими: полученные результаты применимы как к современным космическим аппаратам, так и к перспективным сервисным модулям обслуживающих систем, а именно:

- алгоритмы и программно-моделирующий комплекс можно использовать при проектировании автономных систем управления динамическими операциями обслуживающих аппаратов на ГСО и других околокруговых орбитах;

- алгоритмы и программно-математический комплекс могут быть использованы при отработке автономных систем управления динамическими операциями спутников, функционирующих на околокруговых орбитах, в том числе ГСО;

- программно-математический комплекс имеет открытую архитектуру и может использоваться для обучения студентов ВУЗов по соответствующим специальностям.

Научная новизна работы заключается в том, что

- разработан новый алгоритм генерации начального приближения для устойчивого решения задачи синтеза субоптимального управления движением центра масс СМ методом последовательных приближений в сочетании с комбинированным методом оптимизации на этапе приведения СМ в окрестность рабочей позиции ЦМ в стохастической постановке по интегральному критерию с учетом детерминированных возмущений от гравитационного поля Земли, гравитации Луны и Солнца и случайных ошибок

управления и навигации;

– разработан новый алгоритм удержания СМ относительно ЦМ на допустимом расстоянии в процессе инспекции в стохастической постановке;

– создан программно-математический комплекс для отработки разработанных алгоритмов управления движением космических аппаратов в рамках задач обслуживания.

Диссертационная работа построена в соответствии с действующими стандартами и состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во **введении** обоснована актуальность работы, формулированы цель работы, задачи и методы исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** дан обзор проектов систем беспилотного обслуживания КА на орбите и сформулирована постановка технической задачи исследования. Конфигурация системы обслуживания геостационарных спутников представлена как гипотетическая группировка нескольких станций, в состав каждой станции входят отделяемые сервисные модули, которые могут самостоятельно выполнять функции обслуживания, совершая перемещения от станции к целевому модулю и обратно. Автор предполагает, что для обеспечения динамических операций СМ будет использоваться автономная бортовая навигационная система. Это предположение позволило автору применить известный в практике инженерный подход - рассматривать задачу синтеза по неполным данным как состоящую из двух, решаемых независимо. Определены базовые задачи, которые с точки зрения разработки алгоритмов управления движением СМ необходимо решить для реализации операций обслуживания. Первая из них заключается в приведении вектора состояния СМ в заданную область пространства в окрестности ЦМ; вторая задача – удержание СМ относительно ЦМ в течение заданного времени.

Вторая глава содержит математические модели движения центра масс СМ и ЦМ. Автор использует несколько моделей возмущенного движения КА.

Полная модель управляемого движения центра масс СМ и ЦМ это система нелинейных дифференциальных уравнений в инерциальной системе J2000. Она учитывает нецентральность гравитационного поля Земли, гравитационное воздействие Луны и Солнца, давление солнечного света, ошибки реализации тяги и ориентации вектора тяги двигателя коррекции. Полная модель используется в контуре синтеза квази-оптимального управления и для проведения статистического анализа управляемого возмущенного движения с учетом ошибок управления и навигации.

Для решения задачи синтеза оптимального управления с использованием достаточных условий проведена линеаризация исходной модели в окрестности номинальной круговой орбиты. В качестве номинальной принята орбита, целевого модуля.

Третья глава содержит результаты разработки алгоритмов управления движением центра масс СМ на этапе его приведения в окрестность рабочей позиции ЦМ на ГСО и удержания относительно ЦМ в процессе инспекции. Алгоритм синтеза оптимального управления разработан на основе достаточных условий синтеза управления дискретной квазилинейной стохастической системой по квадратичному интегро-терминальному критерию. Особенностью модели управляемого движения является ее линейность по вектору состояния и квазилинейность по вектору управления. Квазилинейность заключается в том что матрицы коэффициентов линеаризованной модели зависят от длительностей активных участков коррекций, которые, в свою очередь определяются через линейно входящее в уравнения движение синтезируемое управление. Кроме того, в нелинейных формулах динамических коэффициентов содержится пассивное управление – длительности интервалов между коррекциями (т.н. пассивные участки). Все это делает невозможным решение задачи синтеза управления на основе классического метода динамического программирования. Автор применяет комбинированный метод оптимизации, разделяя обобщенный вектор управления на синтезируемую и программируемую составляющие. Синтезируемой составляющей является

последовательность, определяющая величины приращений характеристической скорости коррекции. На этапе приведения синтезируемая составляющая определена методом последовательных приближений, сходимость которого напрямую связана с удачностью начального приближения. Для обеспечения сходимости и стабильности алгоритма управления разработан эффективный алгоритм генерации начального приближения.

