

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор – проректор
по научной работе Российского
университета дружбы народов,

д.ф.н., профессор,

Н.С. Кирабаев



ОТЗЫВ

ведущей организации – Российского университета дружбы народов на диссертационную работу Мина Тейна «Оптимизация траекторий космических аппаратов с использованием эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Актуальность темы диссертационного исследования

Диссертационная работа Мина Тейна, представленная на соискание ученой степени доктора технических наук, посвящена *актуальной проблеме* повышения эффективности транспортных космических средств при реализации межорбитальных перелетов в окрестности Земли и межпланетных перелетов.

Можно выделить два направления повышения эффективности при решении транспортных задач в космосе. Первое направление связано с совершенствованием собственно технических средств, разработкой новых более эффективных систем, агрегатов и элементов транспортной системы, оптимизацией параметров транспортной системы. Второе направление

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ
Вх. № 5
06 2018 1

связано с нахождением новых схем перелета с оптимизацией характеристик этих схем.

Одним из ярких примеров первого направления повышение эффективности транспортных космических систем является использование перспективных электроракетных двигательных установок. Удельный импульс таких установок может быть на порядок больше удельного импульса традиционных химических двигательных установок, что может обеспечить существенное уменьшение требуемой для перелета массы топлива и увеличить массовую эффективность транспортной космической системы.

Использование гравитационных маневров при реализации космических перелетов (прежде всего, межпланетных перелетов) является ярким примером второго направления повышения эффективности решения транспортной проблемы в космосе.

Рецензируемая диссертационная работа посвящена разработке метода оптимизации схем перелета КА, имеющих в своем составе электроракетную двигательную установку. При этом в диссертационной работе анализируются и сложные схемы перелета, включающие цепочки гравитационных маневров. Таким образом, в диссертационной работе исследуются оба направления повышения эффективности транспортных операций в космосе. Диссертация направлена на решение *актуальной* проблемы.

Научная новизна

Научную новизну диссертационной работы определяют следующие результаты исследования, полученные лично соискателем.

В диссертационной работе разработана эффективная методика проектно-баллистического анализа межорбитальных и межпланетных перелетов. Основное внимание уделяется проблеме оптимизации межорбитальных и межпланетных перелётов космического аппарата с электроракетной двигательной установкой.

Сложность анализа и оптимизации многовитковых межорбитальных перелетов связана с тем, что, как правило, на витках траектории происходит многочисленное чередование активных и пассивных участков. При использовании методов оптимизации, требующих вычисления частных производных от вектора невязок по неизвестным параметрам краевой задачи (в частности, градиентных методов), возникают существенные трудности. Данные трудности обусловлены тем, что при появлении или исчезновении активных или пассивных участков в процессе поиска решения появляются скачки в элементах матрицы частных производных невязок краевых условий по параметрам краевой задачи. Это является одной из основных причин плохой сходимости используемых итерационных процедур при решении краевой задачи. В некоторых случаях подобную проблему можно решать, используя, например, сглаживание релейной функции тяги. Однако, введение подобного сглаживания приводит к ухудшению точности получаемого решения, усложнению процесса поиска решения краевой задачи.

Автор диссертационного исследования для решения краевых задач механики полёта предлагает использовать алгоритм, основанный на эволюционной стратегии с адаптацией матрицы ковариаций (CMA-ES). Данный алгоритм относится к классу эвристических алгоритмов и представляет собой итерационный процесс, на каждом шаге которого формируется новая популяция неизвестных параметров краевой задачи. Популяция состоит из «особей». Каждая «особь» есть вектор, компоненты которого являются некоторым приближением неизвестных параметров краевой задачи. Генерация признаков каждой отдельной особи в популяции происходит согласно закону нормального распределения, параметры которого задаются. От других алгоритмов, относящихся к эволюционным стратегиям, CMA-ES отличается использованием ковариационной матрицы, которая определяет параметры закона нормального распределения на каждом следующем шаге итерации.

