

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук, профессора Овчинникова Михаила Юрьевича на диссертацию Мина Тейна на тему: «Оптимизация траекторий космических аппаратов с использованием эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»

Декларируемыми целями диссертационной работы Мина Тейна являются повышение эффективности космических транспортных систем с электроракетной двигательной установкой при реализации межорбитальных и межпланетных перелетов; совершенствование методических основ механики космического полета с малой тягой; совершенствование методов проектирования траекторий космических аппаратов с малой тягой. Для достижения этих целей были сформулированы и решены задачи, преследующие разработку:

- универсальной методики решения краевой задачи принципа максимума Понтрягина, основанной на применении нового численного метода безусловной оптимизации, относящегося к группе метаэвристических методов и представляющего собой модификацию алгоритма эволюционной стратегии;

- универсальной методики оптимизации сложных схем межпланетного перелета космического аппарата (КА) с использованием гравитационных маневров у промежуточных планет и дополнительных импульсов скорости на гелиоцентрических участках перелета. Реализация рассматриваемой методики основана на применении новых численных методов глобальной оптимизации.

Фактически диссертация посвящена разработке и апробации методики решения широкого класса задач траекторной оптимизации, неизбежно возникающих при баллистическом проектировании межпланетных и межорбитальных перелетов КА с электроракетным двигателем (ЭРД) в качестве маршевой двигательной установки. Суть рассматриваемой методики заключается в эффективном применении комбинации двух различных методов оптимизации, предназначенной для решения рассматриваемых в работе задач баллистического проектирования:

- непрямого метода вариационной группы – принципа максимума, широко используемого при решении задач оптимизации для управляемых динамических систем, в качестве которой в работе непосредственно выступает сам КА с электроракетной двигательной установкой (ЭРДУ),

СВЯЩИЙ ОТДЕЛ МАН
Р. № 31 / 05 / 20 18

- нелокального метаэвристического численного метода безусловной оптимизации CMA-ES (Covariance Matrix Adaptation – Evolution Strategy), представляющего собой модифицированную эволюционную стратегию с адаптацией ковариационной матрицы, построенную на основе использования механизмов «направленной» селекции и мутации, и реализующую в структуре своего алгоритма некоторый аналог «псевдодетерминированного» процесса биологической эволюции.

В рамках предлагаемого автором подхода исходная задача оптимального управления в соответствии с формализмом принципа максимума каждый раз редуцируется к краевой, в общем случае, многоточечной задаче для системы обыкновенных дифференциальных уравнений, для решения которой используется следующий простой и при этом весьма эффективный прием. Вместо того, чтобы непосредственно численно искать решение системы нелинейных и неявно заданных уравнений достаточно большой размерности, отвечающей краевой задаче принципа максимума, автор предлагает переходить к решению эквивалентной задачи безусловной оптимизации, решение которой эквивалентно решению рассматриваемой системы нелинейных уравнений. Иными словами, переходить к поиску абсолютного или же, возможно, глобального минимума выбираемой специальным образом скалярной функции, аргументами которой являются неизвестные параметры краевой задачи. В качестве такой минимизируемой скалярной функции автор предлагает использовать взвешенную сумму, образованную из целевого функционала (критерия качества) рассматриваемой оптимизационной проблемы и суммы квадратов невязок соответствующей краевой задачи. Такой, на первый взгляд, простой подход, основанный, фактически, на использовании идеи метода штрафных функций, позволяет, во-первых, эффективно решать краевые задачи принципа максимума, отвечающие различным постановкам сформулированных задач траекторной оптимизации перелетов КА с ЭРДУ, а во-вторых, преодолевать сложности, связанные с поиском и/или выбором надлежащего решения последних, ввиду их хорошо известной и при том весьма существенной многоэкстремальности. Это удастся сделать именно за счет использования модифицированной эволюционной стратегии (CMA-ES) в качестве численного алгоритма для поиска безусловного минимума рассматриваемой скалярной функции, так как он, в своей основе в отличие от классических численных методов, осуществляющих линейный поиск и/или отслеживание доверительного интервала, использует нелокальные механизмы для отслеживания направлений убывания и выбора величины шага. Это позволяет значительно снизить требования, предъявляемые непосредственно к самой минимизируемой функции, так как для работы алгоритма вовсе не требуется ее дифференцируемость и даже непрерывность всюду на элементах из области поиска решения. Кроме того, метод, исходя из его построения, весьма уверенно претендует на глобальность.

Таким образом, используя очевидные преимущества численного метода безусловной оптимизации, автору удалось построить эффективную методику решения задач траекторной оптимизации, позволившую с одной стороны преодолеть известные трудности при решении соответствующих краевых задач принципа максимума, а с другой – весьма близко подойти к решению задачи поиска/выбора глобальной экстремали.

