УДК 629.78

Комбинированное управление барражированием космического аппарата на заданной дальности

Combined control of spacecraft barrage at a given range

Гончаревский /Goncharevsky V.
Вилен Степанович
(vilenstepan@yandex.ru)
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки и техники РФ,
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского» МО РФ,
почетный профессор,
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: групповой полет – group flight; барражирование – barrage; относительное движение – relative motion; программа управления – control program.

В статье рассматривается метод выполнения барражирования космических аппаратов на заданной дальности, в котором для управления поперечным относительным движением активного аппарата используется дискретный, а для корректирования продольного движения – непрерывный вид управляющих воздействий. Получены программы управления вдоль и по нормали к линии визирования, а также соотношения для расчета энергетических затрат на осуществление маневра. Определены зависимости величины зоны и углового сектора барражирования от времени выполнения маневра.

The article discusses a method for performing spacecraft barrage at a given range, in which a discrete type of control actions is used to control the transverse relative motion of the active vehicle, and a continuous type of control actions is used to correct the longitudinal motion. Control programs are obtained along and along the normal to the line of sight, as well as ratios for calculating the energy costs of the maneuver. The dependences of the size of the zone and the angular sector of the barrage on the time of the maneuver are determined.

Введение

Барражирование одного космического аппарата (КА) относительно другого является одной из разновидностей группового полета (ГП) [1–21]. Под ГП, который является одним из видов взаимного маневра (ВМ), понимается такое управляемое относительное движение (ОД) двух или более КА, в процессе которого относительное расстояние между ними либо не изменяется, либо изменяется по определенному закону в некоторых достаточно ограниченных пределах, и, кроме того, это расстояние остается значительно меньшим их расстояний до центра планеты. Отсюда следует, что основная цель управления ГП состоит в том, чтобы в процессе его осуществления вектор $\vec{q}(\tau)$ относительного состояния центров масс КА либо сохранял свое заданное начальное значение $\vec{q}=\vec{q}_0$, либо изменялся вполне определенным образом в пределах $\vec{q}_{\min} \le q \le \vec{q}_{\max}$. Вектор $\vec{q}(\tau)=\begin{vmatrix}\vec{R}(\tau)\\ \vec{V}(\tau)\end{vmatrix}$, определяемый тремя компонентами вектора относительного положения $\vec{R}(\tau)$ и тремя компонентами вектора относительной скорости $\vec{V}(\tau)$, полностью описывает в любой момент времени τ относительное положение и относительные скорости КА, участвующих в ГП. Будем полагать, что в его процессе аппарат, относительного которого нужно осуществить барражирование, не изменяет траекторию центра масс, а управляемыми являются другие аппараты, участвующие в данной операции. Поэтому в дальнейшем первый из них называется пассивным аппаратом (ПА), а остальные – активными аппаратами (АА).

Отличительной чертой барражирования как разновидности ГП является то, что здесь АА в процессе его выполнения совершает многократное перемещение в пределах некоторой зоны фазового пространства относительных координат с заданными линейными или угловыми размерами, т. е.

$$R_{\min} < R < R_{\max},\ \alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max},\ \beta_{\min} < \beta < \beta_{\max},$$

где α и β – угловые компоненты вектора $\vec{R}$. Перемещение происходит между заданными точками этой зоны, т. е. должно выполнятся условие $\vec{q}_0 = \vec{q}_{oз}$, $\vec{q}_k = \vec{q}_{kз}$, в течение всего периода времени $T=\tau_к-\tau_о$, где $\tau_о$ и $\tau_к$ – моменты начала и окончания ГП. Если эти перемещения производятся между двумя заданными точками фазового пространства состояний, то $\vec{q}(\tau_0)=\vec{q}_{0з}$, $\vec{q}(\tau_k)=\vec{q}_{kз}$, если же около одной опорной точки, то $\vec{q}_0=\vec{q}_k$. В зависимости от того, каким образом происходит это перемещение, различают барражирование при отсутствии ограничений на вид траектории и барражирование, когда такие ограничения имеются. Ограничения на вид траектории вводятся в тех случаях, когда требуется барражирование на заданной дальности или барражирование вдоль заданного направления. Необходимость в различных видах барражирования может возникнуть при решении задач опознавания космических объектов, осуществления стыковки с орбитальными станциями, оборудованными несколькими стыковочными узлами, спасения экипажей пилотируемых КА в аварийных ситуациях и т. д.