Важно отметить, что использование ковариационной матрицы в значительной степени исключает случайность выбора параметров управления процессом поиска решения. Таким образом, алгоритм CMA-ES является во многом детерминированным, что является его основным отличием по сравнению с другими реализациями эволюционной стратегии. Это отличие может быть рассмотрено как преимущество алгоритма.

Как видно из приведённого выше описания алгоритма CMA-ES, он не требует вычисления частных производных краевых условий или минимизируемой критериальной функции. В качестве информации для построения итерационной процедуры используются только вычисленные значения некоторой функции, зависящей от невязок краевых условий и величины критерия оптимизации. Таким образом, отсутствует проблема, связанная с возможным возникновением скачков в элементах вышеотмеченной матрицы частных производных, что может привести к плохой сходимости итерационного процесса.

Другим важным достоинством алгоритма, предлагаемого автором, является то, что его можно отнести к глобальным методам оптимизации. Данное обстоятельство позволяет надеяться на получение глобального экстремума в многоэкстремальных задачах, например, в задачах многовитковых межорбитальных перелётов.

Ещё одним важным преимуществом CMA-ES является его низкая чувствительность к выбору начального приближения для неизвестных параметров краевой задачи. Особенно актуально данное преимущество в связи с использованием автором для решения оптимизационной задачи принципа максимума Понтрягина, применение которого приводит к повышенной трудности выбора начального приближения. В данной работе автор наглядно показывает (глава 1 диссертации) на анализе и оптимизации прямого перелёта Земля – Марс КА с электроракетной двигательной установкой, что предлагаемый им подход обладает хорошей вычислительной устойчивостью и

хорошей сходимостью при практически произвольном выборе начального приближения.

Большое внимание автор работы уделил рассмотрению межпланетных перелётов с гравитационными манёврами. В частности, была разработана методика оптимизации подобных схем перелётов. Основная идея, заложенная в предлагаемую методику, заключается в разбиении процесса поиска решения на три этапа. На первом этапе проводится поиск оптимальной траектории для рассматриваемой схемы полёта при использовании импульсной аппроксимации активных участков. При этом схема перелёта допускает реализацию импульсов на гелиоцентрических участках траектории (в глубоком космосе). Следует отметить, что подобная задача имеет множество локальных минимумов, что вызывает большие трудности при определении глобального экстремума. На примере перелёта Земля – Юпитер с гравитационным манёвром у Земли автор показывает эффективность применения для решения подобных задач алгоритма CMA-ES в сравнении с другими стохастическими, локальными или гибридными методами оптимизации. По результатам, полученным после проведения первого этапа расчёта, определяются оптимальные дата старта и даты гравитационных манёвров.

На втором этапе расчёта анализируется траектория КА с двигателями малой тяги. На этом этапе исследования автор предлагает разбить всю траекторию на отдельные участки, разделённые точками гравитационных манёвров, и проводить оптимизацию каждого такого участка отдельно. При этом в точках гравитационных манёвров предлагается отказаться от некоторых условий оптимальности.

На последнем, третьем этапе расчёта проводится уже сквозная оптимизация всей траектории с использованием полного набора условий оптимальности.

Таким образом, *научная новизна* диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработан устойчивый и регулярный (с вычислительной точки зрения) метод оптимизации траекторий КА с ЭРДУ, основанный на совместном использовании условий оптимальности непрямого метода и эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы. При использовании формализма принципа максимума распространенные методы решения краевой задачи предполагают дифференцируемость краевых условий и непрерывность производных краевых условий по выбираемым параметрам краевой задачи. Предлагаемый автором диссертационной работы подход не требует выполнения таких ограничивающих условий.
2. Разработан метод оптимизации многовитковых межорбитальных перелётов между некомпланарными орбитами. При этом анализировалась не только задача оптимального быстрогодействия, но и задача минимизации затрат топлива при фиксированном времени перелёта.
3. Разработан метод оптимизации межпланетных перелётов, в том числе с гравитационными манёврами. При анализе сложной схемы межпланетного перелёта (с цепочкой гравитационных маневров) автором предложен оригинальный метод. На первом этапе этот метод использует решение задачи безусловной минимизации для поиска траектории с активными гравитационными маневрами и импульсами скорости на гелиоцентрических участках траектории. Преимущество (достоинство) такого подхода, прежде всего, связано с тем, что требуется решать задачу безусловной минимизации, которая существенно проще задачи условной оптимизации.
4. Получен ряд численных результатов оптимизации межорбитальных и межпланетных перелётов. Среди этих результатов отметим следующие:

