

УДК 629.76

КАЧЕСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ФАЗОВЫХ ТРАЕКТОРИЙ СИСТЕМЫ БЛИЖНЕГО НАВЕДЕНИЯ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Сандибекова Гулим Сандибековна

sandibekova1999@gmail.com

Студент 4 курса специальности «Космическая техника и технологии»

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

Научный руководитель – Касымов У.Т.

Введение

В течение последних десятилетий в Казахстане, как и в других странах, было выполнено значительное количество работ, посвященных рассмотрению возможностей орбитальных тросовых систем и определению рациональных областей и способов их применения. Интенсивность исследований в последние годы возросла. Это объясняется появившимися техническими предпосылками практической реализации проектов по использованию тросовых систем в космосе.

Орбитальные тросовые системы характеризуются следующими основными отличительными особенностями:

Во-первых - это большая протяженность тросовых систем, обеспечивающая выполнение многих научных и практических задач.

Во-вторых - возможность гибко изменяемой конфигурации (изменение длины троса, ориентации и угловой скорости вращения тросовой системы).

И в третьих - активное взаимодействие электропроводного троса с внешней средой (в первую очередь, с магнитным полем и ионосферой Земли).

Благодаря этим особенностям многие из решаемых в космосе задач могут решаться более просто и более экономично при использовании тросовых систем.

Актуальность

С использованием космических тросовых систем возможно решение целого ряда актуальных задач: создание искусственной силы тяжести, вывод космического аппарата на орбиту, выполнение межорбитальных и локальных маневров (например, маневров сближения и встречи в космосе), спуск объектов с орбиты на Землю, осуществление транспортных операций в космосе, проведение геофизических исследований, зондирование верхних слоев атмосферы, испытание и отработка новых типов летательных аппаратов, получение электроэнергии в космосе, обеспечение глобальной радиосвязи и др.

Применение

Применение космических тросовых систем в ряде случаев приводит к существенному снижению энергетических затрат, к использованию конструктивно более простых и менее массивных технических средств. Для ряда задач тросовая система вообще является единственным средством их выполнения. Получение электроэнергии в космосе достигается за счёт пересечения токопроводящим тросом магнитного поля Земли с большой скоростью. Также стоит отметить, что к числу реальных прикладных задач можно отнести использование тросовых систем для создания космической радиосвязи.

Качественная структура фазовых траекторий системы ближнего наведения

Наведение ПО на КА по методу постоянной угловой скорости линии визирования предполагает, что величина угловой скорости Ω известна. Выбор величины Ω определяется требуемым характером продольного относительного движения и ограничениями на условия встречи рассматриваемых объектов.

Уравнение продольного относительного движения может быть представлено в виде двух дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\frac{d\dot{D}}{dt} = \omega^2 D, \quad \frac{dD}{dt} = \dot{D}. \quad (1)$$

Система (1) представляет собой автономную динамическую систему второго порядка. Исключая время получим одно уравнение первого порядка, связывающее переменные D и \dot{D} :

$$\frac{d\dot{D}}{dt} = \Omega^2 \frac{D}{\dot{D}}. \quad (2)$$

Уравнение (2) имеет решение

$$D^2 - \omega^2 D^2 = C, \quad (3)$$

где $C = \dot{D}_0^2 - \Omega^2 D_0^2$. Выражение (3) представляет собой уравнение фазовых траекторий системы (1). Фазовыми координатами являются относительная дальность D и скорость изменения относительной дальности \dot{D} (рис). Изоклиной горизонтальных наклонов фазовых траекторий является ось ординат, а изоклиной вертикальных наклонов - ось абсцисс.

