

УДК 629.78

Об ускоренном алгоритме для расчета маневров встречи

Чиняев Владимир Николаевич^(*)

chiniaev.vn@mipt.ru

Кузнецов Александр Алексеевич

kuznetsov.aa@mipt.ru

Чугунов Владислав Владимирович

chugunov.vv@mipt.ru

Завьялова Наталья Александровна

zavialova.na@mipt.ru

МФТИ, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены подходы к ускорению решения задачи встречи космических аппаратов при сохранении точности и надежности решения. Исследовано применение метода Ньютона с множественным стартом для поиска квазиглобального минимума функции характеристической скорости в невыпуклой постановке задачи встречи. Проанализировано использование интерполяции средних орбитальных элементов по времени с целью снижения числа вычислений баллистического прогноза. Отдельно изучается применение матрицы чувствительности, учитывающей протяженность маневра при фиксированной орбитальной ориентации в средних орбитальных элементах. По результатам численных экспериментов оценены области применимости указанных подходов и характерные погрешности. Показано, что комбинированное использование рассмотренных приемов позволяет существенно сократить затраты вычислительного времени в типичных задачах встречи космических аппаратов.

Ключевые слова: космический аппарат, задача встречи, оптимизация траектории, метод Ньютона, средние орбитальные элементы, протяженный маневр, матрица чувствительности

Введение. Задача встречи космических аппаратов (КА) относится к классу невыпуклых задач оптимизации с ограничениями и рассматривается в ряде обзоров [1, 2]. На практике применяются многоступенчатые схемы [3], включающие поиск решения на упрощенной баллистической модели с импульсными маневрами, переход к протяженным маневрам и уточнение на более полной динамической модели. Такой подход требует многократного пересчета баллистического прогноза и чувствителен к выбору параметров. Цель работы — исследовать методы сокращения вычислительных затрат на основе метода Ньютона с множественным стартом, интерполяции средних орбитальных элементов и учета протяженности маневров через матрицу чувствительности.

Методы и материалы; результаты. Рассматривается задача минимизации характеристической скорости при переходе от начальных орбитальных элементов к целевым с ограничениями. В качестве базового алгоритма принята трехэтапная схема: оптимизация импульсных маневров, их замена протяженными, уточнение решения на точной модели.

Основная трудность первого этапа — невыпуклость функции характеристической скорости по углам приложения импульсов. Исследуется метод Ньютона с множественным стартом на сетке по истинной долготе. Показано,

что при сопоставимой надежности поиска квазиглобального решения метод дает заметный выигрыш в скорости и точности.

Значительные затраты возникают из-за многократного пересчета баллистического прогноза, и даже эффективные численно-аналитические методы, например УЧАМ [4], могут быть дорогими. Рассматривается подход с однократным высокоточным прогнозом и построением интерполянта средних орбитальных элементов, на основе которого выполняется оптимизация. Показано, что ошибки интерполяции малы при кратном росте быстродействия.

Дополнительно изучается использование матрицы чувствительности в средних орбитальных элементах и ее расширение для протяженных маневров с фиксированной орбитальной ориентацией. Учет протяженности маневра на этапе оптимизации снижает потери в оптимальности, возникающие при прямом преобразовании импульсных решений.

Заключение. Исследованы методы ускорения решения задачи встречи КА на основе метода Ньютона с множественным стартом, интерполяции средних орбитальных элементов и использования расширенной матрицы чувствительности. Показано, что замена перебора по сетке методом Ньютона значительно сокращает время расчета и повышает точность локализации минимума функции характеристической скорости. Интерполяция средних орбитальных элементов обеспечивает выигрыш в быстродействии без ухудшения качества решения. Учет протяженности маневров уменьшает расхождение с последующим точным моделированием и подтверждает эффективность рассматриваемых методов для практических алгоритмов задачи встречи.

Список источников

- [1] Luo Y., Zhang J., Tang G. Survey of orbital dynamics and control of space rendezvous. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, vol. 27, no. 1, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2013.07.042>
- [2] Chai R., Savvaris A., Tsourdos A., Chai S., Xia Y. A review of optimization techniques in spacecraft flight trajectory design. *Progress in Aerospace Sciences*, 2019, vol. 109, art. no. 100543. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2019.05.003>
- [3] DiPrinzio M. *Methods of Orbital Maneuvering*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA, USA, 2019, vol. 261, art. no. 1238.
- [4] Тюлин А.Е., Бетанов В.В. Системный анализ навигационно-баллистического обеспечения в практике применения передовых космических технологий. *Системный анализ, управление и навигация: тез. докл.* Москва, МАИ-Принт, 2019, с. 16–18.