- в диссертационной работе представлен обширный анализ различных схем межпланетного перелёта от Земли к Юпитеру, включающих от одного до пяти гравитационных манёвров;
- получены новые результаты при оптимизации траектории выведения КА на систему гелиоцентрических орбит;
- проведён подробный анализ межорбитального перелёта на геостационарную орбиту (ГСО), результаты представлены в виде зависимостей характеристической скорости от начального ускорения и удельного импульса двигательной установки. Эти результаты можно использовать для оценки оптимальных характеристик новых типов разрабатываемых двигательных установок.

Степень обоснованности основных научных положений, выводов и практических рекомендаций

Главная идея диссертации, заключающаяся в разработке эффективного метода оптимизации траектории КА (главная заслуга диссертанта), обосновывается в первой главе диссертации. В ней на относительно простой задаче оптимизации прямого перелета к Марсу КА с электроракетной двигательной установкой проведено сравнение предлагаемого диссертантом метода с большим количеством существующих и используемых в настоящее время методов. Приведенный в этой главе численный анализ показал, что только предлагаемый автором диссертации метод смог получить оптимальную траекторию перелета для всех вариантов начальных условий, рассмотренных в работе. Так как варианты начальных условий были выбраны достаточно естественными, следует считать, что автор обосновал, доказал эффективность предлагаемого им подхода.

Эффективность применения предлагаемого алгоритма показана автором, в том числе, при проведении анализа межорбитального перелёта КА на геостационарную орбиту (ГСО). В качестве двигательной установки

рассматривалась установка с нагревом рабочего тела с использованием солнечных концентраторов. При этом автором был проанализирован большой диапазон начальных ускорений КА, удельного импульса, что даёт возможность разработчикам новых типов двигательных установок корректно выбирать их оптимальные характеристики для рассматриваемых схем полётов.

Эффективность предлагаемой методики в комбинации с применением алгоритма CMA-ES автор демонстрирует на достаточно сложных примерах. Так им были рассмотрены различные схемы перелёта от Земли к Юпитеру, включающими от одного до пяти гравитационных манёвров у различных планет. Например, автором был рассмотрен перелёт от Земли к Юпитеру с проведением длинной цепочки гравитационных манёвров (например, маршрут Земля-Венера-Марс-Венера-Земля). Поиск оптимального решения для такой сложной схемы перелёта представляет собой значительные трудности. Они, в частности, связаны с очень высоким порядком краевой задачи и, следовательно, с очень большим количеством неизвестных параметров краевой задачи. Предлагаемый автором подход, как показывают численные примеры, справляется с поиском решения для подобных сложных схем перелёта.

Значимость для науки и практики

Автор своей работой вносит свой вклад в развитие механики космического полета с малой тягой как одного из разделов механики космического полета. Механика полета с малой тягой имеет значительную специфику по отношению к механике полета КА с традиционными химическими двигательными установками. При проектировании траекторий КА с химическими двигательными установками идея импульсной аппроксимации оказывается весьма продуктивной, в общем случае сильно упрощающей исследование. Для КА с малой тягой такая идея практически не

работает, и траекторию приходится анализировать при конечном уровне тяги. Как правило, задача оказывается существенно более сложной.

Предлагая свой метод оптимизации траекторий КА с перспективными электроракетными двигателями, доказывая эффективность метода, автор вносит свой вклад в развитие теории, обеспечивающей повышение эффективности транспортных космических систем. Проанализированные автором диссертации космические проекты показывают, что многие из них могут быть реализованы с использованием существующих ракет-носителей среднего (не тяжелого) класса.

Замечания и вопросы

Наряду с общей высокой оценкой работы целесообразно высказать некоторые замечания и предложения.

