

УДК 629.78, 521.3

Оптимизация времени многовиткового перелета в усредненной модели

Суслов Кирилл Сергеевич^(*)

k.suslov@mail.ru

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

Аннотация. Предложена методика построения квазиоптимального по времени многовиткового межорбитального перелета. Методика основана на параметризации направления непрерывной тяги постоянной величины конечным тригонометрическим рядом, а также на использовании аналитически усредненных уравнений движения. Построены квазиоптимальные по времени многовитковые перелеты между различными околоземными орбитами. Методика позволяет проводить оперативные оценки времени, необходимого для межорбитального перелета, а также получать начальные приближения при оптимизации многовитковых траекторий в усредненной модели.

Ключевые слова: орбитальное движение, метод усреднения, малая тяга, оптимизация по времени, многовитковый перелет.

Введение. Приближенные модели орбитального движения являются полезным инструментом в задачах небесной механики. Они позволяют быстро получать начальное приближение для оптимизационных схем и проводить качественный анализ динамики. Одним из эффективных способов аппроксимации траекторий в неинтегрируемых системах является метод усреднения. Стандартная процедура аналитического усреднения, примененная к задаче двух тел, возмущенной периодическим ускорением, приводит к тому, что влияние возмущения может быть параметризовано конечным набором скалярных величин [1], а в частных случаях и к наличию аналитического решения [2]. В данной работе описанные выше свойства усредненной задачи используются для решения задачи построения межорбитального перелета за наименьшее время. Данная задача представляет интерес при проектировании миссий космических аппаратов с малой тягой, когда моторное время двигателя и время прохождения аппарата через радиационные пояса Земли необходимо минимизировать.

Материалы и методы; результаты. В рамках минимизации времени перелета между двумя кеплеровыми орбитами тяга маршевого двигателя космического аппарата считается постоянной. Данное свойство тяги является необходимым условием того, что траектория перелета является оптимальной по времени при условии релейности двигательной установки [3]. Таким образом, управление двигателем описывается двумя углами направления вектора тяги. Зависимость этих углов от угловой дальности аппроксимируется усеченными тригонометрическими рядами, что позволяет использовать аналитически усредненные уравнения движения для интегрирования траектории. Поиск минимального времени производится с помощью прямых методов оптимизации.

Предложенная методика использована для оценки минимального времени, необходимого для вывода малого космического аппарата массой 46 кг на высокую эллиптическую орбиту с высотой перицентра 20 000 км и высотой апоцентра 120 000 км силами маршевого двигателя малой тяги. В качестве начальных орбит рассмотрены низкая околоземная, солнечно-синхронная и геопереходная орбиты.

Заключение. Разработана методика построения квазиоптимальных по времени многовитковых траекторий в рамках усредненной модели орбитального движения. Полученные законы управления и траектории могут быть использованы при оценке минимального времени, необходимого для вывода космического аппарата на целевую орбиту силами двигателя малой тяги. Также, они могут быть взяты в качестве начальный приближений при оптимизации многовитковых перелетов в рамках неусредненной модели.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда (проект № 24-11-00038).*

Список источников

- [1] Hudson J.S., Scheeres D.J. Reduction of Low-Thrust Continuous Controls for Trajectory Dynamics. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2009, vol. 32 (3), pp. 780–787.
- [2] Suslov K., Shirobokov M., Trofimov S. Approximate Finite Fourier Solution to the Periodically Perturbed Two-Body Problem. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2024, vol. 47 (8), pp. 1698–1708.
- [3] Petukhov V.G. Robust suboptimal feedback control for low-thrust transfer between noncoplanar elliptical and circular orbits. *Spacecraft and Rockets*, 2010, vol. 17 (3), pp. 50–58.