Методы программного управления взаимным маневром космических аппаратов

Methods of software control of spacecraft mutual maneuver

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

Ключевые слова: программа управления – program of guidance; взаимный маневр – mutual maneuver; динамическая модель – dynamic model; допустимый закон – a valid law.

Взаимный маневр является одной из основных операций, выполняемых в космическом пространстве. Для его реализации необходимо разработать соответствующую программу управления маневрирующим космическим аппаратом. В статье рассмотрены методы аналитического конструирования универсальных алгоритмов программного управления взаимным маневром. Приведена алгоритмическая структура программного управления и рассмотрены ее особенности в зависимости от выбранного метода управления. Дается постановка задачи оптимального программного управления и анализируются возможные пути ее решения.

Mutual maneuver is one of the main operations performed in outer space. For its implementation, it is necessary to develop an appropriate program for controlling the maneuvering spacecraft. In the article the methods of analytical construction of universal algorithms of software control of mutual maneuver are considered. The algorithmic structure of software control is given and its features depending on the selected control method are considered. The problem of optimal program control is formulated and possible ways of its solution are analyzed.

Под взаимным маневром (ВМ) космических аппаратов (КА) понимается такое управляемое перемещение одного КА относительно другого, в процессе которого расстояние между аппаратами остается значительно меньшим расстояния до центра планеты и в результате которого создаются конечные условия, требуемые для решения той или иной поставленной задачи [1...9]. Таким образом, основное назначение взаимного маневра состоит в том, чтобы в процессе его осуществления вектор $\vec{q}(t)$ относительного состояния центров масс КА изменялся вполне определенным образом и принимал в момент окончания ВМ вполне определенное заданное значение. Вектор $\vec{q}(t) = [\vec{R}(t), \vec{V}(t)]$, определяемый тремя компонентами вектора относительного положения $\vec{R}(t)$ и тремя компонентами вектора относительной скорости $\vec{V}(t)$, полностью описывает в любой момент времени t относительное положение и относительные скорости центров масс КА, участвующих в ВМ. Обычно при решении большинства практических задач маневр совершает один из КА, остальные же аппараты не изменяют в это время траекторию центра масс. Поэтому в дальнейшем первый из них называется активным аппаратом, а остальные – пассивными аппаратами.

Закон изменения вектора $\vec{q}(t)$ и обеспечивающий его закон изменения управляющего ускорения $\vec{u}(t)$, найденные таким образом, что они удовлетворяют выбранной динамической модели относительного движения и заданным краевым и ограничивающим условиям, будем называть соответственно допустимой программной траекторией и допустимой программой управления маневром. Так как каждой задаче, выполняемой ВМ, соответствуют различные краевые и ограничивающие условия, определяемые ее тактическими и техническими особенностями, то для ее решения могут быть использованы и различные методы программного управления. Здесь под методом программного управления маневром понимается выбранный допустимый закон движения активного космического аппарата (закон изменения вектора $\vec{q}$), рассматриваемого как материальная точка.

Для осуществления ВМ в настоящее время разработан ряд методов программного управления [1...4, 6]. В основу классификации этих методов могут быть положены различные признаки. Наиболее удобно использовать в качестве этих признаков три вида ограничивающих условий, накладываемых на функции $\vec{q}(t)$ и

1 2022.indd 138 24.03.2022 15:10:59

$\vec{u}(t)$, а, следовательно, и на метод программного управления. Эти условия в основном и определяют различие методов и систем управления.

В зависимости от типа ограничений, накладываемых на динамическую модель движения центров масс КА, используемую при разработке программы управления, все возможные методы и системы могут быть разделены на две группы:

– методы и системы управления, учитывающие закономерности движения в основном гравитационном поле планеты;

– методы и системы управления, не учитывающие эти закономерности.

В зависимости от типа ограничений, накладываемых на компоненты вектора $\vec{q}$ на программной траектории (от вида кинематических связей между этими компонентами), эти же методы и системы можно подразделить на методы и системы без ограничений и с ограничениями на вид программной траектории.

В зависимости от вида управляющих воздействий, используемых для осуществления маневра, все перечисленные методы и системы можно разделить на импульсные (дискретные), непрерывные, комбинированные.

В импульсных (дискретных) методах и системах управляющие воздействия дискретны во времени (имеют вид дельта-импульсов или импульсов достаточной малой, по сравнению со временем выполнения маневра, длительности), в непрерывных методах они являются непрерывными функциями времени, а в комбинированных методах и системах используется как тот, так и другой вид управляющих функций.

