

ний ω^* , может быть исключено, если задача по сближению поверхностей S_{ω^*} , S_{ω^*} ставится для ограниченного множества значений e .

Список литературы

1. Токарь Е.Н. Проблемы управления гиросиловыми стабилизаторами //Космич.исслед. - 1978. - Т.16. - Вып.2.
2. Бортц. Модификация кинематических уравнений для бесплатформенной инерциальной системы с целью снижения требований к БЦВМ //Вопросы ракетной техники. - 1972. - N 5.
3. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. - М.: Наука, 1975.

УДК 629.782.015.07

Ю.Н.Лазарев

АЛГОРИТМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕРМИНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СПУСКОМ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В АТМОСФЕРЕ

1. Решение задачи терминального управления движением центра масс аэрокосмического аппарата при спуске в атмосфере проводится в два этапа. На первом этапе, до начала процесса управления, спуском формируется номинальное управление, обеспечивающее достижение цели управления в соответствии с выбранными моделями движения и возмущений. На втором этапе, во время движения, на основе номинального управления формируется командное управление, обеспечивающее выполнение целевой задачи в реальных условиях функционирования системы управления. В настоящей работе в качестве цели управления принималось выполнение на заданной высоте H_k ограничений на конечные значения скорости V_k , угла наклона траектории θ_k , угла пути φ_k , широты φ_k и долготы λ_k . Считалось, что управление спуском осуществляется путем изменения угла атаки α и угла скоростного крена γ_a , на которые также накладывались ограничения. В качестве общего метода решения задачи терминального управления в данной работе использовался численный метод, основанный

на последовательной линеаризации задачи /1-3/.

2. Номинальное управление формируется в условиях практически неограниченного времени, поэтому вычислительный алгоритм метода формирования номинального управления может содержать заранее неопределенное число операций. В связи с этим при формировании номинального управления могут учитываться кроме ограничений на терминальные условия разнообразные ограничения на текущие параметры траектории, а также решаться оптимизационная задача. В общем виде вычислительный алгоритм формирования номинального программного управления спуском в атмосфере сводится к выполнению следующих операций /3/:

1) Выбирается начальное приближение программного управления. Вычисляются конечные условия и другие функционалы задачи.

2) Производится конечномерная аппроксимация задачи.

3) Вычисляются производные функционалов по управлению.

4) В малой окрестности управляющих зависимостей решается задача линейного программирования относительно приращений управляющих зависимостей, улучшающих управление в смысле удовлетворения заданным ограничениям на терминальные условия движения, другие функционалы и оптимизирующих критерий качества.

5) Формируется улучшенное программное управление с учетом ограничений на управляющие зависимости. Вычисляются конечные условия и другие функционалы задачи.

6) Проверяется условие окончания итерационного процесса поиска номинального управления. В случае его невыполнения в качестве следующего приближения программного управления принимается улучшенная программа, и алгоритм поиска повторяется, начиная с пункта 2. Если условие окончания выполнено, то улучшенное управление принимается в качестве номинального.

3. В отличие от номинального командное управление формируется в реальном времени в условиях действия возмущений, поэтому вычислительный алгоритм метода формирования командного управления должен содержать заранее определенное число операций. Реализовавшееся командное управление тем больше отличается от номинального, чем больше условия спуска в атмосфере не совпадают с условиями моделирования движения при формировании номинальной программы управления.

Рассмотрим многошаговый процесс управления /4/, позволяющий при использовании на каждом отдельном шаге методов формирования программного управления осуществлять в целом обратную связь, регулярно замы-

кая систему управления и делая ее таким образом работоспособной в условиях априорной неопределенности возмущающих воздействий. Для этого на каждом шаге (интервале) управление формируется к его концу по результатам прогнозирования движения аппарата на основе информации, имеющейся к его началу и включающей в себя значения фазовых координат, параметров аппарата, характеристик атмосферы и сформированное ранее управление. На текущем шаге управление осуществляется в соответствии с полученным на предыдущем шаге.

В общем виде вычислительный алгоритм формирования командного терминального управления спуском в атмосфере сводится на каждом шаге к выполнению следующих операций.

1) В качестве начального приближения принимается управление, сформированное на предыдущем шаге (на первом шаге принимается номинальное управление). Вычисляются конечные условия движения - функционалы задачи.

2) Производится конечная на данном шаге аппроксимация задачи.