В диссертационной работе автор с успехом применяет предложенную им методику, демонстрируя ее высокую вычислительную эффективность на практике. Это подтверждается большим объемом полученных результатов, отвечающих различным постановкам задач траекторной оптимизации для межпланетного и межорбитального перелета, которые соответствуют как простым «базовым» типам маневрирования КА с ЭРДУ в окрестности Земли (межорбитальный перелет типа «орбита-орбита») и на гелиоцентрическом участке траектории («Земля–планета назначения»), так и перелетам, осуществляемым по сложным схемам. К последним в работе относятся межпланетные перелеты, содержащие выбираемую последовательность гравитационных маневров на гелиоцентрическом участке траекторного движения центра масс КА с ЭРДУ.

Актуальность

Необходимость в постоянном совершенствовании теоретико-методологического аппарата и соответствующих программно-вычислительных инструментов и комплексов, предназначенных для решения задач проектной баллистики, обусловлена в настоящее время как общим развитием космической техники, так и неизменно возрастающей сложностью планируемых для КА с ЭРДУ различных миссий для исследования Солнечной системы и для различного рода транспортных операций вблизи Земли. Предложенная автором в рамках диссертационной работы методика и созданное им специальное программное обеспечение позволяют расширить набор инструментов, необходимый для решения текущих и планируемых задач баллистического проектирования траекторий КА с двигателем малой тяги. Это и определяет *актуальность* настоящей работы.

Основные результаты

К *основным результатам*, полученным в рамках рассматриваемой диссертационной работы Мина Тейна и приведшим к достижению поставленных автором целей, следует отнести создание:

- универсальной методики, предназначенной для решения краевой задачи принципа максимума, основанной на применении нового метаэвристического численного метода безусловной оптимизации SMAES, представляющего собой специфическую модификацию алгоритма эволюционной стратегии;

- универсальной методики для оптимизации сложных схем межпланетного перелета КА с использованием гравитационных маневров у промежуточных планет и дополнительных импульсов скорости на гелиоцентрических участках перелета; реализация этой методики основана на применении новых численных методов глобальной оптимизации.

В основе всех представленных в работе методик и результатов лежат оригинальные идеи, предложенные лично автором работы.

Научная новизна полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Их достоверность

Научная новизна диссертационной работы Мина Тейна заключается в следующем:

- сформирована методическая база для решения задачи оптимального управления движением центра масс КА с ЭРДУ с помощью совместного использования условий оптимальности принципа максимума и численного метода оптимизации, представляющего собой модифицированную эволюционную стратегию с адаптацией ковариационной матрицы;
- в рамках предложенной автором методики разработан устойчивый и регулярный с вычислительной точки зрения метод оптимизации многовитковых межорбитальных перелетов КА с ЭРДУ между некомпланарными орбитами при рассмотрении задачи оптимального быстрогодействия и для задачи минимизации затрат топлива при фиксированном времени перелета;
- в рамках предложенной автором методики разработан устойчивый и регулярный метод решения задач траекторной оптимизации прямых гелиоцентрических перелетов КА с идеально-регулируемой ЭРДУ и для КА с нерегулируемым двигателем;
- разработаны и апробированы алгоритмы анализа и оптимизации с использованием метода эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы сложных схем межпланетного перелета КА к телам Солнечной системы с использованием гравитационных маневров у промежуточных планет и дополнительных импульсов скорости на гелиоцентрических участках перелета.
- разработан трехступенчатый подход к решению сквозной задачи оптимизации для сложных траекторий перелета КА с ЭРДУ с использованием полного набора условий оптимальности в рамках предложенной автором методики.

Практическая значимость полученных автором результатов

Практическая значимость результатов работы Мина Тейна заключается в следующем:

- разработан новый методический подход для решения задач оптимизации траекторий межорбитальных и межпланетных перелетов КА с ЭРДУ;

- разработана методика проектирования сложных схем межпланетного перелета КА к телам Солнечной системы с использованием гравитационных маневров у промежуточных планет и дополнительных импульсов скорости на гелиоцентрических участках перелета.

Созданный автором теоретико-методологический аппарат и разработанное на его основе программное обеспечение можно использовать для проведения проектно-баллистического анализа широкого ряда перспективных космических миссий, в числе которых:

- выведение КА с низкой околоземной орбиты на ГСО с использованием космической транспортной системы на базе РН, ХРБ и ЭРДУ;
- выведение КА на рабочие гелиоцентрические орбиты для исследования Солнца;
- выведение КА на орбиту вокруг планеты назначения для исследования этой планеты или его спутников.

