УДК 629.78

Анализ чувствительности гало-орбит вокруг либрационных точек L_1 и L_2 системы Земля – Луна к навигационным ошибкам

Забара Илья Денисович(*) zabara.id@phystech.edu
Широбоков Максим Геннадьевич shirobokov@keldysh.ru
Перепухов Денис Глебович dperepukhov@keldysh.ru

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

Аннотация. *Исследовано влияние навигационных погрешностей на траектории КА вблизи точек либрации L_1 и L_2 системы Земля — Луна. Количественно оценены отклонения от номинальных гало-орбит на интервале одного-двух витков при различных уровнях ошибок навигации. Расчеты выполнены методами автоматического дифференцирования и Монте-Карло. Получены аналитические зависимости величины отклонений от уровня навигационных ошибок на основе линейной регрессии.*

Ключевые слова: *космический аппарат, навигационная неопределенность, гало-орбита, чувствительность траекторий, лунная миссия, автоматическое дифференцирование*

Введение. Число проектов, связанных с полетами к Луне, растет. Космические агентства и частные компании проявляют интерес к созданию окололунной инфраструктуры, аналогичной околоземной [1, 2]. В РАН представили программу до 2050 г. [3]. Планируемая инфраструктура должна включать навигационные системы, орбитальные станции, лунные базы и средства для длительного пребывания человека. Рост числа планируемых лунных миссий повышает значимость анализа и предотвращения внештатных ситуаций. Один из ключевых аспектов — исследование чувствительности траекторий в системе Земля–Луна к навигационным и исполнительным ошибкам, чему и посвящена данная работа.

Материалы и методы; результаты. В работе рассмотрены гало-орбиты вокруг точек либрации L_1 и L_2 системы Земля — Луна, рассматриваемые в различных миссиях. Цель работы состоит в получении зависимостей отклонения фазового состояния аппарата через один-два витка от уровня навигационной неопределенности. Мы проанализировали широкий диапазон орбит и ошибок, включая экстремальные случаи, на порядки превышающие стандартные величины отклонений, которые могут быть вызваны, в частности, нештатными ситуациями на борту аппарата.

Для определения зависимостей между уровнем навигационной неопределенности и отклонениями в данной работе используются методы автоматического дифференцирования, позволяющие аппроксимировать конечные положения аппаратов формулой Тейлора высокого порядка. Реализации этих методов находится в открытом доступе, например, в Differential Algebra

Computational Toolbox [4] (DACE). Указанные зависимости были аппроксимированы простыми формулами с помощью линейной регрессии. Применение методики для анализа околоземных орбит была продемонстрирована ранее авторами в работе [5].

Заключение. В результате исследования были получены приближенные зависимости, связывающие уровень навигационной неопределенности с отклонением траекторий аппаратов на гало-орбитах вокруг точек либрации L_1 и L_2 системы Земля-Луна. Применение методов автоматического дифференцирования и линейной регрессии помогло аппроксимировать отклонения как функции стандартных отклонений. Результаты будут полезны при разработке и сопровождении будущих лунных миссий, готовые приближенные зависимости помогут избежать массовых расчетов в определении требуемой навигационной точности и оценках риска потери миссии.

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

Список источников

[1] Israel D.J. et al. Lunanet: a flexible and extensible lunar exploration communications and navigation infrastructure. *IEEE Aerospace Conference*. IEEE, 2020, pp. 1–14.

[2] *Институт космических исследований РАН. Концепция проекта «Луна-27» представлена на симпозиуме в ИКИ РАН*. URL: https://iki.cosmos.ru/news/koncepciya-proekta-luna-27-predstavlena-na-simpoziume-v-iki-ran (дата обращения 10.11.2024).

[3] *РБК. Россия продолжит реализацию лунной программы*. URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media/24/04/2024/6628e46c9a7947142d00c826 (дата обращения 11.11.2024).

[4] *daceypy. Страница Python-оболочки библиотеки набора вычислительных инструментов для дифференциальной алгебры daceypy*. URL: https://github.com/giovannipurpura/daceypy (дата обращения 27.10.2024).

[5] Забара И.Д., Широбоков М.Г. Геометрический метод определения безопасной орбиты для предотвращения столкновения с космическим мусором. *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН*, 2024, № 50, 33 с.