

УДК 629.78+004.852

Методы оценки наибольших отклонений от лунных гало-орбит

Забара Илья Денисович^(*)

zabara.id@phystech.edu

SPIN-код: 9525-5144

Широбоков Максим Геннадьевич

shirobokov@keldysh.ru

SPIN-код: 7046-4960

Перепухов Денис Глебович

dperepukhov@keldysh.ru

SPIN-код: 7933-6155

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

Аннотация. Исследована задача оценки максимальных отклонений космического аппарата от номинальных гало-орбит вблизи точек либрации L1 и L2 системы Земля–Луна в присутствии навигационных неопределенностей. Сравниваются несколько методов, включая как классические методы на основе линейной теории динамических систем, так и предлагаемые подходы на основе методов оптимизации и полиномиальной аппроксимации орбит. Предлагаемые подходы обеспечивают более точное и эффективное определение отклонений, что делает их перспективным инструментом для анализа риска миссий.

Ключевые слова: гало-орбита, навигационная неопределенность, максимальное отклонение

Введение. Рост программ лунных исследований [1] и развертывание окололунной инфраструктуры [2, 3] делают гало-орбиты вокруг точек либрации L1 и L2 системы Земля – Луна перспективными для размещения космических аппаратов. Естественная неустойчивость таких орбит делает актуальной задачу прогнозирования максимальных отклонений при заданном уровне навигационной неопределенности состояния. Традиционные методы на основе линеаризации динамики дают быстрые оценки, но могут существенно отклоняться от реальных значений из-за нелинейности задачи. В работе исследуется применение методов оптимизации и полиномиальной аппроксимации орбит для определения верхних оценок отклонений на периоде орбиты и проводится их сравнение с классическими подходами.

Методы и материалы; результаты. Орбиты рассматриваются в рамках круговой ограниченной задачи трех тел. Вводится полиномиальная аппроксимация потока динамической системы вблизи орбит на основе методов дифференциальной алгебры [4]. Аппроксимация потока позволяет ускорить прогноз состояния аппарата и отклонения от орбиты без численного интегрирования уравнений движения. Сравниваются несколько подходов к оценке максимальных отклонений: классический линейный анализ на основе матрицы монодромии, аналитическая оценка максимального отклонения как решение оптимизационной задачи в линейном приближении, метод Монте-Карло с генерацией начальных условий внутри эллипсоида неопределенности и прогнозом состояния с помощью полиномиальной аппроксимации потока,

нелинейная оптимизация отклонения при полиномиальной аппроксимации потока, нелинейная оптимизация при численном интегрировании (эталонный метод). Результаты показывают, что классический линейный анализ существенно занижает верхние оценки отклонения для устойчивых гало-орбит. Для неустойчивых орбит его применимость выше, но другие методы точнее. Аналитическая оценка дает быстрый и приемлемый по точности результат. Метод Монте-Карло более затратен, но позволяет получать распределение отклонений для оценки средних значений или медианы. Нелинейная оптимизация с полиномиальной аппроксимацией воспроизводит точность прямого интегрирования при существенно меньших затратах и выявляет максимальные отклонения. С помощью этих методов получена зависимость максимального отклонения от уровня навигационной неопределённости для семейства гало-орбит.

Заключение. Для оценки максимального отклонения от гало-орбит рекомендуется использовать аналитическое решение оптимизационной задачи в линейном приближении динамики. Более точный результат достигается благодаря последующей оптимизации в нелинейном приближении или при прямом интегрировании. Удобными также оказываются приближенные формулы, связывающие навигационную неопределенность и отклонение.

*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 09.11.2025).
- [2] Israel D.J. LunaNet: A Flexible and Extensible Lunar Exploration Communications and Navigation Infrastructure. *IEEE Aerospace Conference*, 2020, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1109/AERO47225.2020.9172509>
- [3] NASA's Lunar Communications and Navigation Architecture. NASA. URL: <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/01/lunar-communications-and-navigation-architecture.pdf> (accessed 09.11.2025).
- [4] Забара И.Д., Ширококов М.Г. Геометрический метод определения безопасной орбиты для предотвращения столкновения с космическим мусором. *Препринты Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН*, 2024, № 50, 33 с. <https://doi.org/10.20948/prepr-2024-50>