

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Мина Тейна "Оптимизация траекторий космических аппаратов с использованием эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы", представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

В настоящее время электроракетные двигательные установки (ЭРДУ) используются не только для поддержания орбиты космического аппарата (КА), но и для выполнения сложных орбитальных манёвров. Известны успешно осуществлённые миссии, в которых КА при помощи такой двигательной установки после отделения от ракеты-носителя переводились на рабочую околоземную орбиту или, как в случае с миссией "Smart-1", выполняли многовитковый перелёт к Луне. Поэтому тема диссертации Мина Тейна, посвящённой разработке методов оптимизации манёвров КА с двигателем малой тяги, представляется актуальной.

Поиск оптимального управления в механических системах в основном осуществляется численными методами, при реализации которых возникают проблемы, связанные с обеспечением сходимости применяемых итерационных процедур. Основная трудность решения краевой задачи для системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих оптимальное движение КА (она имеет высокий порядок и включает уравнения для сопряжённых переменных) заключается в нахождении хорошего начального приближения для параметров краевой задачи. Краевые условия часто очень чувствительны к небольшим изменениям неизвестных начальных условий. Более того, краевые условия могут быть негладкими (и даже разрывными) функциями параметров краевой задачи. В связи с этим возникает проблема обеспечения сходимости используемых итерационных процедур.

В диссертации М. Тейна предлагается использовать численный метод оптимизации, не являющийся локальным и не требующий оценки производных минимизируемой функции – метод эволюционной стратегии (Evolution Strategy) с адаптацией ковариационной матрицы (Covariance Matrix Adaptation), далее

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ

Вх. №

14 06 20 18

СМАЕС. Он основан на известных механизмах генетики и общей биологии, которые позволяют обеспечить закрепление целевого признака на следующей итерации решения задачи, либо выявить те решения на текущей итерации, для которых обеспечивается наилучшее выполнение отдельного характерного признака.

Автор показал, что в задачах механики космического полёта данный метод характеризуется высокой вычислительной устойчивостью и хорошей сходимостью даже в случае абсолютно произвольного начального приближения. Так, в задаче оптимизации прямого перелёта КА с идеально регулируемой ЭРДУ от Земли к Марсу при сравнении эффективности разных численных методов оптимизации только метод СМАЕС обеспечил нахождение оптимальной траектории.

Автор исследовал эффективность разработанного метода в задаче оптимизации траектории многовиткового перелета КА между некомпланарными орбитами. Для того, что бы избежать сингулярностей орбитальных элементов, им были использованы равноденственные элементы. В качестве критерия оптимизации выбиралось как время выполнения космического манёвра (задача быстродействия), так и время работы двигателя (минимизировалось моторное время при фиксированном времени выведения). В диссертации приведены примеры расчётов выведения на геостационарную орбиту с разных начальных орбит, показаны преимущества использования разработанного алгоритма.

В последующих главах диссертации автором успешно показаны возможности применения метода СМАЕС для расчёта параметров межпланетного перелета с химическими и электроракетными двигательными установками с использованием гравитационных манёвров. Использование гравитационных манёвров является чрезвычайно эффективным при межпланетных перелётах, так как КА получает дополнительные приращения скорости за счёт пассивных сил гравитационной природы. Вместе с тем, расчёт таких траекторий даже в сочетании с импульсными манёврами – задача нетривиальная. Однако тот факт, что гравитационные манёвры использовались практически во всех миссиях к планетам-гигантам и к дальним границам Солнечной системы, придаёт работе М. Тейна особую научно-практическую ценность.

Предложенные и протестированные автором подходы позволяют эффективно решать задачи быстродействия и задачи минимизации характеристической

скорости при выведении КА с двигателем малой тяги при фиксированном времени.

По автореферату можно сделать следующие замечания.

1. Во второй главе автор стремился получить зависимость характеристической скорости V_h от величины начального реактивного ускорения при различных реальных значениях удельного импульса (600-900 с). У двигательных установок малой тяги современных российских и зарубежных КА значения удельного импульса доходят до существенно больших значений. Поэтому необходимо пояснить, почему был рассмотрен именно этот диапазон удельных импульсов.

2. В этой же главе автор в основном ограничил себя временем выведения на целевую геостационарную орбиту, равным 25-35 суткам. Представляется, что при перелёте между некомпланарными орбитами (а именно такие перелёты заявлены во второй главе) дополнительное время на пассивном участке может позволить скорректировать долготу восходящего узла за счёт её прецессии, а при решении задачи встречи – расширить область оптимальной фазовой разницы по аргументу широты. Рассмотрение более длительного диапазона продолжительности выведения заметно повысило бы ценность приведённой на странице 24 эмпирической формулы, описывающей зависимость характеристической скорости V_h от величины начального реактивного ускорения.

3. Многие рисунки можно "прочитать" только при сильном увеличении электронной версии автореферата, при этом заметно ухудшается качество изображения.

Приведённые выше замечания ни в коем случае не снижают ценность диссертации М. Тейна, которая вносит существенный вклад в решение актуальной научной проблемы – оптимизации траекторий КА с двигателями малой тяги. Результаты работы доложены автором на Всероссийских и международных конференциях и отражены в публикациях: как в российских рецензируемых изданиях из перечня ВАК, так и в иностранных журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus.

Судя по автореферату, диссертация Мина Тейна "Оптимизация траекторий космических аппаратов с использованием эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы" удовлетворяет требованиям ВАК, а её автор

