

УДК 629.78

Оптимизация одноимпульсного маневра уклонения космических аппаратов

Чугунов Владислав Владимирович

chugunov.vv@mipt.ru

МФТИ, Долгопрудный, Россия

Аннотация. Рассмотрена задача поиска оптимального одноимпульсного маневра уклонения для космических аппаратов (КА) на НОО. Предложен алгоритм решения данной задачи. Расчет вероятности осуществляется аналитически. Определение направления оптимального маневра, а также соответствующей характеристической скорости происходит путем решения задачи Trust Region Subproblem (TRS). Показаны результаты работы численной реализации алгоритма. Дополнительно работоспособность алгоритма демонстрируется сравнением полученных результатов с перебором большого количества конфигураций случайно сгенерированных орбит.

Ключевые слова: небесная механика, алгоритмы управления, маневрирование, оптимизация, характеристическая скорость, околоземная орбита

Введение. Своевременное и эффективное маневрирование в случае возможного опасного сближения КА на НОО является одной из ключевых задач в обеспечении безопасности в околоземном космическом пространстве — возможность точно и быстро находить оптимальный маневр уклонения служит залогом для ее успешного решения. Целью данной работы является описание алгоритма нахождения оптимального одноимпульсного импульса маневра уклонения, который позволял бы понизить вероятность столкновения КА до заданного значения, при этом с минимальной необходимой для этого характеристической скоростью. В рамках реализации предлагаемого алгоритма время наибольшего сближения (ТСА) двух КА рассчитывается с помощью итерационного алгоритма ANCAS-SBO [1]. Значение вероятности считается аналитически по формуле Хуторовского [2]. Дальнейшая оптимизация на заданном временном отрезке происходит путем решения задачи TRS при помощи метода Double Start [3]. Новизна данной работы заключается в использовании разложения в ряд Тейлора функции вероятности до членов, включающих вторые производные, для решения задачи TRS.

Методы материалы; результаты. Задачей поиска оптимального одноимпульсного маневра уклонения является нахождение такого вектора характеристической скорости, который при приложении его в определенный момент времени на заданном временном интервале обеспечит итоговую вероятность столкновения в момент времени наибольшего сближения, не превосходящую заданного целевого значения.

Формула Хуторовского [2] позволяет представить функцию вероятности в виде квадратичной формы (КФ), в которой соответствующие градиент и матрица Гессе получены по аналитическим выражениям для первых и вторых

производных. Данная КФ далее используется в решении задачи TRS на каждом временном шаге — результатом является набор локальных оптимальных решений для отдельных моментов времени, который затем используется для нахождения глобального оптимального маневра на заданном временном интервале.

Алгоритм был протестирован на ряде сценариев — первым из них был случай с искусственно заданными орбитами КА. Результатом работы алгоритма стало уменьшение вероятности столкновения от исходного значения $2,5 \cdot 10^{-4}$ до $4,9 \cdot 10^{-7}$ для заданной целевой вероятности $1,0 \cdot 10^{-6}$. Минимальное расстояние между КА при этом увеличилось на 7,9 км.

Также был рассмотрен реальный случай столкновения КА «Космос-2251» и Iridium 33. Необходимые начальные данные были взяты из работы [4]. В результате совершения полученного маневра с характеристической скоростью 5 мм/с за сутки до момента ТСА удалось снизить расчетную вероятность столкновения до $6,2 \cdot 10^{-7}$ для целевого значения $1,0 \cdot 10^{-6}$, что позволило увеличить минимальное расстояние между аппаратами в момент ТСА на 72 %.

Также был проведен масштабный перебор для 100000 пар случайно сгенерированных орбит на расчетных интервалах длиной вплоть до суток до соответствующих ТСА с целью сравнить его результаты с работой алгоритма. Максимальное отклонение оптимального решения от результатов перебора составило не более 0,5 %.

Заключение. Был разработан и протестирован алгоритм поиска оптимального одноимпульсного маневра уклонения для КА на околоземных орбитах. Алгоритм успешно справляется с поставленной задачей — снижает вероятность столкновения до заданной при минимальной характеристической скорости, что было продемонстрировано на примере реального случая столкновения на НОО. Дополнительное сравнение с результатами перебора для большого количества орбит показало хорошую точность алгоритма в нахождении оптимального маневра уклонения.

Список источников

- [1] Denenberg E., Gurfil P. Improvements to Time of Closest Approach Calculation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2016, vol. 39, no. 9. pp. 1967–1979. <https://doi.org/10.2514/1.G000435>
- [2] Khutorovsky Z.N., Boikov V.F., Kamensky S.Yu. Direct method for the analysis of collision probability of artificial space objects in LEO: techniques, results and applications. *Proceedings of the First European Conference on Space Debris*, ESA, 1993, pp. 491–499.
- [3] Beck A., Vaisbourd Y. Globally solving the trust region subproblem using simple first-order methods. *SIAM Journal on Optimization*, 2018, vol. 28, no. 3, pp. 1951–1967. <https://doi.org/10.1137/16M1150281>
- [4] Пономарева И.А., Рамазанова Т.К., Шатков С.А. Анализ параметров сближения космических объектов и определение вероятности их столкновения. *VIII Науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов Центра управления полетами: сб. ст.* Королёв, ЦНИИмаш, 2018, с. 173–184.