

УДК.629.76

## **СОВМЕСТНЫЙ ПОЛЕТ ОБЪЕКТА И КА, ДВИЖУЩЕГОСЯ ПО КРУГОВОЙ ОРБИТЕ**

**Сайбан Саягүл Саянқызы**

[saibansayagul@mail.ru](mailto:saibansayagul@mail.ru)

Студент 2-го курса кафедры Космическая техника и технологии,  
ЕНУ им. Л. Н. Гумилева, Нур - Султан, Казахстан.

Научный руководитель – Жумабаева А.С.

### **Введение**

Осуществление операции встречи КА на орбите обычно связано с необходимостью управления относительным движением аппаратов, в результате которого создаются условия, требуемые для их совместного полета. Причем под совместным полетом будем понимать, как движение при наличии между несколькими КА физического контакта (полет «в связке» или в состыкованном состоянии), так и движение на некотором расстоянии друг от друга (совместный групповой полет). Примером первого вида совместного полета служит полет ОК «Мир», связок орбитальной станции (ОС) «Салют», космического корабля (КК) «Союз» и транспортного корабля (ТК) типа «Прогресс», второго - групповой полет КК «Союз-6», «Союз-7» и «Союз-8». Хотя в общем случае может иметь место управление всеми аппаратами, участвующими в выполнении совместного полета, обычно все же задачу встречи на орбите трактуют как осуществление операции сближения, маневрирующего активного КА — транспортного корабля с неманеврирующей, совершающей свободный полет орбитальной станцией. Осуществление встречи можно проводить либо по схеме сближения непосредственно с участка выведения активного КА на орбиту (прямое выведение), либо по схеме сближения с промежуточной орбиты (орбиты ожидания)

При прямом выведении время запуска и траекторию ракеты-носителя выбирают такими, чтобы непосредственно в конце участка выведения были обеспечены требуемые начальные условия сближения КА. Траектория выведения при этом может или располагаться в плоскости орбиты пассивного аппарата (компланарное выведение), или в общем случае не

совпадать с этой плоскостью (некомпланарное выведение). Схема прямого выведения накладывает достаточно жесткие ограничения на значения углов некомпланарности (углов между плоскостями орбиты пассивного и траектории активного КА) и на время запуска, определяемое вхождением пассивного КА в район стартовой позиции ракеты-носителя. Поэтому при решении задачи встречи космических объектов предпочтение отдают схеме сближения с использованием промежуточной орбиты. Реализация данной схемы предполагает предварительное выведение активного КА на орбиту ожидания. Разница в периодах обращения аппаратов позволяет выбрать момент начала сближения при наиболее выгодном их взаимном положении. Время, необходимое для достижения этого положения, являющееся функцией времени старта, называют временем фазирования.

### **Ближнее наведение привязанного объекта на КА, движущийся по круговой орбите.**

При управлении сближением КА предъявляются весьма высокие требования к точности реализации траектории сближения. А эта точность в значительной степени зависит от точности измерения параметров движения сближающихся объектов. В следствии этого рассматриваемые в настоящее время схемы управления сближением, особенно сближением с непосредственным контактом, предусматривают использование бортовых систем, следящих за целью (КА, с которым решается задача встречи) и выдающих информацию о параметрах относительного движения. Дальность действия таких систем, учитывая ограничение по весу, около 100 км.

В данной работе дальнейшее наведение предполагается осуществлять с использованием тросовой системы (ТС). Задачу сближения с КА решает привязной объект (ПО), который после расцепления связки переходит на траекторию встречи по эллипсу Хомана, который для широкого класса орбит КА является оптимальным по энергетике. После сближения ПО и КА до определенной дальности начинается этап ближнего наведения, на котором парируются погрешности развертывания ТС, неточности в определении момента расцепления связки, а также ошибки определения параметров движения ТС и КА, с которым решается задача сближения.

Если сближение КА должно завершиться мягкой встречей и стыковкой, то после этапа ближнего наведения (точнее, в конце его) следует участок причаливания, завершающийся встречей при близких к нулю значениях относительных скоростей двух объектов и механической стыковкой КА. В этом случае задачей ближнего наведения является сближение КА до расстояний порядка сотен метров с относительной скоростью до 3 м/с.

Управление сближением КА на этапе ближнего наведения может осуществляться либо с помощью методов, основанных на использовании законов орбитального движения, либо с помощью методов, при которых законы орбитального движения не учитываются.

