

УДК 629.78

Исследование эффективности Sundiver-траекторий аппаратов с солнечным парусом

Перепухов Денис Глебович^(*)dperepukhov@keldysh.ru
SPIN-код: 7933-6155

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

Аннотация. Работа посвящена построению и анализу траекторий типа Sundiver для аппаратов с солнечными парусами. Цель исследования — определить максимально достижимые гиперболические избытки скорости в зависимости от характеристического ускорения аппарата и минимального гелиоцентрического расстояния. Для этого предложен метод, основанный на декомпозиции траектории и обратном во времени распространении уравнений движения. Такой подход позволяет эффективно применять локально-оптимальный по энергии закон управления, что избавляет от необходимости численной оптимизации.

Ключевые слова: солнечный парус, быстрая траектория, управление, оптимизация, Sundiver

Введение. Траектории типа Sundiver — это траектории малых космических аппаратов с солнечными парусами, в рамках которых осуществляется близкий пролет Солнца (от нескольких солнечных радиусов) с целью вывода аппарата на отлетную гиперболическую траекторию с гиперболическим избытком скорости от единиц до десятков астрономических единиц в год. Разгон аппарата осуществляется за счет комбинирования эффекта Оберта и высокого солнечного светового давления. Аппараты, летящие по подобным траекториям, быстро достигают больших гелиоцентрических расстояний, поэтому сегодня их предлагают использовать для миссий по исследованию дальних областей Солнечной системы, ближнего межзвездного пространства, для полета к фокусу солнечной гравитационной линзы, и для проведения других перспективных научных исследований [1].

Sundiver-траектории исследовались в течение последних трех десятилетий, были предложены различные подходы к построению таких траекторий, включая применение локально-оптимальных законов управления [2], принципа максимума Понтрягина [3], а также методов численной оптимизации [4]. Однако большинство из них требуют сложных процедур оптимизации управления и/или начальных условий, что затрудняет их практическое использование для быстрого анализа миссий.

Методы и материалы; результаты. Предлагается метод, позволяющий оценивать максимально достижимый гиперболический избыток скорости без численной оптимизации. Метод основан на обратном по времени распространении траекторий и применении локально-оптимального по энергии закона управления. При этом основное внимание уделяется фазе «нырка», на которой происходит переход аппарата с эллиптической на гиперболическую

орбиту. Такой подход обеспечивает вычислительную простоту и позволяет сравнительно легко строить и изучать Sundiver-траекторий.

Показано, что аппарат с характеристическим ускорением 1 мм/с^2 может достичь гиперболического избытка скорости до 100 км/с при перигелии около 10 солнечных радиусов и до 43 км/с при 50 солнечных радиусах. Выявлены два типа траекторий — «нормальные» и «спиральные», различающиеся по характеру движения вблизи Солнца. Получена аппроксимация зависимости максимального гиперболического избытка скорости от характеристического ускорения в виде степенного закона. Результаты сравниваются с исследованиями других авторов, показана согласованность результатов.

Заключение. Предложен метод построения траекторий типа Sundiver для аппаратов с солнечным парусом. Метод основан на декомпозиции траектории, распространении уравнений движения обратно во времени, и применении локально-оптимального по энергии закона. Предложенный подход позволил изучить зависимость максимального достижимого гиперболического избытка скорости от характеристического ускорения аппарата и минимального гелиоцентрического расстояния.

*Работа поддержана грантом Российского научного фонда
(проект № 24-11-00038).*

Список источников

- [1] Turyshev S.G. Science opportunities with solar sailing smallsats. *Planetary and Space Science*, 2023, vol. 235. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2023.105744>
- [2] Sharma D.N., Scheeres D.J. Solar system escape trajectories using solar sails. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2004, vol. 41, no. 4, pp. 684–687. <https://doi.org/10.2514/1.2354>
- [3] Zeng X. et al. Optimal solar sail trajectory analysis for interstellar missions. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 2012, vol. 59, pp. 502–516. <https://doi.org/10.1007/s40295-014-0008-y>
- [4] Dachwald B. Optimal solar sail trajectories for missions to the outer solar system. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2005, vol. 28, no. 6, pp. 1187–1193. <https://doi.org/10.2514/1.13301>