

**Алгоритмы управления движением группы спутников с помощью аэродинамической силы сопротивления в условиях неточности знания плотности атмосферы**

*М.С. Кушнирук<sup>1</sup>, Д.С. Иванов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет),

<sup>2</sup>Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

Групповой полет – формация спутников, движущихся по орбите на небольшом удалении (от нескольких метров до нескольких километров) друг от друга и решающих единую задачу. Обычно для управления относительным движением используются реактивные двигатели, которым необходимо расходовать рабочее тело, что ограничивает срок активного существования группировки.

В настоящей работе исследуется способ управления относительным движением, основанный на использовании силы сопротивления в верхних слоях атмосферы. В работе [1] было проведено исследование ряда алгоритмов для формирования и поддержания требуемой относительной траектории двух спутников, с помощью аэродинамической силы сопротивления атмосферы с постоянной плотностью в течение всей траектории. Однако плотность воздуха сильно связана с условиями освещенности атмосферы солнечными лучами и с активностью Солнца, имеющей 11-летний период и т.д. Таким образом, ошибка управления может зависеть от неточности знания плотности атмосферы. В настоящей работе предлагаются модифицированные алгоритмы управления, адаптирующиеся к ошибкам модели плотности атмосферы.

Предполагается, что спутники имеют форму, близкую к плоской. За счет поворота относительно центра масс изменяется площадь сечения аппарата относительно набегающего потока, которая определяет величину аэродинамической силы, действующей на аппараты. Если спутники имеют различную ориентацию относительно набегающего потока, то их эффективные сечения отличаются, и возникает разница между действующими на два спутника силами. Таким образом, управляя взаимной ориентацией двух аппаратов, можно управлять относительным движением их центров масс. Относительное движение аппаратов в группе задается уравнениями Хилла-Клохесси-Уилшира [2].

Используется опорная система координат, ее начало (опорная точка  $O$ ) движется по круговой орбите радиуса  $r_0$  с угловой скоростью  $\omega = \sqrt{\mu/r_0^3}$ , где  $\mu$  – гравитационный параметр Земли. Ось направлена от центра Земли к опорной точке, ось  $Oy$  направлена по нормали к плоскости орбиты, ось  $Ox$  дополняет до правой  $Oz$  тройки.

Пусть  $\mathbf{r}_1 = (x_1, y_1, z_1)$ ,  $\mathbf{r}_2 = (x_2, y_2, z_2)$  – координаты первого и второго спутников в опорной системе координат. Тогда для вектора относительного положения спутников  $\mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$  имеем:

$$\ddot{\mathbf{r}} + 2\boldsymbol{\omega} \times \dot{\mathbf{r}} + 3\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} = \mathbf{f}$$

Где  $\mathbf{f}$  – результирующая удельная аэродинамическая сила сопротивления, действующая на единицу массы,  $\boldsymbol{\omega} = [0, 0, \omega]^T$ .

Рассматривается следующая модель аэродинамической силы, действующей на один из спутников

$$\mathbf{f}_i = -\frac{1}{m} \rho V^2 S \{ (1 - \varepsilon)(\mathbf{e}_v, \mathbf{n}_i) \mathbf{e}_v + 2\varepsilon(\mathbf{e}_v, \mathbf{n}_i)^2 \mathbf{n}_i + (1 - \varepsilon) \frac{\nu}{V} (\mathbf{e}_v, \mathbf{n}_i) \mathbf{n}_i \} \quad (1)$$

Здесь  $\rho$  – плотность атмосферы на расстояние  $r_0$  от центра Земли,  $m$  – масса спутника,  $V$  – скорость набегающего потока (предполагается одинаковой для двух спутников),  $S$  – площадь пластины,  $\mathbf{n}_i$  – единичный вектор внешней нормали к пластине,  $\mathbf{e}_v$  – единичный вектор, направленный по скорости набегающего потока,  $\varepsilon$  и  $\nu$  – коэффициенты взаимодействия молекул атмосферы с поверхностью спутника,  $i = 1, 2$ . Будем считать, что возможно изменять направление вектора  $\mathbf{n}_i$ .

В работе рассматривается следующая модель плотности атмосферы:

$$\rho = \rho_0 + \rho_1 \sin(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

где  $\rho_0$  – средняя плотность атмосферы в течение периода, а второй член  $\rho_1 \sin(\omega t + \varphi)$  отвечает за изменение плотности, связанные с суточными вариациями.

Настоящая работа посвящена построению обучающегося, адаптивного управления, которое в процессе функционирования улучшает знания об окружающей среде. Адаптивное управление должно определить параметры  $\rho_1$ ,  $\rho_0$  и  $\varphi$ .

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-01-31313, 13-01-00665.

### Литература

1. Кушнирук М.С., Иванов Д.С. Исследование алгоритмов управления движением группы спутников с помощью аэродинамической силы сопротивления // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. 2015. -№28. С 30
2. Hill G.W. Researches in Lunar Theory // American Journal of Mathematics. 1878. V. 1. P. 5–26