Методы дискретного и непрерывного управления используются при отсутствии ограничений на вид программной траектории. При наличии этих ограничений принципиально необходимо непрерывное управление. Однако здесь представляется целесообразным применение также и комбинированного управления. Это допустимо, во-первых, когда ограничения относятся лишь к какой-либо одной составляющей r_i полного относительного движения, характеризуемого изменением координат r_1, r_2 и r_3 (например, к поперечной или продольной составляющей относительного движения в визирной системе координат $x_л y_л z_л$) и, следовательно, для управления другой (или другими) составляющей может быть использован дискретный вид управляющих воздействий, а во-вторых, когда программная траектория маневра состоит из участков с ограничениями и без ограничений на ее вид.

Несколько особым признаком классификации методов и систем управления ВМ является тип ограничений, накладываемых на программную траекторию по основным характеристикам (показателям) качества управления. При практической разработке программы управления маневром лишь в некоторых случаях краевые и ограничивающие условия задаются такими, что допустимые законы $\vec{q}(t)$ и $\vec{u}(t)$ определяются однозначно. В большинстве же случаев эти условия определяют лишь принадлежность $\vec{q}(t)$ и $\vec{u}(t)$ к целому классу допустимых функций. Следовательно, имеется возможность выбрать в этом классе такие функции $\vec{q}(t)$ и $\vec{u}(t)$, которые оказались бы наиболее желательными с точки зрения тех или иных показателей качества управления маневром. Законы $\vec{q}_э$ и $\vec{u}_э$, найденные таким образом, называются соответственно оптимальной программной траекторией и оптимальной программой управления, а показатели качества, достигающие для этих функций экстремальных значений, - критериями оптимальности.

В зависимости от того, какой показатель качества управления должен принять экстремальное значение, можно выделить методы и системы управления, оптимальные по энергетическим затратам, по быстродействию или по точности выполнения маневра.

Отыскание оптимальных программ управления представляет собой весьма сложную задачу. Ее решение базируется на методах теории оптимального управления, фундамент которой составляют классическое вариационное исчисление, принцип максимума, динамическое программирование, а также современные алгоритмические методы численной оптимизации [10...16]. Однако, несмотря на большие успехи, достигнутые в последние годы в области дальнейшей разработки и совершенствования этой теории, опыт практического решения задач управления показывает, что даже при наличии ряда существенных упрощений алгоритмы расчета оптимальных программ, как правило, оказываются очень сложными. Кроме того, сам вид оптимальной программной траектории $\vec{q}_э$ и оптимальной программы управления $\vec{u}_э$ зачастую получается сложным с точки зрения их технической реализации. Тем не менее, оптимальные методы и системы управления имеют большую практическую ценность даже в тех случаях, когда не представляется возможность реализовать их непосредственно. Она заключается в том, что, определив оптимальную программу, мы тем самым находим теоретический предел, лучше которого, как бы ни проектировалась система управления, ничего другого получить не удается. Дальнейшую работу можно проводить следующим образом: разработать ряд методов и соответствующих им программ управления, которые были бы наиболее просты с точки зрения их технической реализации, а затем уже из них выбрать такой метод и такую программу, которые окажутся наиболее близки по заданному показателю качества к оптимальным. Поэтому на практике обычно нет необходимости реализовывать абсолютно оптимальную программу управления маневром, а целесообразно стремиться разработать ее близкой к оптимальной, но более простой в технической реализации.

Разумный компромисс между простотой алгоритмов и близостью их к соответствующим оптимальным эталонам приобретает еще большее значение при разработке и реализации программного управления

1 2022.indd 139 24.03.2022 15:11:00

взаимным маневром на борту КА. Таким образом, практическое применение принципов программного управления взаимным маневром на борту КА неразрывно связано с необходимостью разработки методов приближенного синтеза оптимальных алгоритмов. Эти методы могут базироваться на ряде разумно и обоснованно принятых допущений, справедливых для достаточно широкого диапазона условий выполнения ВМ и позволяющих синтезировать искомые алгоритмы в замкнутой аналитической форме. К таким допущениям следует прежде всего отнести использование линейных динамических моделей относительного движения, а также разумный и рациональный учет ограничивающих условий (прежде всего ограничений на величину управления), позволяющий воспользоваться для синтеза еще, по-видимому, далеко не исчерпавшими свои возможности аналитическими методами классического вариационного исчисления [11...16] и рядом других методов, которые дают возможность получить решения искомых вариационных задач в замкнутой аналитической форме.

