

Балакин В.Л., Крикунов М.М.

**ОБ ОПТИМИЗАЦИОННОМ ПОДХОДЕ К УПРАВЛЕНИЮ
ТРАЕКТОРИЯМИ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ
ДЕЙСТВИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ**

В данной работе для общности обозначения под аэрокосмическими аппаратами (АэрКА) будем понимать летательные аппараты (ЛА), совершающие движение в атмосфере со скоростями и на высотах, превышающих освоенные современной авиационной техникой.

Терминальное управление

В условиях действия возмущений задачей терминального управления для ЛА является обеспечение заданных конечных параметров движения с учётом имеющихся ограничений на управление и фазовые координаты. Для АэрКА такая задача возникает, например, при спуске с околоземной орбиты в условиях пассивного (без затрат топлива) атмосферного движения.

К общим требованиям к системам терминального управления ЛА (системам управления конечными параметрами) относятся требования наблюдаемости и управляемости.

Наблюдаемость обеспечивается путём имитации движения ЛА с помощью соответствующей модели от текущей точки траектории до конечной и непосредственного определения отклонений полученных конечных параметров движения от их заданных значений. При этом методические погрешности будут наименьшими. Сложность реализации в части вычислительных затрат преодолевается за счёт быстрейшего действия современных бортовых вычислительных комплексов с учётом небольшой продолжительности имитируемого участка движения АэрКА в атмосфере, которая составляет минуты.

Управляемость терминальных систем связана с выбором для заданных конечных условий движения структуры и параметров управления.

Работоспособное (так называемое командное) управление, которое реализуется в условиях действия априорно неопределённых возмущений, должно иметь обратную связь. Осуществить такую связь в процессе управления позволяет подход, основанный на применении многошагового управления. Его использование не требует качественного и

количественного знания действующих возмущений, поскольку действие возмущающих факторов оценивается по прогнозируемому конечному результату движения ЛА.

Для эффективного использования многошагового управления в задачах управления траекториями ЛА достаточно иметь достоверные знания о положении и скорости в любой момент времени, что обеспечивается современным уровнем развития навигационных средств измерения и алгоритмов обработки навигационной информации.

Суть многошагового управления состоит в следующем. Отрезок времени, соответствующий участку рассматриваемого движения ЛА, разбивается на интервалы, на каждом из которых выполняется один шаг коррекции управления. На каждом шаге командное управление формируется по результатам прогнозирования конечных условий движения на основе известной информации, включающей в себя в общем случае значения текущих фазовых координат, аэродинамических характеристик, характеристик двигательной установки, плотности стандартной атмосферы и сформированное ранее управление. На текущем шаге управление осуществляется по программе, полученной на предыдущем шаге. На первом шаге используется номинальная программа управления.

Командное терминальное управление должно обеспечить заданные конечные параметры движения.

Оптимальное управление

Рассмотренный терминальный подход не позволяет оптимизировать движение АэрКА при выполнении ряда манёвров в условиях действия возмущений.

При аэродинамическом повороте плоскости орбиты на заданный угол необходимо минимизировать расход топлива.

При наборе АэрКА заданной высоты с разгоном до заданной скорости (гиперзвуковой маршевый самолёт, гиперзвуковой самолёт-разгонщик как первая ступень аэрокосмической системы выведения полезной нагрузки на околоземные орбиты) также необходимо минимизировать расход топлива.

При пассивном наборе АэрКА заданной высоты с заданным углом наклона траектории (первая ступень аэрокосмической системы) желательно максимизировать конечную скорость.

Для вышеперечисленных манёвров исследователями Самарского национального университета имени академика С.П. Королева с использованием формализма принципа максимума Понтрягина [1] получены номинальные оптимальные программы управления при отсутствии возмущений, например [2-5]. Предлагается использовать данный формализм для определения командного оптимального многошагового управления.

На каждом шаге формируется командное оптимальное управление, обеспечивающее экстремальное значение показателя качества управления. На текущем шаге командное оптимальное управление осуществляется согласно полученному на предыдущем шаге. На первом шаге используется известная номинальная оптимальная программа управления. При определении командного оптимального управления при пассивном движении АэрКА используется известная информация о текущих фазовых координатах, аэродинамических характеристиках, плотности атмосферы, а при активном движении АэрКА – дополнительная информация о тяге и секундном расходе топлива используемой двигательной установки.

Если в процессе определения оптимального управления не нарушаются имеющиеся ограничения на управление и (или) фазовые координаты, то решение краевой задачи не имеет особенностей и может использоваться метод редукции к задачам Коши. Например, решение задачи оптимизации набора высоты гиперзвукового летательного аппарата методом принципа максимума приведено в статье настоящего сборника [6].

Отметим, что для двух манёвров АэрКА – набор заданной высоты гиперзвуковым маршевым самолётом и пассивный набор заданной высоты первой ступенью аэрокосмической системы - ограничения на управление и (или) фазовые координаты можно не учитывать при определении номинальных оптимальных программ управления [3,5]. Возможно, что эти ограничения будут выполняться и при формировании командного оптимального управления, по крайней мере, в случае малых возмущений.

Для двух других манёвров АэрКА – аэродинамический поворот плоскости орбиты и набор заданной высоты гиперзвуковым самолётом-разгонщиком - ограничения необходимо учитывать при определении оптимальных программ управления в отсутствие возмущений [2,4], поэтому при возмущённом движении ограничения заведомо не будут выполняться.

При нарушении ограничения на управление дальнейшее движение АэрКА должно осуществляться с граничным значением управления, т.е. с предельными манёвренными возможностями аппарата.

При нарушении ограничения на фазовые координаты дальнейшее движение АэрКА должно осуществляться с управлением, обеспечивающим выполнение ограничения.

В этих случаях решение краевой задачи требует отдельного рассмотрения и индивидуального решения.

Библиографический список

1. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1983. 393 с.
2. Храмов А.А. Оптимизация комбинированного поворота плоскости орбиты аэрокосмического аппарата методом принципа максимума Понтрягина // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 1. С. 140-153. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-19-1-140-153
3. Балакин В.Л., Крикунов М.М. Анализ программ управления и траекторий движения гиперзвукового самолёта при наборе высоты // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 4. С. 18-26. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-4-18-26
4. Балакин В.Л., Крикунов М.М. Анализ программ управления и траекторий набора высоты гиперзвуковой первой ступени авиационно-космической системы // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 1. С. 18-29. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-18-29
5. Балакин В.Л., Ишков С.А., Храмов А.А. Оптимизация атмосферного движения летательного аппарата на основе метода принципа максимума Понтрягина // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 1. С. 7-19. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-7-19
6. Крикунов М.М. Решение задачи оптимизации набора высоты гиперзвукового летательного аппарата методом принципа максимума // Управление движением и навигация летательных аппаратов: Сборник трудов XXII Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов: Часть I. Самара, 13-14 июня 2019 г. – Самара, Изд-во Самарского федерального исследовательского центра РАН, 2020. – С. 37-42.