Введение рассмотренных ограничений превращает траекторию ОД в вынужденную, а следовательно, требует для ее реализации применения непрерывных во времени управляющих воздействий и использования методов управления относительно ЛВ. Все это увеличивает энергетические затраты (ЭЗ) на выполнение маневра по сравнению с методами свободных траекторий (МСТ), где такие ограничения отсутствуют. Однако заметим, что ограничения на вид траектории ОД, вводимые в методах управления относительно ЛВ, представляют собой фактически ограничения лишь на одну из двух его составляющих, то есть на продольное (вдоль ЛВ) или на поперечное (по нормали к ЛВ) движение. Поэтому здесь принципиально вынужденным в процессе взаимного маневра (ВМ) является только одно из этих движений, второе может быть свободным. При выполнении маневра барражирования на заданной дальности с использованием методов управления относительно ЛВ ограничения накладываются лишь на траекторию продольного движения, и следовательно, только этот вид движения является принципиально вынужденным. Поперечное движение может быть свободным. В связи с этим в данном случае целесообразно применить схему одно- или двухимпульсного МСТ для управления поперечным движением по нормали к ЛВ. Метод управления в таком случае будет представлять в определенном смысле некоторую комбинацию МСТ и методов управления относительно ЛВ, что позволит уменьшить ЭЗ на выполнение маневра.

Для исследования барражирования целесообразно использовать линейную модель относительного движения КА. Этой модели соответствует система дифференциальных уравнений, которая в векторно-матричной форме может быть записана в виде [5–12]:

$$d\vec{R}/d\tau=\vec{V},\ d\vec{V}/d\tau=A\vec{R}+B\vec{V}+\vec{U}, \tag{1}$$

где $\vec{U}=\vec{P}/m$ – управляющее ускорение, $\vec{P}$ – управляющее воздействие, m – масса АА, $A=[a_{ij}]_{3x3}$, $B=[b_{ij}]_{3x3}$ – квадратные матрицы третьего порядка, вид которых определяется типом орбиты ПА.

Для осуществления барражирования на заданной дальности R_0 могут быть использованы методы управления по нормали к линии визирования (ЛВ). Эти методы относятся к методам, в которых на вид программной траектории накладываются определенные ограничения. При управлении по нормали к ЛВ эти ограничения заключаются в том, что программная траектория должна лежать в плоскости, удаленной от ПА на расстояние $R_0=x_0$ и перпендикулярной ЛВ. В визирной относительной системе координат (ОСК) xyz, связанной с плоскостью наведения (плоскостью, в которой происходит ОД), такие ограничения принимают вид

$$\dot{x}=\ddot{x}=0,\ x=x_0. \tag{2}$$

Подставив условия (2) в соотношения (1), получим систему уравнений, описывающих движение в рассматриваемом случае:

$$\begin{gathered}\ddot{y}-a_{22}\,y-a_{21}\,x_0=u_y,\\ -a_{12}\,y-b_{12}\,\dot{y}-a_{11}\,x_0=u_x,\\ -a_{32}\,y-b_{32}\,\dot{y}-a_{31}\,x_0=u_z.\end{gathered} \tag{3}$$