Рассчитать и реализовать программу управления, соответствующую любому из перечисленных ранее методов, можно с помощью системы, упрощенная структурная схема которой изображена на рис. 1.

Эта же схема позволяет оценить алгоритмическую структуру программного управления, то есть состав алгоритмов, используемых системой управления, и взаимосвязь между ними.

Как видно из схемы, на формирователь управляющих сигналов системы поступает информация о векторе измерений $\vec{h} = [\vec{S}_1, \vec{S}_2 ... \vec{S}_n]$, представляющем собой совокупность значений векторной функции $\vec{S}(t)$ в различные моменты времени $t_1, t_2, \quad , t_n$. Компонентами функции $\vec{S}(t)$ являются измерительные функции $S_1, S_2, \quad , S_k$, определяемые различными измерительными устройствами, входящими в состав навигационного комплекса системы управления, где $к$ - число этих устройств. Таким образом, функция $\vec{S}(t)$ характеризует состав измерений (состав и количество измерительных функций), осуществляемых навигационным комплексом, а в векторе $\vec{h}$ заключена вся информация о движении центра масс КА, определяемая навигационным комплексом на заданном временном интервале.

Формирователь управляющих сигналов, представляющий собой вычислительное устройство, реализует два основных алгоритма. По первому из них, называемому алгоритмом расчета вектора состояния (алгоритм определения траектории), на основании информации о векторе $\vec{h}$ и с помощью соотношения

$$\vec{q} = W\vec{h}, \qquad (1)$$

где W – матрица связи, рассчитывается значение вектора состояния $\vec{q}(t)$ в момент начала маневра $t = t_0$ (вектор начальных условий $\vec{q}_0$) в системе координат, в которой будет определяться программа управления. По второму алгоритму, называемому алгоритмом расчета программы управления, на основе информации о рассчитанном значении вектора начальных условий $\vec{q}_0$, а также информации о векторе конечных условий $\vec{q}_k$ и о заданных ограничивающих условиях (запас топлива, время выполнения маневра и т.д.), заложенной в формирователе управляющих сигналов, рассчитывается вектор программного управления $\vec{u}_n$. Этот вектор отрабатывается двигательной установкой системы управления.

Вид первого и второго из указанных выше алгоритмов зависит от выбранного метода программного

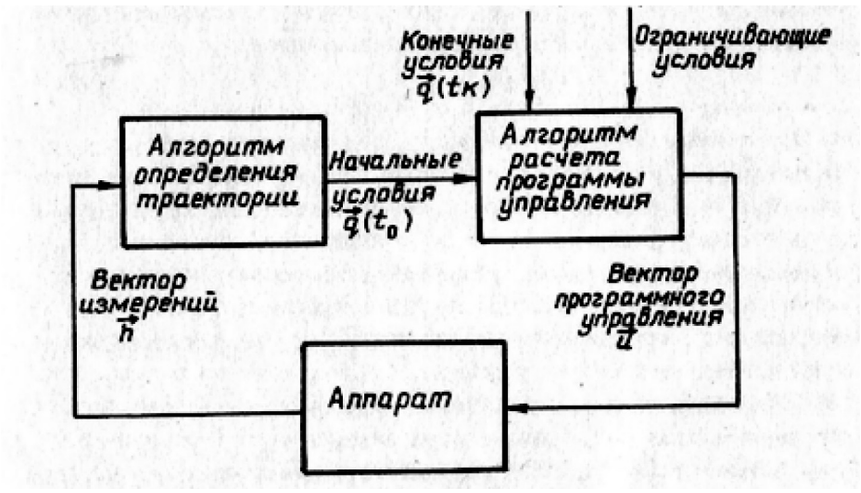

Рис.1. Алгоритмическая структура программного управления

1 2022.indd 140 24.03.2022 15:11:16

управления ВМ. Так, при использовании методов, не учитывающих закономерности орбитального движения, из-за неполноты сведений о действующих на КА силах необходимо наличие полного состава измеряемых функций, то есть векторная функция $\vec{S}(t)$ должна иметь такой состав (а именно: три измеряемые функции скорости и три измеряемые функции положения), чтобы определение вектора состояния $\vec{q}$ могло производиться в каждой точке траектории и, следовательно, независимо от динамики движения аппаратов. В этом случае матрица связи W в соотношении (1) будет являться просто матрицей преобразования координат, учитывающей разницу координатных систем, в которых определяются измерительные функции вектора $\vec{h}$ и вектор состояния $\vec{q}$,если таковая имеется (обычно вектор $\vec{h}$ определяется в сферической, а вектор $\vec{q}$ – в декартовой системе координат). Эта матрица и кладется здесь в основу алгоритма расчета вектора состояния центра масс КА.

