

ДВИЖЕНИЕ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПО КРУГОВОЙ И ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ОРБИТАХ

Оразалина Құралай Құлмұханбетқызы

orazalinakuralay@gmail.com

Магистрант 1-го года обучения специальности «Космическая техника и технологии»

ЕНУ им. Л.Н.Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

Научный руководитель – Калманова Д.М

Впервые идея использования тросовых систем в космосе была высказана К. Э. Циолковским более ста лет назад в работе «Грёзы о Земле и небе и эффекты всемирного тяготения» (1895). Проведённые исследования показали перспективность применения тросовых систем для решения многих задач в космосе, в том числе и для задач сближения и встречи космических аппаратов (КА). Наиболее важным преимуществом тросовых систем является осуществление сближения и встречи КА при минимальных энергетических затратах по сравнению с традиционными методами сближения.

В настоящее время существуют методики решения задачи сближения с КА, движущимся по эллиптической орбите с заданными значениями радиусов апогея и перигея и по круговой орбите. Предполагается, что тросовая система состоит из орбитальной станции и привязного объекта, соединённых между собой тросом постоянной длины. Непосредственно сближение с космическим аппаратом производится привязанным объектом. Сближение осуществляется из режима колебаний и вращения тросовой системы вокруг центра масс. В этом случае наиболее полно используются возможности тросовой системы. Разработанные методики могут реализовать сближение ПО с КА в любой заданной точке орбиты КА.

Полученные аналитические зависимости для определения необходимых значений угловой скорости и амплитуды колебаний для обеспечения встречи в заданной точке орбиты КА, а также зависимости, определяющие относительную скорость в момент встречи и выигрыш в энергетике за счёт применения тросовой системы для решения задачи встречи.

1. Встреча с КА, движущемся по круговой орбите

Применение для встречи ПО и КА режима колебаний связки относительно вертикального положения равновесия и режима вращения вокруг центра масс позволяет при фиксированной длине троса осуществить сближение объектов при требуемом значении относительной скорости в момент встречи, в том числе реализовать «мягкую» встречу ПО и КА с нулевой относительной скоростью.

Решения задачи сближения характеризуются аналитическими зависимостями, определяющими необходимые значения угловой скорости и амплитуды колебаний для обеспечения встречи в заданной точке орбиты КА, а также определяющие относительную скорость в момент встречи и выигрыш в энергетике за счёт применения тросовой системы.

А) Случай $r_0 < r_A$

Связка совершает колебания с амплитудой $\Delta \varepsilon$ или вращения с угловой скоростью Ω_{op} . Предполагается, что встреча ПО и КА происходит в момент прохождения связкой вертикального положения. Поэтому требуемая длина троса определяется разностью радиусов орбит КА и БО связки

$$D = r_a - r_0 \quad (1.1)$$

Относительная скорость в момент встречи ПО и КА определяется разностью скоростей ПО и КА

$$V_{отн} = V_{ПО} - V_A \quad (1.2)$$

$$V_{\text{ПО}} = \omega_0[(r_0 + D) + D\Omega_{\text{оп}}] \quad (1.3)$$

$$V_A = \omega_A(r_0 + D) \quad (1.4)$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{\pi_0}{r_0^3}}$, $\omega_A = \sqrt{\frac{\pi_0}{(r_0 + D)^3}}$

Подставляем (1.3) и (1.4) в зависимость (1.2)

$$V_{\text{отн}} = \sqrt{\frac{\pi_0}{r_0}} \left\{ \left[\left(1 + \frac{D}{r_0}\right) + \frac{D}{r_0} \Omega_{\text{оп}} \right] - \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{D}{r_0}}} \right\} \quad (1.5)$$

При колебаниях связки с амплитудой $\Delta\varepsilon$ ее угловая скорость в момент прохождения вертикального положения определяется выражением:

$$\Omega_{\text{оп}} = \pm \sqrt{\frac{3}{2} (1 - \cos 2\Delta\varepsilon)} \quad (1.6)$$

Для решения многих практических задач необходимо осуществление встречи с КА при нулевом значении относительной скорости («мягкая» встреча). Определим условия реализации «мягкой» встречи ПО и КА. Приравнявая к нулю правую часть уравнения (1.5) запишем выражения для требуемого значения угловой скорости связки, гарантирующего встречу при $V_{\text{отн}} = 0$

Б) Случай $r_0 > r_A$

$$V_{\text{ПО}} = \omega_0[(r_0 - D) - D\Omega_{\text{оп}}] \quad (1.7)$$

$$V_A = \omega_A(r_0 - D) \quad (1.8)$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{\pi_0}{r_0^3}}$, $\omega_A = \sqrt{\frac{\pi_0}{(r_0 - D)^3}}$