В системе (3) второе и третье уравнения не являются дифференциальными, и следовательно, управляющие функции u_x и u_y могут быть однозначно определены, как только будет найден закон изменения координаты y, то есть программный закон движения АА по нормали к ЛВ, лежащей в плоскости наведения. При использовании комбинированных методов управление этим движением осуществляется с помощью дискретных управляющих воздействий. Тогда, если предположить, что в некоторый момент времени $\tau=\tau_0$ АА находится на нормали к ЛВ, лежащей в плоскости наведения, в точке с координатой y_0 и скоростью $\dot{y}_0$, то при помощи управляющего импульса, если считать его мгновенным, можно в данный момент изменить скорость $\dot{y}$, оставив прежним значение координаты y. Свободное движение АА по нормали к ЛВ под действием сил тяготения после выключения двигательной установки будет описываться первым уравнением системы (3), если положить в нем $u_y=0$. Общее решение этого линейного дифференциального уравнения второго порядка с переменными коэффициентами имеет вид:

$$y(\tau)=f_{11}(\tau,\tau_0)\,y_0+f_{12}(\tau,\tau_0)\,\dot{y}_0+h_1(\tau,\tau_0), \tag{4}$$

а первая его производная

$$\dot{y}(\tau)=f_{21}(\tau,\tau_0)\,y_0+f_{22}(\tau,\tau_0)\,\dot{y}_0+h_2(\tau,\tau_0), \tag{5}$$

где

$$h_1(\tau,\tau_0)=x_0\,[\,f_{11}(\tau,\tau_0)\,m_1(\tau,\tau_0)+f_{12}(\tau,\tau_0)\,m_2(\tau,\tau_0)],$$

$$h_2(\tau,\tau_0)=x_0[f_{21}(\tau,\tau_0)m_1(\tau,\tau_0)+f_{22}(\tau,\tau_0)m_2(\tau,\tau_0)],$$

$$m_1(\tau,\tau_0)=\int_{\tau_0}^{\tau} l_{12}(\nu,\tau_0)a_{21}(\nu)d\nu,\ m_2(\tau,\tau_0)=\int_{\tau_0}^{\tau} l_{22}(\nu,\tau_0)a_{21}(\nu)d\nu,$$

$f_{11}\dots f_{22}$ – элементы матрицанта

$$\Phi(\tau,\tau_0)=\left[f_{ij}(\tau,\tau_0\right]^{2x2}, l_{12}, l_{22}$$

– элементы матрицы $\Phi^{-1}(\tau,\ \tau_0)$.

Начальная скорость $\dot{y}_{0T}$, требуемая для попадания АА в момент $\tau=\tau_к$ в точку, принадлежащую этой же нормали и имеющую координату y_k, может быть получена из уравнения (4).

$$\dot{y}_{0T}=[y_k-f_{11}(\tau_к,\ \tau_0)y_0-h_1(\tau_к,\ \tau_0)]/f_{12}(\tau_к,\ \tau_0). \qquad (6)$$

С учетом соотношения (6) выражения (4), (5) принимают вид:

$$y_П(\tau)=f_1 y_0+\varphi_1[y_k-h_1(\tau,\tau_0)]+h_1(\tau,\tau_0), \qquad (7)$$

$$\dot{y}_П(\tau)=\dot{f}_1 y_0+\dot{\varphi}_1[y_k-h_1(\tau,\tau_0)]+h_2(\tau,\tau_0), \qquad (8)$$

где

$$f_1=f_{11}(\tau,\ \tau_0)-f_{11}(\tau_к,\tau_0)f_{12}(\tau,\tau_0)/f_{12}(\tau_к,\tau_0),$$

$$\dot{f}_1=f_{21}(\tau,\tau_0)-f_{11}(\tau_к,\tau_0)f_{12}(\tau,\tau_0)/f_{12}(\tau_к,\tau_0),$$

$$\varphi_1=f_{12}(\tau,\tau_0)/f_{12}(\tau_к,\tau_0),\ \dot{\varphi}_1=f_{22}(\tau,\tau_0)/f_{12}(\tau_к,\tau_0).$$

Используя соотношения (6)–(8), можно найти программу дискретного управления барражированием АА вдоль нормали к ЛВ между двумя точками.