Если применяются методы управления, учитывающие закономерности орбитального движения, то появляется принципиальная возможность определения вектора состояния при неполном составе измеряемых функций за счет использования динамики движения. Однако для этого необходимо иметь результаты измерений в нескольких точках траектории. Поэтому здесь матрица W должна определяться с учетом решений дифференциальных уравнений, описывающих динамику движения центра масс КА. Эти же решения используются при построении алгоритма расчета программы управления.

Таким образом, для конструирования алгоритмов программного управления маневром (алгоритмов расчета вектора состояния и программы управления) необходимо иметь решения дифференциальных уравнений, соответствующих используемой при проектировании динамической модели движения центра масс активного КА. В общем случае такой моделью является модель управляемого программного движения, которая представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений [3]. Эта система может быть записана в векторно-матричной форме в следующем виде:

$$d\vec{q}/dt = \vec{\varphi}\left(\vec{q},t\right), \tag{2}$$

где $\vec{\varphi}\left(\vec{q},t\right)$ – вектор-функция, определяемая векторной разностью сил, действующих на каждый из КА. Однако в связи с тем, что расстояние между аппаратами в процессе ВМ значительно меньше расстояний до центра планеты, вокруг которого происходит их абсолютное движение, система (2) близка к системе линейных дифференциальных уравнений (ЛДУ), которая может быть представлена в векторно-матричной форме следующим образом:

$$d\vec{q}/dt = D(t)\vec{q} + \vec{\xi_u}, \tag{3}$$

где $D(t)$ – матрица коэффициентов, вид которой определяется типом относительной системы координат (ОСК), в которой рассматривается ВМ, и типом орбиты пассивного аппарата, с которым связано начало этой ОСК; $\vec{\xi_u} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vec{u} \end{bmatrix}$ – вектор-функция, определяемая управляющими воздействиями. Второй член в правой части уравнения (3) определяется управляющим ускорением $\vec{u} = \vec{P}/m$, где $\vec{P}$ – управляющая сила, m – масса активного аппарата; а первый член – имеющейся векторной разностью гравитационных ускорений двух КА, находящихся в разных точках поля тяготения, и неинерциальностью ОСК, в которой рассматривается ВМ. Так как каждый из векторов $\vec{R}$ и $\vec{V}$ характеризуется тремя компонентами, то матрица $D(t)$ имеет шестой порядок и может быть представлена в виде

$$D(t) = \begin{bmatrix} 0 & E \\ A(t) & B(t) \end{bmatrix}, \tag{4}$$

где O и E – нулевая и единичная матрицы третьего порядка, $A(t)$ и $B(t)$ – квадратные матрицы третьего порядка.

Систему (3) с учетом соотношения (4) можно записать в несколько ином виде

$$d\vec{R}/dt = \vec{V}, \quad d\vec{V}/dt = \vec{Q} = A(t)\vec{R} + B(t)\vec{V} + \vec{U}. \tag{5}$$

Решение системы (3) или (5) можно представить в виде

$$\vec{q}(t) = \vec{q}_1(t) + \vec{q}_2(t). \tag{6}$$

Здесь решение $\vec{q}_1(t)$ есть общее решение однородной системы(3), т.е. решение при $\vec{\xi}_u = 0$, а решение $\vec{q}_2(t)$ представляет собой частное решение неоднородной системы (3),то есть решение при $\vec{\xi_u} \neq 0$.

Физически решение $\vec{q}_1(t)$ описывает неуправляемое (свободное) движение центра масс КА, поскольку условие $\vec{\xi_u} = 0$ означает, что к центру масс КА никаких управляющих воздействий не прикладывается.

Чтобы описать управляемое движение (каким и является ВМ), необходимо к решению $\vec{q}_1(t)$ прибавить частное решение $\vec{q}_2(t)$.