Основным достоинством методов ближнего наведения, не использующих законы орбитального движения, является возможность простой приборной реализации, так как они имеют меньшую чувствительность к ошибкам измерений и другим возмущениям [8]. Для реализации сближения с использованием ТС это достоинство приобретает особое значение, так как характеристики траектории движения, НО после расцепления связки будут известны со значительными ошибками. Неизбежны также погрешности в определении требуемого углового рассогласования положений ТС и КА в момент расцепления связки, что приведет к отличию параметров относительного движения ПО и КА от расчетных. Все это свидетельствует о целесообразности применения на участке ближнего наведения ПО методов управления второй группы. Тем более, что при использовании импульсных схем управления потребовалось бы иметь на борту ПО двигательные установки большой тяги, что значительно усложнило бы и утяжелило бы конструкцию ПО.

В работе рассматриваются два типа моделей наведения ПО на КА по методу постоянной угловой скорости линии визирования [1, 2]. Эти модели записываются с

использованием визирной и орбитальной систем координат. На рис. 1 представлено взаимное расположение орбитальной системы координат  $Axyz$  и визирной системы координат  $A\xi\eta\xi$  в случае компланарного наведения ПО (точка  $P$ ) на КА (точка  $A$ ). Обе эти системы координат являются подвижными, начало их совпадает с ЦМ КА.

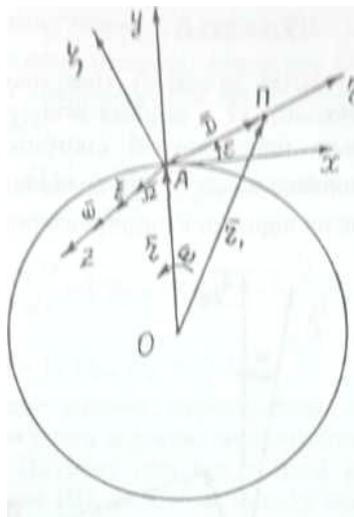


Рисунок 1. Взаимное расположение орбитальной системы

Первый тип математических моделей ближнего наведения ПО записывается при допущении о том, что в уравнениях относительного движения сближающихся объектов не учитывается действие относительного гравитационного ускорения, т.е. движение ПО и КА как бы происходит в положении ПО и КА как бы происходит в однородном гравитационном поле. В этом случае можно воспользоваться следующими уравнениями управляемого относительного движения и визирной системе координат.

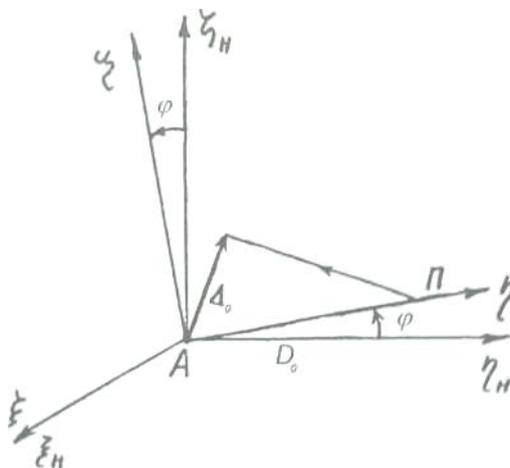


Рисунок 2. Визирная система координат

Для метода постоянной угловой скорости линии визирования ( $\Omega=const$ ) в уравнениях (1) следует принять  $\Omega = 0, P_D = 0$ . Тогда математическая модель ближнего наведения ПО на КА приобретает следующий вид:

$$\ddot{D} = \Omega^2 D = 0, 2\Omega \dot{D} = p_n.$$

Для получения наиболее общих и компактных результатов запишем рассматриваемую математическую модель в безразмерных величинах. При этом начальные условия ближнего

наведения:  $D_0$ ,  $\dot{D}_0$ ,  $Q_0$  могут быть представлены в виде одного параметра  $D$ , определяющего отношение начальной дальности  $D_0$  к начальному пролету  $D_0$  (Рис. 2). Тогда математическая модель динамики ближнего наведения ПО на КА по методу постоянной угловой скорости может быть записана в виде следующей системы:

$$\frac{d\tilde{D}}{dt} = \frac{\text{Sign}\dot{D}_0}{\sqrt{D_{\Delta_0}^2 - 1}} \tilde{D} \Omega,$$

$$\frac{d\tilde{D}}{dt} = (\text{Sign}\dot{D}_0) \sqrt{D_{\Delta_0}^2 - 1} \cdot \tilde{D} \Omega,$$

где  $\tilde{D} = D/D_0$ ,  $\tilde{D} = \dot{D}/\dot{D}_0$ ,  $D_{\Delta_0} = D_0/\Delta_0$ .