Импульс управления в точке 1 с координатой y_1, необходимый для перехода АА в точку 2 с координатой y_2 за время $T=\tau_k-\tau_0$, определится как разность между требуемой начальной скоростью $\dot{y}_{1T}$ в точке 1 и конечной скоростью $\dot{y}_1$, которую имеет АА в момент прихода в эту точку из точки 2. Если предположить, что маневры перехода из точки 1 в точку 2 и обратно выполняются за одинаковое время *T*, то выражения для этих скоростей согласно соотношениям (6) и (8) при $\tau_0=0$ и $\tau_k=T$ будут иметь вид:

$$\dot{y}_{1T}=[y_2-f_{11}(T,0)y_1-h_1(T,0)]/f_{12}(T,0),$$

$$\dot{y}_1=\dot{f}_1(T,0)y_2+\dot{\varphi}_1(T,0)[y_1-h_1(T,0)]+h_2(T,0).$$

Следовательно, управляющий импульс в точке 1

$$\Delta\dot{y}_1=\dot{y}_{1T}-\dot{y}_1=b_2\ y_2-b_1\ y_1+с, \qquad (9)$$

где

$$b_1=[f_{11}(T,0)+f_{22}(T,0)]/f_{12}(T,0),$$

$$b_2=[1-f_{12}(T,0)+f_{21}(T,0)+f_{11}(T,0)f_{22}(T,0)]/f_{12}(T,0),$$

$$с=h_1(T,0)[f_{22}(T,0)-1]/f_{12}(T,0)-h_1(T,0).$$

Начальная скорость в точке 2, требуемая для обратного перехода

$$\dot{y}_{2T}=[y_1-f_{11}(T,0)y_2-h_1(T,0)]/f_{12}(T,0),$$

а действительная скорость, которую имеет АА в этой точке после перехода из точки 1

$$\dot{y}_2=\dot{f}_1(T,0)y_1+\dot{\varphi}_1(T,0)[y_2-h_1(T,0)]+h_2(T,0).$$

Отсюда программное приращение скорости в точке 2

$$\Delta\dot{y}_2=\dot{y}_{2T}-\dot{y}_2=b_2\ y_1-b_1\ y_2+с. \qquad (10)$$

Программные законы изменения координаты *y* на участке движения из точки 1 в точку 2

$$y_П=f_1\ y_1+\varphi_1\ y_2+h_1-\varphi_1\ h_1(T,\ 0), \qquad (11)$$

а на участке обратного движения

$$y^*_П=f_1\ y_2+\varphi_1\ y_1+h_1-\varphi_1\ h_1(T,\ 0). \qquad (12)$$

ЭЗ на реализацию дискретного управления на цикл барражирования

$$V_{урб}=|\Delta\dot{y}_1|+|\Delta\dot{y}_2|.$$

Непрерывные управления $u_x,\ u_z$, удерживающие АА на нормали к ЛВ, согласно соотношениям (3) на первом участке имеют вид:

$$u_x=-a_{12}\ y_П-b_{12}\ \dot{y}_П-a_{11}\ x_0,\ u_z=-a_{32}\ y_П-b_{32}\ \dot{y}_П-a_{31}\ x_0, \qquad (13)$$

а на участке обратного движения

$$u^*_x=-a_{12}\ y^*_П-b_{12}\ \dot{y}^*_П-a_{11}\ x_0,\ u^*_z=-a_{32}\ y^*_П-b_{32}\ \dot{y}^*_П-a_{31}\ x_0, \qquad (14)$$

где $y_П,\ y^*_П$ определяются формулами (11), (12).

