

УДК 531.13

Оптимальное управление движением активного космического аппарата на этапе буксировки космического мусора при уводе с помощью ионного потока

Рязанов Владимир Владимирович^(*)

rvv345.inbox.ru

Самарский университет, Самара, Россия

Аннотация. Работа посвящена проблеме буксировки космического мусора с околоземной орбиты бесконтактным способом с помощью силового воздействия ионного потока, создаваемым двигателем активного космического аппарата. На основе предложенного закона управления движением активного КА и оптимизации расхода топлива управляющих ионных двигателей приведено оптимальное управление движением космического аппарата. Полученные результаты можно использовать при проектировании космического аппарата и управлении движением на этапе буксировки.

Ключевые слова: космический мусор, закон управления, ионный поток, оптимизация, метод градиентного спуска

Введение. Космический мусор представляет серьезную угрозу для использования околоземного пространства, рассматриваются задачи увода уже не функционирующих объектов космического мусора с орбиты [1].

В работе рассматривается буксировка космического мусора бесконтактным способом с помощью активного КА, оборудованным ионными двигателями. С помощью обдувающего ионного двигателя происходит силовое воздействие ионного потока на объект увода. С помощью маршевого двигателя происходит управление движением активного КА и управление системой «активный КА-космический мусор». Управляющие двигатели предназначены для управления движением активного КА в продольном и поперечном направлении. Целью работы является определение оптимального управления движением активного КА с помощью оптимизации расхода топлива управляющих двигателей и анализ результатов движения активного КА относительно объекта увода.

Материалы и методы; результаты. Положение космического мусора относительно активного космического аппарата задается вектором-столбцом $d = [x, y]^T$. После рассмотрения уравнений движения активного КА относительно пассивного в орбитальной системе координат [2] и перехода полярную систему координат ($x = d \sin \alpha$, $y = d \cos \alpha$) получим следующую систему дифференциальных уравнений, описывающих движение активного КА относительно объекта увода:

$$\begin{cases} \ddot{\alpha} = 2 \frac{n - \dot{\alpha}}{d} \dot{d} + \frac{3}{2} n^2 \sin 2\alpha - \frac{1}{d} (u_{\text{sum}} \sin \alpha + u_x \cos \alpha); \\ \ddot{d} = d (\dot{\alpha}^2 + 3n^2 \sin^2 \alpha - 2n\dot{\alpha}) + u_s \cos \alpha - u_x \sin \alpha, \end{cases} \quad (1)$$

где u_{sum} — сумма внешних ускорений, действующих на систему «активный КА — космический мусор». Закон управления активного КА относительно космического мусора зададим в следующем виде:

$$\begin{aligned} u_x &= c_a \sin \alpha + c_w \dot{\alpha}; \\ u_y &= c_v \dot{d} + c_d (d - d_0), \end{aligned} \quad (2)$$

где c_a, c_w, c_v, c_d — безразмерные коэффициенты, d_0 — фиксированное расстояние на этапе буксировки между активным КА и объектом увода. Принимая во внимание малое значение угла α и $d = \text{const} > 0$ первое уравнение системы (1) с учетом (2) примет вид дифференциального уравнения маятникового типа

$$\ddot{\alpha} - \left(3n^2 - \frac{u_{\text{sum}}}{d} \right) \alpha = -\frac{u_x}{d}, \quad (3)$$

решение которого асимптотически устойчиво при выполнении условий:

$$\frac{u_{\text{sum}}}{d} - 3n^2 > 0; \quad -\frac{u_x}{d} < 0.$$

Уравнение (3) с учетом закона управления (2) примет вид

$$d \alpha - \left(3n^2 d + \frac{F_{21}}{m_2} - \frac{F_{11} - F_{12}}{m_1} - c_d (d - d_0) \right) \alpha = -c_w \dot{\alpha}, \quad (4)$$

где F_{11} — тяга маршевого двигателя, F_{12} — тяга обдувающего двигателя, F_{12} — сила, действующая на объект космического мусора от обдувающего двигателя, m_1 и m_2 — масса активного КА и объекта увода соответственно.

С учетом критерия оптимальности расхода топлива управляющих двигателей $m_{\text{топл}} \rightarrow \min$ проведено численное моделирование уравнения (4) и определено оптимальное управление активного КА.

Заключение. На основе предложенного закона управления рассмотрена задача оптимального управления движением активного космического аппарата на этапе буксировки космического мусора. Показано, что тяги существующих ионных двигателей достаточно для стабилизации положения активного КА относительно объекта увода. Результаты работы могут быть использованы при компоновке космического аппарата и проведению эксперимента по отработке технологии буксировки космического мусора с помощью ионного потока.

Список источников

- [1] Shan M., Guo J., Gill E. Review and comparison of active space debris capturing and removal methods. *Progress in Aerospace Sciences*, 2015, vol. 80, pp. 18–32. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2015.11.001>
- [2] Aslanov V., Yudintsev V. Motion control of space tug during debris removal by a coulomb force. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2018, vol. 41, pp. 1476–1484. <https://doi.org/10.2514/1.G003251>