Для анализа рассматриваемой системы составим функцию

$$H = -\frac{1}{2}(\dot{D}^2 - \Omega^2 D^2). \quad (4)$$

Продифференцируем H по D и \dot{D} :

$$\frac{\partial H}{\partial D} = \omega^2 D, \quad \frac{\partial H}{\partial \dot{D}} = -\dot{D}. \quad (5)$$

Сравнивая уравнения (1) и зависимости (5) можно записать

$$\frac{\partial \dot{D}}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial D}, \quad \frac{\partial D}{\partial t} = -\frac{\partial H}{\partial \dot{D}}. \quad (6)$$

Наличие аналитического интеграла (3) и выполнение равенств (6) свидетельствует о том, что система (1) является консервативной.

Система (1) имеет одно состояние равновесия, определяемое значениями $D = 0$ и $\dot{D} = 0$. Применительно к рассматриваемой консервативной системе уравнение (3) характеризует закон сохранения энергии. Выражения \dot{D}^2 и $-\Omega^2 D^2$ представляют собой соответственно удвоенные значения кинетической и потенциальной энергии. При $D = 0$ величина потенциальной энергии является максимальной. Поэтому состояние равновесия O при $D = 0$, $\dot{D} = 0$ представляет собой седловую точку (рис). Для этой особой точки константа $C = 0$. Не особые фазовые траектории системы (1) определяют семейства равносторонних гипербол, отнесенных к главным осям D и \dot{D} (рис). При $C = 0$, когда $\dot{D}_0^2 = \Omega^2 D_0^2$, имеют место две асимптоты этого семейства:

$$D = \pm \Omega D, \quad (7)$$

проходящие через начало координат, которое является единственной особой точкой рассматриваемого семейства интегральных кривых. Остальные интегральные кривые являются гиперболами и не проходят через начало координат (рис). Как уже было установлено, особая точка рассматриваемых интегральных кривых представляет собой состояние равновесия типа седла.

Известно, что седловая точка является неустойчивым состоянием равновесия. Следовательно, при движении объекта с постоянной угловой скоростью линии визирования положение $D = 0$, $\dot{D} = 0$ является неустойчивым. Вместе с тем это не является серьезным препятствием для применения этого метода при осуществлении сближения объектов с мягкой встречей, так как на практике не требуется абсолютно точного выполнения условий $D = 0$, $\dot{D} = 0$, а необходимо, чтобы в конце сближения эти величины не превосходили некоторых допустимых значений.

Перейдем к более подробному рассмотрению фазовых траекторий относительного движения объектов при постоянной угловой скорости линии визирования. Относительная дальность между объектами D представляет собой величину существенно положительную как для траектории сближения, так и для траектории удаления. Поэтому, рассматривая качественную структуру фазовых траекторий на рис., следует иметь в виду, что реальный физический смысл имеют только фазовые траектории первого и четвертого квадрантов, г.е. при $D \geq 0$. Траектории или части траекторий первого квадранта ($D > 0, \dot{D} > 0$) соответствуют траекториям удаления, а траектории четвертого квадранта ($D > 0, \dot{D} < 0$) - траекториям сближения. В том и другом квадрантах асимптоты $\dot{D} = \pm \Omega D$, соответствующие интегральным кривым при $C = 0$, разделяют все фазовые траектории на две группы. Первая группа фазовых траекторий соответствует отрицательным значениям константы C . Эти траектории находятся между асимптотами $\dot{D} = \pm \Omega D$ и пересекаются абсцисс. При $\dot{D}_0 < 0$ изображающая точка начинает движение в четвертом квадранте, где D и $|\dot{D}|$ уменьшаются. При минимальном значении D фазовые траектории пересекают ось абсцисс, знак \dot{D} становится положительным и в первом квадранте D и \dot{D} возрастают. Указанные фазовые траектории соответствуют случаям сближения объектов, пролету на минимальном расстоянии $D_{\text{п}}$ и последующему удалению. При $\dot{D}_0 > 0$ происходит сразу удаление. Начальная точка в этом случае находится в первом квадранте.