ЭЗ на реализацию этих управлений

$$V_{xрб}=\int_0^T|u_x|d\tau+\int_0^T|u^*_x|d\tau,\ V_{zрб}=\int_0^T|u_z|d\tau+\int_0^T|u^*_z|d\tau.$$

Суммарные ЭЗ на цикл барражирования

$$V_{рб\Sigma}=V_{урб}+V_{xрб}+V_{zрб}.$$

Если барражирование производится между точками 1 и 2, расположенными на нормали симметрично относительно ЛВ на расстоянии $y_{б0}$, то есть в угловом секторе $B\simeq 2\,y_{б0}/x_0$, то программы управления определяются в результате подстановки в соотношения (9)–(12) значений $y_1=y_{б0},\ y_2=-y_{б0}$. Если же маневр выполняется относительно заданной начальной точки с координатами $x = x_0$, $y_{б0} = 0$, то в этом случае туда подставляются значения $y_2 = y_1 = y_{б0} = 0$.

Необходимо отметить, что расстояние x_0, на которое удалена плоскость маневра от начала координат, совпадает достаточно близко с постоянной дальностью R_0 лишь при сравнительно небольших величинах углового сектора барражирования, поэтому более правильно называть маневры, обеспечиваемые алгоритмами (9)–(14), маневрами барражирования на квазипостоянной дальности x_0.

Соотношения (9)–(14) определяют алгоритмы управления барражированием на заданной квазипостоянной дальности x_0 в общем виде. Чтобы получить их конкретный вид для выбранного типа ОСК, нужно подставить в эти соотношения значения функций l_{12}, l_{22}, $f_{11} \dots f_{22}$ и коэффициентов a_{ij}, b_{ij} системы (3) для данной ОСК.

Так, например, в случае орбитальной ОСК и при компланарном барражировании [9]

$$f_{11} = f_{22} = ch r\tau,\ f_{12} = sh r\tau / r,\ f_{21} = r sh r\tau,$$
$$l_{12} = -f_{12},\ l_{22} = f_{22},\ r = |\sqrt{a_{22}}|,\ a_{22} = 3\cos^2\beta_0,$$
$$a_{11} = 3\sin^2\beta_0,\ a_{21} = a_{12} = 3\sin\beta_0\cos\beta_0,\ b_{12} = 2,$$
$$h_1 = a_{21} x_0 (ch r\tau - 1)/r^2,\ h_2 = a_{21} x_0 sh r\tau / r,$$
$$f_1 = sh(T-\tau)/shT,\ \varphi_1 = sh\tau/shT,$$
$$\dot{f}_1 = -rch r(T-\tau)/shT,\ \dot{\varphi}_1 = rch\tau/shT,$$
$$b_1 = 2rcthrT,\ b_2 = 2r/shrT,$$
$$c = 2a_{21} x_0 (1 - chrT)/rshrT.$$

Импульсы управления при барражировании между точками 1 и 2, лежащими на нормали симметрично относительно ЛВ на расстоянии $y_{б0}$:

$$\Delta\dot{y}_1 = -2r(y_{б0} cthrT/2 + x_0 tg\beta_0 thrT/2),$$
$$\Delta\dot{y}_2 = 2r(y_{б0} cthrT/2 - x_0 tg\beta_0 thrT/2).$$

Управляющий импульс при барражировании относительно заданной начальной точки с координатами x_0, $y_{б0} = 0$.

$$\Delta\dot{y} = -2r x_0 tg\beta_0 thrT/2,$$

зона барражирования (максимальное отклонение АА от ЛВ)

$$y_{Пэ} = x_0 tg\beta_0 (ch^{-1} rT/2 - 1), \tag{15}$$

а угловой сектор барражирования на квазипостоянной дальности x_0 –

$$B \approx y_{Пэ}/x_0 = tg\beta_0 (ch^{-1} rT/2 - 1). \tag{16}$$

Соотношения (15)–(16) позволяют оценить, как влияет время выполнения маневра на величину зоны и углового сектора барражирования АА на заданной дальности относительно ПА, строительные оси которого занимают неизменное положение относительно местной вертикали.