На этапе удержания синтезируемая составляющая определяется в предположении, что существует установившийся режим, в котором коэффициенты обратной связи в законе управления не зависят от времени. Моменты проведения коррекций и длительности пассивных участков удовлетворяют условию постепенной ликвидации разности эксцентриситетов орбит СМ и ЦМ.

В четвертой главе проведен анализ точности разработанных алгоритмов автономного управления движением СМ на этапах приведения в окрестность рабочей позиции ЦМ и удержания относительно ЦМ. Для этого разработан программный комплекс, реализующий все рассмотренные в работе алгоритмы.

Проведено моделирование для случая с идеальным управлением, и статистическое моделирование при известных статистических характеристиках ошибок. По результатам моделирования построены гистограммы, характеризующие статистические характеристики терминальной точности управления движением центра масс СМ на этапах его приведения в окрестность рабочей позиции ЦМ и удержания относительно ЦМ с использованием двигательной установки малой тяги.

В заключении приведены основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием математических методов и сравнением полученных результатов моделирования, проведенного в работе, с опубликованными результатами работ по данной тематике.

Личный вклад автора достаточен и подтверждается наличием у Хоанг Ву Тана статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК Минобрнауки России и в перечень изданий, индексируемых в международной базе данных Scopus. Результаты докладывались на 5 научных международных и всероссийских конференциях.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Недостатки диссертационной работы:

1. В работе не рассмотрен вопрос управления движением СМ при стыковке с ЦМ; автор ограничился управлением движением СМ вокруг ЦМ, при этом рассматривается движение в плоскости орбиты по эллипсу, хотя целесообразно было рассмотреть более информативное относительное движение по окружности, выходящей из плоскости орбиты.

2. В работе предполагается независимое управление в плоскости орбиты и отдельно изменение ориентации плоскости орбиты. Это не оптимальная схема управления. У перспективных космических аппаратов будет возможность оптимальной одновременной коррекции всех элементов орбиты. В данной работе коррекция ориентации плоскости орбиты не рассматривается.

3. В постановке задачи предполагается, что время перелета не фиксировано, в то время как в задаче обслуживания время перелета к обслуживаемому объекту, как правило, задано.

4. На первом этапе выбора начального приближения учитываются только необходимое изменение большой полуоси и положения вдоль орбиты, хотя можно было сразу учесть и необходимое изменение вектора эксцентриситета.

Перечисленные замечания не ставят под сомнение основные научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, не снижают научной и практической значимости полученных автором результатов и не влияют на общее положительное впечатление от диссертационной работы.

Диссертация Хоанг Ву Тана на тему «Разработка алгоритмов управления движением космического аппарата системы обслуживания геостационарных

спутников связи», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, является законченной научно – квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные решения, а так же проведен анализ работоспособности разработанных алгоритмов автономного управления движением СМ на рассматриваемых этапах обслуживания.

Представленная работа отвечает всем требованиям п.п. 9 – 14 Положения ВАК Российской Федерации о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Хоанг Ву Тан заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Официальный оппонент
д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник
Федерального государственного учреждения
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной математики им. М.В.
Келдыша Российской академии наук»
125047, Москва, Миусская пл., д.4

Баранов Андрей Анатольевич

26 марта 2021 г.

Тел.: +7 499 978-13-14

email: andrey_baranov@list.ru

Подпись официального оппонента Баранова Андрея Анатольевича удостоверяю

Ученый секретарь

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, к.ф. - м.н.



А.И. Маслов