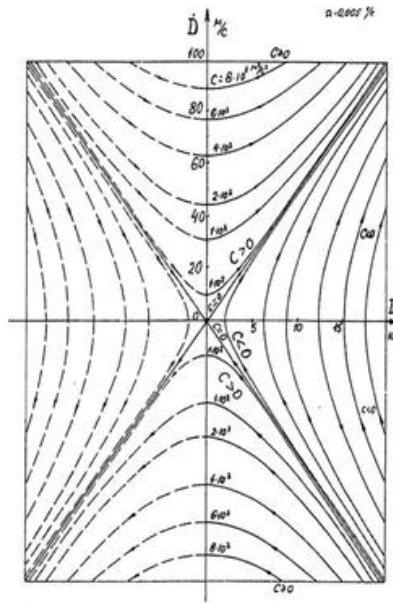


Рисунок 1.

Вторая группа фазовых траекторий соответствует положительным значениям константы C . Фазовые траектории этой группы находятся между асимптотами $\dot{D} = \pm \Omega D$ и осью ординат.

При $\dot{D}_0 < 0$ движение изображающей точки заканчивается при $D = 0$ и минимальном значении $|\dot{D}|$. Если мы будем считать, что после встречи продолжится движение при $\Omega = const$, то на фазовой плоскости нам необходимо перейти к начальной точке траектории удаления, расположенной симметрично на положительном направлении оси ординат. Далее движение изображающей точки происходит уже в первом квадранте при увеличении координат D и \dot{D} . Для $\dot{D}_0 < 0$ фазовые траектории соответствуют траекториям сближения, заканчивающимся встречей с целью. При этом, чем ближе фазовая траектория к асимптоте $\dot{D} = \pm \Omega D$, тем при меньшем значении скорости сближения происходит встреча объектов. Для $\dot{D}_0 > 0$ происходит удаление от цели с увеличением \dot{D} .

Движение при $\Omega = const$, соответствующее фазовым траекториям первой и второй групп, а также и асимптотам $\dot{D} = \pm \Omega D$, носит аperiodический характер.

Наибольший интерес представляет движение по асимптоте $\dot{D} = -\Omega D$ когда точка приближается к состоянию равновесия. Изображающая точка будет приближаться к началу координат со стремящейся к нулю скоростью и, следовательно, не достигнет начала координат в конечный промежуток времени. Движение по этой траектории является асимптотическим к состоянию равновесия. Такие движения называют лимитационными движениями. Движение по асимптоте не может быть точно реализовано, так как оно соответствует одной линии начальных состояний. Совокупность начальных состояний в этом случае не образует конечной области начальных состояний и не может быть совершенно точно задано в системе. Однако, рассматривая определенную ограниченную область начальных состояний в районе асимптоты $\dot{D} = -\Omega D$, можно реализовать относительное движение, соответствующее фазовым траекториям, расположенным достаточно близко к асимптоте. Тогда возможна либо встреча при весьма малых относительных скоростях, либо пролет на небольшом расстоянии от цели с малой относительной скоростью. Результаты проведенного моделирования подтверждают возможность использования метода постоянной угловой скорости линии визирования для мягкой встречи объектов.

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. Примеры и задачи. 2-изд. - М: Машиностроение, 1990, 272 с.
2. Андреев А.В., Хлебникова Н.Н. Космические системы с гибкими связями. //Итоги науки и техники. ВИНТИ. Т. 12, 1991, 195 с.
3. Андреев А.В. Об одном типе космических транспортных систем. // Труды XII Чтений, посвященных К.Э. Циолковскому. - М., 1978, с. 82-87.
4. Андронов А.А., Леонтович Е.А., Гордон И.И., Майер А.Г. Качественная теория динамических систем второго порядка. - М.: Наука, 1960, 568 с.
5. Андронов А.А., Леонтович Е.А., Гордон И.И., Майер А.Г. Теория бифуркаций динамических систем на плоскости. - М.: Наука, 1967, 488 с.