Тогда получаем

$$V_{\text{отн}} = \sqrt{\frac{\pi_0}{r_0}} \left\{ \left[\left(1 + \frac{D}{r_0}\right) - \frac{D}{r_0} \Omega_{\text{оп}} \right] - \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{D}{r_0}}} \right\} \quad (1.9)$$

Угловая скорость для мягкой встречи

$$\Omega_{\text{оп}}^0 = \frac{r_0}{D} \left(1 - \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{D}{r_0}}} \right) \quad (1.10)$$

В случае сближения в фазе колебаний связки, когда $\Omega_{\text{оп}} < 0$, встреча ПО и КА осуществляется при относительных скоростях значительно меньших, чем при $\Omega_{\text{оп}}^0 > 0$. При этом с увеличением амплитуды колебаний $\Delta\varepsilon$ до значения $\Delta\varepsilon = 60^\circ$ величина $|V_{\text{отн}}|$ уменьшается практически до нулевого значения. В этом случае сближение с «мягким»

контактом реализуется при любой длине троса, а, следовательно, при значительной разности высот круговых орбит КА и БО.

Если сближение осуществляется в той фазе колебаний связки, когда $\Omega_{\text{оп}} > 0$, то с увеличением амплитуды колебаний связки величина $V_{\text{отн}}$ возрастает. Сближение ПО и КА целесообразно проводить в той фазе колебаний связки, когда $\Omega_{\text{оп}} < 0$ и при амплитуде колебаний близкой к 60° .

Перейдем к определению выигрыша в энергетике за счет использования тросовой системы для встречи объектов в космосе с нулевой относительной скоростью. Этот выигрыш будем оценивать суммой двух импульсов скорости

$$\Delta V_{\Sigma} = \Delta V_1 - \Delta V_2 \quad (1.11)$$

где ΔV_1 – импульс скорости, необходимый для перевода маневрирующего аппарата с круговой орбиты радиуса r_0 на эллиптическую траекторию встречи; ΔV_2 – импульс, требуемый для выравнивания скоростей в момент встречи объектов.

При $r_0 < r_A$

$$\Delta V_1 = \sqrt{\frac{\pi_0}{r_0}} \left(\sqrt{\frac{2r_a}{r_0+r_a}} - 1 \right), \quad \Delta V_2 = \sqrt{\frac{\pi_0}{r_0}} \left(1 - \sqrt{\frac{2r_a}{r_0+r_a}} \right) \quad (1.12)$$

При $r_0 > r_A$

$$\Delta V_1 = \sqrt{\frac{\pi_0}{r_0}} \left(1 - \sqrt{\frac{2r_a}{r_0+r_a}} \right), \quad \Delta V_2 = \sqrt{\frac{\pi_0}{r_0}} \left(\sqrt{\frac{2r_a}{r_0+r_a}} - 1 \right) \quad (1.13)$$

Видно, что при $r_0 < r_A$ требуемая амплитуда колебаний связки очень близка к 60° , а при $r_0 > r_A$ амплитуда колебаний немного более 60° . Чем меньше модуль разности радиусов $|r_A - r_0|$, тем более амплитуда колебаний приближается к 60° .

Импульсы скорости ΔV_1 , ΔV_2 , характеризующие выигрыш в энергетике практически равны между собой. Для рассмотренных вариантов необходимая длина троса находится в интервале от 19 до 71 км. Суммарный выигрыш в энергетике за счет использования тросовой системы для встречи ПО и КА возрастает соответственно от 10 до 40 м/с.

2. Встреча с КА, движущимся по эллиптической орбите

А) Случай расположения орбиты связки внутри орбиты КА

Считаем заданными: радиус орбиты БО связки r_0 , радиусы перигея $r_{A\pi}$ и апогея r_{Aa} орбиты КА. Точка встречи ПО и КА определяется на орбите КА углом истинной аномалии ϑ_B . На длину троса D накладывается ограничение. Она не может быть больше некоторого предельного значения $D_{\text{пр}} (D \leq D_{\text{пр}})$.

Возможны три варианта встречи ПО и КА на эллиптической орбите. Первый вариант характеризуется условием:

$$(r_{A\pi} - r_0) \leq D_{\text{пр}} \leq (r_{Aa} - r_0) \quad (2.1)$$

В этом случае встреча ПО и КА может быть реализована в любой точке орбиты КА (при любом ϑ_B).

