

А. В. АВЕРЬЯНОВ

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ДВИЖЕНИЯ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА, СВЯЗАННОГО С БАЗОВЫМ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ

Представлен аналитический метод расчета бокового относительного движения малого космического аппарата (МКА), связанного тросом с базовым космическим аппаратом. Натянутый трос с МКА на конце ориентирован перпендикулярно орбитальной плоскости движения центра масс связанных объектов. Относительное движение МКА исследуется в подвижной орбитальной системе координат. Рассматриваются перспективы применения МКА в околоземном пространстве.

Ключевые слова: космические тросовые системы, относительное движение малого космического аппарата, динамика космических связанных систем.

Применение малых космических аппаратов (МКА) на современном этапе развития ракетно-космической техники обусловлено относительно низкой стоимостью их вывода на орбиту, а также эффективностью использования в таких областях, как дистанционное зондирование Земли, телекоммуникация, исследования околоземного и межпланетного пространства.

Дальнейшим шагом в применении МКА может являться использование их в составе орбитальной системы, состоящей из базового КА и запускаемого с его борта мини- или микро-спутника (далее — МКА), соединенного с базовым КА гибкой связью (тросом). Применение такого МКА расширяет функциональные возможности бортовой служебной и измерительной аппаратуры как МКА, так и базового КА, что позволит в конечном итоге более эффективно решать целый ряд научных и народно-хозяйственных задач.

Перспективными способами применения МКА, присоединенного к базовому КА тросом, ориентированным перпендикулярно плоскости орбиты, являются:

- передача электроэнергии на объекты, удаленные от орбитальных энергетических установок;
- использование длинного троса в качестве антенны при радиоастрономических исследованиях, а также для связи на низких частотах с наземными потребителями;
- удаление приборов за пределы действия возмущающих факторов базового КА;
- захват космических объектов без маневрирования многоразовых транспортных КА;
- автономное решение навигационной задачи КА в течение всего времени его функционирования на околоземной орбите путем использования связанного с ним МКА в качестве навигационного зонда;
- использование значительной измерительной базы между КА и МКА, равной длине связывающего их троса (до десятков километров), для проведения высокоточных измерений положения космических объектов, а также ориентиров, находящихся на поверхности Земли.

Изучение динамики полета связанных космических объектов представляет собой сложную научно-техническую задачу. Вопросы компланарного полета связанных объектов при фиксированной и переменной длине троса достаточно подробно были исследованы в работах [1, 2]. Однако для некоторых способов практического применения, упомянутых выше, необходима ориентация троса в направлении, перпендикулярном орбитальной плоскости движения центра масс объектов. Требуемую ориентацию троса и удаление МКА от КА можно обеспечить путем изменения силы натяжения троса по определенному закону. Ниже представлены

результаты аналитического расчета, позволяющего при различных видах управляющего воздействия исследовать связанное движение МКА относительно базового КА.

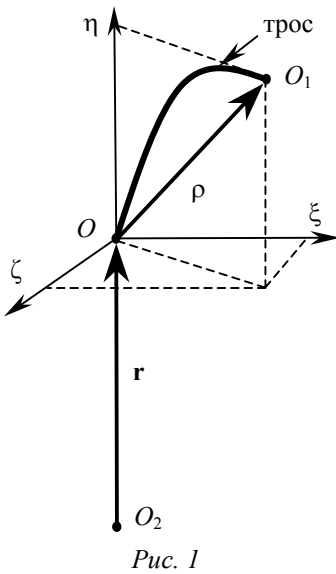


Рис. 1

Будем рассматривать относительное движение МКА (точка O_1) в подвижной орбитальной системе координат $O\xi\eta\zeta$ (рис. 1), начало которой (точка O) совпадает с центром масс КА (ведущего объекта). Ось $O\eta$ совпадает с радиусом-вектором \mathbf{r} КА, который направлен из притягивающего центра — центра масс Земли (точка O_2) — в центр масс КА, ось $O\xi$ направлена по трансверсали, ось $O\zeta$ дополняет систему координат до правой.

Сделаем следующие предположения:

- масса ведущего объекта (КА) значительно больше массы ведомого (МКА);
- КА движется по круговой орбите в центральном ньютоновском поле тяготения;
- положение МКА (точка O_1) в подвижной орбитальной системе координат $O\xi\eta\zeta$ определяется радиусом-вектором ρ ;
- длина троса, связывающего КА и МКА, $l = \text{const}$, массой троса можно пренебречь.

Боковое движение (вдоль оси $O\zeta$) ведомого объекта описывается уравнением вида [3]

$$\zeta = \zeta_0 \cos(\omega t) + \zeta'_0 \omega^{-1} \sin(\omega t) + \omega^{-1} \int_0^t W(\tau) \sin x[\omega(t-\tau)] d\tau, \quad (1)$$

где ω — угловая скорость движения КА по круговой орбите относительно центра Земли (точка O_2 на рис. 1); ζ_0, ζ'_0 — начальные условия (параметры) запуска МКА (штрих обозначает дифференцирование по времени t); τ — время, удовлетворяющее условию $0 \leq \tau \leq t$; $W(\tau)$ — управляющее ускорение, действующее по оси $O\zeta$.

В выражении (1) внеинтегральные члены определяют боковое относительное движение МКА, задаваемое начальными условиями его запуска с борта КА, интегральный член задает управляющее воздействие, реализуемое изменением силы натяжения троса.

Допустим, что запуск МКА осуществляется с борта КА строго вдоль оси $O\zeta$, начальные условия запуска: высота круговой орбиты КА 320 км, $\zeta_0 = 0, \zeta'_0 = 1$ м/с, угловое положение КА на круговой орбите характеризуется углом $\varphi = \omega t$, причем $\varphi(0) = 0$.