Согласно теории линейных дифференциальных уравнений решения $\vec{q}_1(t)$ и $\vec{q}_2(t)$ определяются следующими соотношениями:

$$\vec{q}_1(t) = \Phi(t,t_0)\vec{q}(t_0), \tag{7}$$

$$\vec{q}_2(t) = \Phi(t,t_0)\int_{t_0}^{t}\Phi^{-1}(\vartheta,t_0)\vec{\xi}_u(\vartheta)d\vartheta, \tag{8}$$

1 2022.indd 141 24.03.2022 15:11:19

где $\vec{q}(t_0)$ – значение шестимерного вектора состояния в момент начала маневра $t=t_0$ (вектор начальных условий $\vec{q}_0$), ϑ – переменная интегрирования; $\Phi(t,t_0)$ – матрицант (фундаментальная нормализованная матрица типа 6х6) решений $a_{11}...a_{66}$ однородной системы уравнений (3).

Из соотношений (7...8) видно, почему они могут быть положены в основу построения алгоритма расчета программы управления. Зная вектор начальных условий $\vec{q}(t_0)$, время выполнения маневра $T=t_k-t_0$, вектор конечных условий $\vec{q}(t_k)$ и найдя матрицы $\Phi(t,t_0)$, $\Phi^{-1}(t,t_0)$), можно по этим соотношениям рассчитать необходимые значения $\overline{\xi}_u$, а, следовательно, и необходимые допустимые законы изменения $\vec{u}_n(t)$ и $\vec{q}_n(t)$. Эти законы могут быть выбраны из класса допустимых функций таким образом, чтобы программа управления, а следовательно, и реализующая ее система управления маневром были бы в определенном смысле оптимальными.

При отыскании программ управления ВМ могут использоваться различные критерии их оптимальности. Выбор критерия определяется видом задачи, решаемой активным аппаратом в процессе выполнения маневра, и зависит от специфических особенностей реализуемой разновидности ВМ, а также особенностей разработки самой программы. Так как обычно задача обеспечения заданной точности выполнения ВМ возлагается на корректирующее управление, разработка которого проводится в стохастическом плане, то при отыскании программы управления, проводимого обычно в детерминированном плане, превалирующее значение приобретает такой критерий как получение минимума энергетических затрат на выполнение ВМ. Однако при этом обычно учитываются, путем использования при формулировке ограничивающих условий, также и другие показатели качества управления ВМ, улучшить которые можно за счет соответствующего выбора значений отдельных параметров этой программы и соответствующей ей траектории ВМ.

Литература

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

2. Гончаревский, В. С. Теория программного управления относительным движением / В.С. Гончаревский. – МО СССР, 1980. – 82 с.

3. Гончаревский, В. С. Методы и алгоритмы управления относительным движением космических аппаратов / В.С. Гончаревский. – МО РФ, 1998. – 87 с.

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

5. Иванов, Н. М Баллистика и навигация космических аппаратов / Н.М. Иванов, Л.Н. Лысенко. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – 523 с.

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

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

8. Титов, Г. С. Межорбитальные локальные маневры космических аппаратов / Г.С. Титов, В.А. Иванов, В.Л. Горьков. – М.: Машиностроение, 1982. – 245 с.

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

10. Болтянский, В. Г. Математические методы оптимального управления / В.Г. Болтянский. – М.: Наука, 1966. – 308 с.

11. Буслаев, В. С. Вариационное исчисление / В.С. Буслаев. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. – 288 с.

12. Гельфанд, И. М. Вариационное исчисление / И.М. Гельфанд, С.В. Фомин. – М.: Физматгиз, 1961. – 228 с.

13. Гноенский, Л. С. Математические основы теории управляемых систем / Л.С. Гноенский, Г.А. Каменский, Л.С. Эльсгольц. – М.: Наука, 1969. – 512 с.

14. Карташев, А. П. Обыкновенные дифференциальные уравнения и основы вариационного исчисления / А.П. Карташев, Б.Л. Рождественский. – М.: Наука, 1976. – 256 с.

15. Петров, Ю. П. Вариационные методы теории оптимального управления / Ю.П. Петров. – Л.:Энергия, 1977. – 280 с.

16. Эльсгольц, Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л.Э. Эльсгольц. – М.: Наука, 1969. – 424 с.

1 2022.indd 142 24.03.2022 15:11:23