Литература

1. Алексеев, К.Б. Маневрирование космических аппаратов / К.Б. Алексеев, Г.Г. Бебенин, В.А. Ярошевский. – Москва : Машиностроение, 1970. – 416 с.

2. Балахонцев, В.Г. Сближение в космосе / В.Г. Балахонцев, В.А. Иванов, В.И. Шабанов. – Москва : Воениздат, 1973. – 240 с.

3. Бебенин, Г.Г. Системы управления полетом космических аппаратов / Г.Г. Бебенин, Б.С. Скребушевский, Г.А. Соколов. – Москва : Машиностроение, 1978. – 272 с.

4. Власов, С.А. Теория полета космических аппаратов / С.А. Власов, А.В. Кульвиц, А.Н. Скрипников. – Санкт-Петербург : ВКА имени А.Ф. Можайского, 2018. – 412 с.

5. Гончаревский, В.С. Основы теории управления встречей на орбите / В.С. Гончаревский. – Москва : Изд-во МО СССР, 1973. – 229 с.

6. Гончаревский, В.С. Радиоуправление сближением космических аппаратов / В.С. Гончаревский. – Москва : Советское радио, 1976. – 240 с.

7. Гончаревский, В.С. Теория программного управления относительным движением / В.С. Гончаревский. – Москва : Изд-во МО СССР, 1980. – 82 с.

8. Гончаревский, В.С. Управление групповым движением / В.С. Гончаревский. – Москва : Изд-во МО СССР, 1982. – 66 с.

9. Гончаревский, В.С. Групповой полет космических аппаратов / В.С. Гончаревский. – Москва : МО РФ, 2006. – 81 с.

10. Гончаревский, В.С. Автоматизированное управление взаимным маневром космических аппаратов вдоль линии визирования / В.С. Гончаревский. – Санкт-Петербург : ВКА им. А.Ф. Можайского, 2009. – 91 с.

11. Гончаревский, В.С. Комбинированный метод управления облетом космических аппаратов / В.С. Гончаревский // Информация и Космос. – 2020. – № 2. – С. 148–151.

12. Гончаревский, В.С. Теоретические основы управления взаимным маневром космических аппаратов / В.С. Гончаревский. – Санкт-Петербург : ВКА им. А.Ф. Можайского, 2024. – 326 с.

13. Ермилов, Ю.А. Управление сближением космических аппаратов / Ю.А. Ермилов, Е.Е. Иванова, С.В. Пантюшин. – Москва : Наука, 1977. – 448 с.

14. Иванов, Н.М. Баллистика и навигация космических аппаратов / Н.М. Иванов, Л.Н. Лысенко. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 523 с.

15. Калинин, В.Н. Теория управления космическим аппаратом (на основе концепции активного объекта) / В.Н. Калинин. – Санкт-Петербург : ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – 182 с.

16. Кубасов, В.Н. Методы сближения на орбите / В.Н. Кубасов, Г.Ю. Данков, Ю.П. Яблонько. – Москва : Машиностроение, 1985. – 184 с.

17. Лебедев, А.А. Встреча на орбите / А.А. Лебедев, В.Б. Соколов. – Москва : Машиностроение, 1969. – 368 с.

18. Гончаревский, В.С. Моделирование управляемого движения космических аппаратов / В.С. Гончаревский, Ю.С. Мануйлов, Е.А. Новиков. – Санкт-Петербург : ВКА им. А.Ф. Можайского, 2011. – 334 с.

19. Пономарев, В.М. Теория управления движением космических аппаратов / В.М. Пономарев. – Москва : Наука, 1965. – 456 с.

20. Разыграев, А.П. Основы управления полетом космических аппаратов и кораблей / А.П. Разыграев. – Москва : Машиностроение, 1977. – 472 с.

21. Титов, Г.С. Межорбитальные локальные маневры космических аппаратов / Г.С. Титов, В.А. Иванов, В.Л. Горьков. – Москва : Машиностроение, 1982. – 246 с.