Рассмотрим некоторые результаты, полученные с помощью соотношения (1), при разных видах управляющего воздействия $W(\tau)$.

1. Управляющее воздействие отсутствует $W(\tau) = 0$. Этот случай имеет место при свободном движении МКА, трос ослаблен, т.е. расстояние ρ между МКА и КА меньше максимально возможной длины l троса ($\rho < l$).

Максимальное удаление МКА от базового КА составит $\zeta_{\max} = 867$ м при $\varphi = 90^\circ$ и при $\varphi = 270^\circ$.

2. Управляющее воздействие постоянное $W(\tau) = 0,01$ м/с². График изменения $\zeta = f(\varphi)$ для этого случая представлен на рис. 2 (кривая 1), $\zeta_{\max} = 15,03$ км при $\varphi = 180^\circ$.

3. Управляющее воздействие изменяется по синусоидальному закону

$$W(\tau) = 0,01 \sin(4\omega\tau) \text{ м/с}^2, \quad (2)$$

этому случаю соответствует кривая 2 на рис. 2, $\zeta_{\max} = 3,207$ км при $\varphi = 75^\circ$.

4. Сила натяжения троса изменяется по дискретному закону вида

$$W(\tau) = 0,01 \text{ м/с}^2 \text{ при } 0 \leq \varphi \leq 60^\circ, \\ W(\tau) = 0 \text{ при } 60^\circ < \varphi.$$

Этому случаю соответствует кривая 3 на рис. 2, $\zeta_{\max} = 8,266$ км при $\varphi = 120^\circ$.

5. Допустим, что управляющее воздействие на МКА изменяется по закону

$$W(\tau) = 0,01 \text{ м/с}^2 \text{ при } 0 \leq \varphi \leq 60^\circ, \\ W(\tau) = -0,01 \sin(4\omega\tau) \text{ м/с}^2 \text{ при } 60^\circ < \varphi.$$

Этому случаю соответствует кривая 4 на рис. 2, $\zeta_{\max} = 6,807 \text{ км}$ при $\varphi = 90^\circ$.

6. При изменении управляющего воздействия по закону

$$W(\tau) = 0,01 \sin(8\omega\tau) \text{ м/с}^2$$

получим кривую 5 на рис. 2.

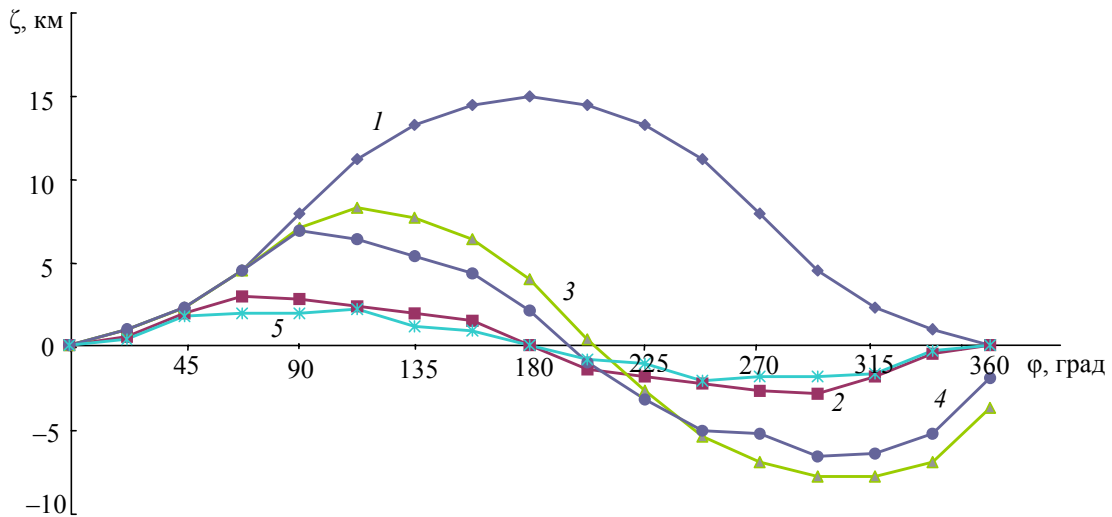


Рис. 2

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

Боковое движение МКА при натянутом тросе относительного базового КА при рассмотренных видах управляющих воздействий $W(\tau)$ носит ярко выраженный колебательный характер. Частота колебаний МКА в боковом направлении относительно орбитальной плоскости КА определяется законом изменения натяжения троса $W(\tau)$ и угловой скоростью ω движения КА по круговой орбите.

Относительное удаление связанных объектов друг от друга колеблется в широких пределах и может достигать порядка 15 км при скорости запуска МКА, равной 1 м/с (см. рис. 2).

Если при решении прикладных специальных задач, перечисленных выше, требуется относительно стабильное удаление МКА от КА, то целесообразно использовать управляющее воздействие, изменяющееся по синусоидальному закону (2). При этом в течение примерно четверти периода обращения КА боковое удаление МКА колеблется в диапазоне от 2 до 3,2 км.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А. В., Ситарский Ю. С. Динамика полета системы гибко связанных космических объектов. М.: Машиностроение, 1986. 248 с.
2. Белецкий В. В., Левин Е. М. Динамика космических тросовых систем. М.: Наука, 1990. 336 с.
3. Эльясберг П. Е. Введение в теорию полета искусственного спутника Земли. М.: Наука, 1965. 540 с.

Сведения об авторе

Алексей Васильевич Аверьянов

— канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра электронно-вычислительной техники, Санкт-Петербург; E-mail: Aver957@mail.ru

Рекомендована Ученым советом
ВКА им. А. Ф. Можайского

Поступила в редакцию
20.10.08 г.