Математические модели, определяемые системами (2) и (3) записаны без учета действия относительного гравитационного ускорения. Поэтому они могут быть использованы для изучения наведения ПО на КА по методу постоянной угловой скорости линии визирования при определенных ограничениях на дальность между сближающимися объектами и продолжительность процесса сближения. Несомненным достоинством математической модели (3) является то, что использование ее позволяет получить полное аналитическое решение задачи ближнего наведения ПО при  $Q = \text{const}$ .

Прежде чем перейти к изучению ближнего наведения ПО на КА по методу постоянной угловой скорости линии визирования с использованием рассмотренных математических моделей необходимо разработать методику определения начальных условий для решения соответствующих уравнений относительного движения по результатам расчетов абсолютного движения после расщепления тросовой системы.

Изучение ближнего наведения ПО для встречи с КА, движущимся по известной орбите, или для пролета мимо него на заданном расстоянии предполагается проводить с использованием аналитических, численных и качественных методов. Характер процесса сближения и условия встречи объектов в значительной степени зависят от параметров относительного движения сближающихся объектов в момент начала ближнего наведения. Эти начальные условия в свою очередь зависят от параметров абсолютного движения ПО после расщепления тросовой системы и от выбранной точки перехода ПО на этап ближнего наведения с использованием бортовых измерительных средств.

Для разработки методики определения начальных условий ближнего наведения ПО необходимо иметь четкое представление о характере взаимного движения ПО по его эллиптической траектории и КА по орбите. Это взаимное движение будем определять угловым движением радиус - векторов, проведенных из центра Земли в центр масс ПО и в центр масс КА. Данное угловое движение будет зависеть от параметров орбиты КА и эллипса, по которому происходит движение ПО в расчетную точку встречи, а также от их взаимного расположения.

На рис.3 представлена «внешняя» схема сближения ПО с КА, движущимся по круговой орбите радиуса  $r_A$ , когда  $r_0 + D < r_A$  ( $D$  - длина троса в момент расщепления ТС).

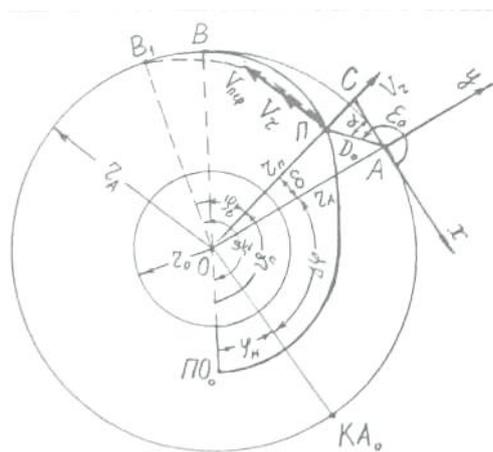


Рисунок 3. «Внешняя» схема сближения ПО с КА

Участок переходного эллипса  $PO_0 - P$  представляет собой траекторию дальнего наведения, а участок  $PB_1$  – траекторию ближнего наведения.

Для изучения ближнего наведения ПО на КА с использованием математической модели (3) потребуется знать начальное значение относительной скорости ПО в инерциальной системе координат  $V_{отн}$  и значение безразмерного параметра  $D_{\Delta}$ , определяющего характер процесса наведения ПО при постоянной угловой скорости линии визирования. Величина  $V_{отн}$  определяется по значениям  $D_0, \dot{D}_0, \Omega_0$ .

$$V_{отн} = \sqrt{\dot{D}_0^2 + (D_0 \Omega_0)^2}.$$

Конечная формула

$$D_{\Delta 0} = \sqrt{1 + \left( \frac{\dot{D}_0}{D_0 \Omega_0} \right)^2}.$$

### Заключение

В данной работе мы узнали как осуществляется ближнее наведение привязанного объекта на КА, движущийся по круговой орбите. Проведено математическое моделирование и исследование динамической системы абсолютного движения КА при постоянном радиальном управляющем ускорении. Показано, что данная система является консервативной. Пространством параметров системы является плоскость безразмерных параметров  $\alpha\gamma, \Upsilon_0$ . Две бифуркационные кривые разделяют плоскость параметров на три области с различной качественной структурой фазовых траекторий. Выполнено математическое моделирование и исследование динамической системы управляемого относительного движения КА при постоянной угловой скорости линии визирования. В качестве частных случаев этого метода управления можно рассматривать различные модификации широко известного метода параллельного сближения. Точность построенных решений, а также возможность значительного сокращения машинного времени решения задач на ЭВМ позволяет сделать вывод о перспективности использования разработанного метода на этапе проектирования и создания новых типов КА.

### 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.