

УДК 629.78+004.852

Нейросетевые и гибридные методы коррекции движения в окрестности окологлунных орбит

Широбоков Максим Геннадьевич^(*)

shirobokov@keldysh.ru

SPIN-код: 7046-4960

Перепухов Денис Глебович

dperepukhov@keldysh.ru

SPIN-код: 7933-6155

Забара Илья Денисович

zabara.id@phystech.edu

SPIN-код: 9525-5144

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

Аннотация. Работа посвящена разработке методов поддержания движения и спасения миссий в окрестности окологлунных почти прямолинейных гало-орбит, высоких круговых орбит и траекторий перелета между круговыми орбитами с использованием методов на основе тензора Коши – Грина и обучения с подкреплением. Для каждого режима движения рассмотрены различные виды управляющих стратегий: чисто нейросетевые, на основе тензора Коши – Грина, а также гибридные. Приведены оценки затрат характеристической скорости и точность поддержания движения.

Ключевые слова: коррекция движения, поддержание орбиты, гало-орбита, управление, обучение с подкреплением, тензор Коши – Грина

Введение. Исследование Луны и окологлунного пространства переживает новый подъем интереса со стороны международного космического сообщества [1, 2]. Государственные агентства и частные компании работают над созданием лунной инфраструктуры, включая орбитальные станции, навигационные созвездия и лунные базы. Центральное место в этих планах занимают окологлунные и гало-орбиты, обеспечивающие устойчивую радиовидимость и постоянную связь с обратной стороной Луны, а также возможность использования в качестве опорных станций для пилотируемых миссий и транзитных узлов для полетов в дальний космос. Важной задачей для реализации этих планов является разработка автономных средств управления движением в сложной возмущенной динамической среде системы Земля – Луна, особенно для коррекции траектории и спасения миссий в нештатных ситуациях.

Методы и материалы; результаты. В отличие от неустойчивых гало-орбит, устойчивые и слабонеустойчивые гало-орбиты (включая почти-прямолинейные), а также круговые окологлунные орбиты и траектории перелета не обладают устойчивыми инвариантными многообразиями, что исключает применение теории Флоке для коррекции движения. Задача коррекции может решаться оптимизацией маневра, например методом Target Point Approach, либо автономно на борту аппарата приближенными методами [3]. Перспективным подходом является метод на основе тензора Коши – Грина, который описывает деформацию малого объема фазового пространства вдоль траекто-

рии, выявляя направления максимального растяжения и сжатия возмущений [4]. Этот подход не требует периодичности траектории и основывается на линеаризованной динамике. Нелинейные эффекты можно учесть нейросетевым подходом с помощью обучения с подкреплением [5]. Целью данной работы является разработка и сравнение методов поддержания на основе этих двух подходов. Рассматривается три режима движения: вблизи почти-прямолинейной гало-орбиты, высокой круговой орбиты и траектории перелета между круговыми орбитами. Аппарат отклоняется от номинального движения и использует фазовый вектор для коррекции движения. Определяются характеристическая скорость и точность коррекции для каждого подхода.

Заключение. Разработанные методы на основе тензора Коши – Грина и обучения с подкреплением для управления космическими аппаратами в околосолнечном пространстве показали свою эффективность. Сравнение позволило установить области применимости каждого подхода и выработать рекомендации по их использованию.

*Работа поддержана грантом Российского научного фонда
(проект № 24-71-00032).*

Список источников

- [1] В РАН обсудили реализацию российской лунной программы до 2060 года. URL: <https://new.ras.ru/activities/news/v-ran-obsudili-realizatsiyu-rossiyskoy-lunnoy-programmy-do-2060-goda/> (дата обращения 05.11.2025).
- [2] Li X. et al. A review on design and construction of the lunar launch/landing infrastructure. *Advances in Space Research*, 2024, vol. 74, no. 8, pp. 4030–4049. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.07.006>
- [3] Shirobokov M., Trofimov S., Ovchinnikov M. Survey of Station-Keeping Techniques for Libration Point Orbits. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2017, vol. 40, no. 5, pp. 1085–1105. <https://doi.org/10.2514/1.G001850>
- [4] Muralidharan V., Howell K.C. Stretching directions in cislunar space: Applications for departures and transfer design. *Astrodynamics*, 2023, vol. 7, pp. 153–178. <https://doi.org/10.1007/s42064-022-0147-z>
- [5] Широбоков М.Г. Методика построения управления космическими аппаратами с использованием методов обучения с подкреплением. *Космические исследования*, 2024, т. 62, № 5, с. 498–515. <https://doi.org/10.31857/S0023420624050082>