1. Разработанный диссертантом подход к оптимизации траекторий космических аппаратов не следует переоценивать с точки зрения нахождения глобального экстремума при решении транспортных космических задач. Используемые в подходе эвристические приемы могут не привести к нахождению глобального экстремума. Исследование «всего поля» возможных вариантов схем перелета, возможных областей значений параметров схемы перелета требует использование популяций очень большой размерности. При этом могут возникнуть вычислительные трудности, связанные с быстродействием современной вычислительной техники. Использование же популяций относительно небольшой размерности может не привести к нахождению глобального экстремума.
2. В диссертационной работе приведены решения очень большого числа задач оптимизации межорбитальных и межпланетных перелетов. Все эти решения призваны показать эффективность предлагаемого в диссертации подхода к оптимизации транспортных операций в космосе. На наш взгляд, эффективность подхода достаточно наглядно обоснована

примерами, приведенными в первой главе. Именно в ней приводятся результаты сравнения предлагаемого подхода с другими подходами и методами. Что касается рассмотренных задач траекторной оптимизации, приведенных в других главах диссертации (кроме, может быть, анализа перелетов к Юпитеру), то при этом показана возможность использования предлагаемого подхода для проектно-баллистического анализа многих транспортных маневров, но не приводятся результаты сравнения эффективности (и в частности, трудоемкости) решений с традиционными подходами.

3. При анализе и оптимизации межпланетных траекторий с гравитационным маневром следует рассматривать возможную оптимальность гравитационного маневра, когда он выполняется не на минимальной высоте пролета планеты (как это делает автор). Это особенно характерно для траектории межпланетных перелетов с последовательностью гравитационных маневров.

Высказанные замечания носят рекомендательный характер. Они не снижают высокой оценки диссертационного исследования Мина Тейна.

Соответствие содержания диссертации специальности 05.07.09

Содержание диссертационной работы Мина Тейна полностью соответствует паспорту специальности 05.07.09 (динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов). В ней проводится анализ траекторий движения КА, «программирование управляемого движения и его оптимизации».

Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертационной работы Мина Тейна

О публикациях диссертанта по теме диссертации

По теме диссертации диссертантом опубликовано достаточно большое число публикаций. Практически все решения, полученные им и представленные в диссертации, опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК и в изданиях, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science. Публикации автора полностью отражают ключевые положения диссертационной работы.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы могут быть внедрены на предприятиях ракетно-космической промышленности: НПО им. С.А. Лавочкина, РКК «Энергия» им. С.П. Королёва, АО ИСС им. М.Ф. Решетнёва, ГКНПЦ им. М.В. Хруничева. Методический подход, предложенный диссертантом, может быть с успехом использован для поиска рациональных решений при анализе и оптимизации управляемой динамической системы, описываемой системой обыкновенных дифференциальных уравнений.

Заключение

Диссертационная работа Мина Тейна *«Оптимизация траекторий космических аппаратов с использованием эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы»* является законченной научно-квалификационной работой, содержащей решение крупной научной проблемы, имеющей большое значение для повышения эффективности транспортных космических систем, для обоснованного выбора программы развития космических транспортных систем при реализации космической программы. Выводы и рекомендации работы обоснованы. Работа отвечает требованиям ВАК, Положения о порядке присуждения ученой степени, предъявляемым к докторским диссертациям с точки зрения актуальности,

новизны и практической значимости полученных результатов, а ее автор, Мин Тейн, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 (динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов).

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден на заседании департамента механики и мехатроники Института космических технологий Инженерной академии Российского университета дружбы народов 22 мая 2018 (протокол № 05/18).

Первый заместитель – заместитель
по научной работе директора
Инженерной академии,
профессор департамента
механики и мехатроники, д.т.н.



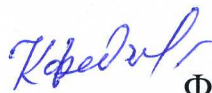
Купреев Сергей Алексеевич

Профессор департамента
механики и мехатроники, к.ф.-м.н.



Баранов Андрей Анатольевич

Доцент департамента
механики и мехатроники, к.ф.-м.н.



Федяев Константин Сергеевич

Исп. Купреев С.А.

т. 8 495 955 09 61, e-mail: kupreev_sa@rudn.university