Все основные результаты, полученные автором работы, опубликованы в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ и прошли апробацию на российских и международных научно-технических конференциях.

Диссертация оформлена хорошо, в полном соответствии с требованиями ВАК. Текст работы написан грамотным научно-техническим языком. Это особенно приятно, принимая во внимание, что для автора русский язык не является родным.

Замечания:

- “красной нитью” по всей диссертации проходит слоган “повышение эффективности”; интерпретировать полученные автором результаты можно по-разному, например, с точки зрения инженерно-технологических, пользовательских критериев эффективности (доставляемая масса, затраты характеристической скорости, время полета) и с точки зрения вычислительно-алгоритмических критериев (сложность и “грубость” алгоритмов, их быстродействие, сложность программной реализации); целесообразно дать определение или комментарий, что понимается под этим термином;
- во всех полученных автором в качестве примеров решений задач траекторной оптимизации при рассмотрении межорбитальных и межпланетных перелетов используется простейшая модель движения центра масс КА в центральном ньютоновом поле сил, то есть не учитывается влияние возмущений; уместным было бы привести оценки вклада пренебрегаемых возмущений на конечный результат;
- несмотря на обилие полученных автором численных результатов и проведенное им широкое сравнение, демонстрирующее высокую эффективность метода CMA-ES по

сравнению с прочими численными методами оптимизации, и, как следствие этого, наглядно демонстрирующее вычислительную эффективность предложенной им методики решения задач траекторной оптимизации на практике, считаю, что сама методика требует более подробного и строгого теоретического обоснования;

- при рассмотрении сложных схем межпланетного перелета КА, содержащих гравитационные маневры у ряда промежуточных планет, автором всегда рассматривается только один случай возможных параметров маневра, отвечающий предельному значению угла поворота асимптоты гиперболы пролетной орбиты;
- необходимо провести оценку степени универсальности разработанных методик и обосновать глобальность полученных экстремумов.

Указанные недостатки не снижают общей высокой оценки диссертационной работы, и могут быть рассмотрены только как рекомендации к дальнейшему развитию исследований.

Вывод

Диссертация Мина Тейна «Оптимизация траекторий космических аппаратов с использованием эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком уровне, по своему содержанию полностью соответствующую паспорту специальности 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

В содержательной части работы автор демонстрирует высокую степень интереса и глубины вовлеченности в рассматриваемые им актуальные проблемы баллистического проектирования траекторий КА, уверенное владение базовыми теоретическими инструментами, формирующими ядро механики космического полета как научной дисциплины. Последнее находит свое отражение в строгости и полноте изложения предлагаемых автором теоретических методик и алгоритмов, а также в проведении математически строгой формализации и сопутствующего ей анализа рассматриваемых оптимизационных проблем. В работе автор наглядно демонстрирует высокую эффективность предложенных им методов и подходов к решению задач траекторной оптимизации, приведя значительное количество полученных с их помощью результатов. Так же стоит отметить, что предложенная автором методика поиска решений задач траекторной оптимизации, в основе которой лежит совместное использование метаэвристического алгоритма численной оптимизации (СМА-ES) и метода штрафных функций, оказывается весьма универсальной (что показано автором) и может представлять собой отдельный самостоятельный интерес. Очевидно, что последняя может быть использована не только в рамках рассматриваемой в работе проблематики,

непосредственно связанной с оптимизацией траекторного движения центра масс КА, но и для широкого класса задач оптимизации управляемых динамических систем в целом.

Содержание и оформление диссертационной работы Мина Тейна «Оптимизация траекторий космических аппаратов с использованием эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы» полностью соответствует требованиям «Положения о присуждения ученых степеней» ВАК Минобрнауки РФ, предъявляемым к докторским диссертациям. Представленная диссертация является научной квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в повышения эффективности космических транспортных систем и совершенствования методических основ механики космического полета с малой тягой и, тем самым, вносит значительный вклад в развитие экономики страны и повышение ее обороноспособности.

Считаю, что автор диссертационной работы Мин Тейн заслуживает присуждения ему степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Официальный оппонент

Овчинников Михаил Юрьевич

доктор физико-математических наук по специальности 01.02.01 «Теоретическая механика», профессор по кафедре теоретической механики заведующий сектором Федерального государственного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук" (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН)

Москва, 125047 Миусская пл., д. 4. Тел. 499-220-78-49, E-mail: ovchinni@keldysh.ru

Подпись официального оппонента профессора М.Ю. Овчинникова заверяю

Ученый секретарь ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

кандидат физико-математических наук

24 мая 2018 г.



А.И. Маслов