Второй вариант определяется двумя условиями:

$$(r_{A\pi} - r_0) \leq D_{\text{пр}}, \quad (r_{Aa} - r_0) > D_{\text{пр}} \quad (2.2)$$

В данном случае встреча может быть реализована в двух диапазонах углов ϑ_B :

$$\vartheta_B \leq \vartheta_B^{\text{пп}}, \quad \vartheta_B \geq (2\pi - \vartheta_B^{\text{пп}}), \quad (2.3)$$

где $\vartheta_B^{\text{пп}}$ – предельное значение угла ϑ_B , определяемое выражением:

$$\cos \vartheta_B^{\text{пп}} = \frac{2r_{\text{Ап}}r_{\text{Аа}} - (r_0 + D_{\text{пр}})(r_{\text{Ап}} + r_{\text{Аа}})}{(r_0 + D_{\text{пр}})(r_{\text{Аа}} - r_{\text{Ап}})}. \quad (2.4)$$

Третий вариант характеризуется условием:

$$(r_{\text{Ап}} - r_0) > D_{\text{пр}}$$

В этом случае встреча ПО и КА невозможна.

Для первых двух случаев, когда встреча возможна, процесс сближения ПО и КА целесообразно реализовать таким образом, чтобы встреча происходила при минимальном значении относительной скорости.

Рассмотрим оценку выигрыша в энергетике за счет применения тросовой системы для «мягкой» встречи в перигее и апогее орбиты КА. Как было рассмотрено ранее выигрыш будет определяться суммарным импульсом ΔV_2 .

Для «мягкой» встречи в перигее орбиты КА:

$$\Delta V_1 = \sqrt{\frac{\pi_0}{r_0}} \left(\sqrt{\frac{2r_{\text{Ап}}}{r_0 + r_{\text{Ап}}}} - 1 \right), \quad \Delta V_2 = \sqrt{\frac{2\pi_0}{r_{\text{Ап}}}} \left(\sqrt{\frac{r_{\text{Аа}}}{r_{\text{Аа}} + r_{\text{Ап}}}} - \sqrt{\frac{r_0}{r_0 + r_{\text{Ап}}}} \right) \quad (2.5)$$

Для «мягкой» встречи в апогее орбиты КА:

$$\Delta V_1 = \sqrt{\frac{\pi_0}{r_0}} \left(\sqrt{\frac{2r_{\text{Аа}}}{r_0 + r_{\text{Аа}}}} - 1 \right), \quad \Delta V_2 = \sqrt{\frac{2\pi_0}{r_{\text{Аа}}}} \left(\sqrt{\frac{r_{\text{Ап}}}{r_{\text{Аа}} + r_{\text{Ап}}}} - \sqrt{\frac{r_0}{r_0 + r_{\text{Аа}}}} \right) \quad (2.6)$$

Выигрыш в энергетике для двух рассматриваемых вариантов, практически оказывается одинаковым, но встреча в апогее реализуется при значительно меньшей длине троса.

Заключение

В будущем как в экспериментах, так и при эксплуатации штатных систем можно будет проводить различные научные исследования с использованием возможностей, создаваемых развернутыми тросовыми системами. Большой интерес представляет изучение проблемы самочувствия и работоспособности экипажа орбитальной станции, а также поведения животных, роста растений, свойств твердых тел и жидкостей в условиях микрогравитации. Другой важный аспект — процесс естественного удаления собственной внешней атмосферы станции при развертывании тросовой системы. Это позволит получить особо чистый вакуум для выполнения некоторых исследований в области космической технологии. В полете тросовых систем можно измерять геофизические поля при помощи разнесенных датчиков, изучать свойства ионосферы, воздействуя на нее электромагнитным излучением тросовой антенны, выполнять и другие интересные исследования.

При успешном развитии работ по космическим тросовым системам, вероятно, в середине XXI в. может быть создана долговременная пилотируемая орбитальная станция нового поколения. Согласно предварительным проработкам, такая станция должна представлять собой сложную тросовую систему, состоящую из двух многоблочных станций, соединенных несколькими тросами, лифта (движущегося по тросам между станциями) и отводимых на тросах привязных модулей.

Список использованных источников

1. Авдеев Ю.Ф., Беляков А.И., Брыков А.В., Горьков В.Л., Григорьев М.М., Журин Б.Л., Иванов В.А., Титов Г.С., Ягудин В.М. Полет космических аппаратов. 1990 г.
2. Балахонцев В.Г., Иванов В.А., Шабанов В.И. Сближение в космосе:-М:Воениздат, 1973, 367 с.
3. Циолковский, К. Э. Грезы о Земле и небе и эффекты всемирного тяготения / Циолковский, К. Э. Издательство «Луч», 1894, 368 с.
4. Иванов, В. А. Сближение в космосе с использованием тросовых систем / В. А. Иванов, С. А. Купреев, М. Р. Либерзон // Издание: Хоружевский. 2010. 360 с.
5. Андреев А. В., Хлебникова Н.Н. Космические системы с гибкими связями. // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Т. 12, 1991, 195 с.
6. Асланов В.С., Ледков Н.Н., Стратилатов Н.Р. Пространственное движение космической тросовой системы, предназначенной для доставки груза на Землю. // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». №2, 2007, с. 28-32.