3) Вычисляются производные функционалов по управлению.

4) В малой окрестности управления решается задача линейного программирования относительно малых приращений управляющих зависимостей, улучшающих управление в смысле удовлетворения заданным ограничениям на терминальные условия движения.

5) Формируется улучшенное управление с учетом ограничений на управляющие зависимости, которое принимается в качестве командного на следующем шаге управления.

4. Моделирование работы вычислительных алгоритмов формирования терминального управления проводилось при следующих условиях. Движение аэрокосмического аппарата в атмосфере описывалось системой дифференциальных уравнений /5/. Аэродинамические характеристики и плотность атмосферы задавались таблично. Модель движения учитывала нецентральность поля тяготения Земли и ее вращение вокруг собственной оси. В качестве начальных условий движения принимались следующие: $H_0=100$ км, $V_0=7560$ м/с, $\theta_0=-1^\circ$, $\varphi_0=60^\circ$, $\psi_0=18^\circ$, $\lambda_0=-17^\circ$. При проведении расчетов учитывались ограничения на управление: $10^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$, $|\gamma_n| \leq 80^\circ$, и следующие ограничения на конечные условия движения на высоте 20 км: $480 \text{ м/с} \leq V_k \leq 520 \text{ м/с}$, $9^\circ \leq \theta_k \leq 11^\circ$, $75^\circ \leq \varphi_k \leq 105^\circ$, $46,38^\circ \leq \psi_k \leq 46,42^\circ$, $58,78^\circ \leq \lambda_k \leq 58,82^\circ$.

На рис. 1 приведены основные результаты формирования номинального управления: начальное приближение управления (α_0, γ_{00}), полученное номинальное управление ($\alpha_{ном}, \gamma_{аном}$), а также соответствующая ему зависимость высоты H от времени t .

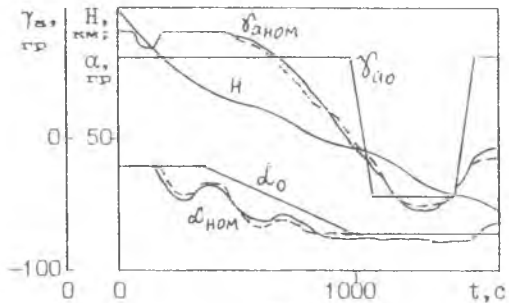


Рис. 1.

Конечные условия движения после реализации номинального управления находятся в допустимых пределах: $V_k=502$ м/с, $\theta_k=-10^\circ$, $\phi_k=89^\circ$, $\varphi_k=46,39^\circ$, $\lambda_k=58,78^\circ$.

Командное управление с шагом коррекции управления 100 секунд формировалось при реализовавшемся значении начальной скорости движения, равном 7550 м/с, и при плотности атмосферы, реализовавшаяся величина которой на 5% меньше, чем у номинальной. Реализация номинальной программы управления при этих условиях приводит к терминальным значениям фазовых координат аппарата на высоте 20 км, не удовлетворяющим принятым ограничениям: $V_k=407$ м/с, $\theta_k=16^\circ$, $\phi_k=110^\circ$, $\varphi_k=45,59^\circ$, $\lambda_k=55,85^\circ$.

На рис. 1 штриховой линией показано реализовавшееся командное управление ($\alpha_{ком}, \gamma_{анком}$).

На рис. 2 показаны изменения по шагам коррекции управления N бортовых и реальных прогнозируемых конечных значений скорости, обозначенных соответственно $V_{кб}$ и $V_{кр}$.

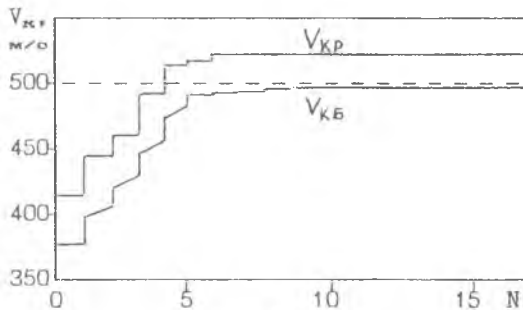


Рис. 2.

Конечные условия движения после реализации командного управления находятся в допустимых пределах: $V_k=518$ м/с, $\theta_k=10,8^\circ$, $\phi_k=88^\circ$, $\varphi_k=46,38^\circ$, $\lambda_k=58,82^\circ$.

5. Результаты расчетов показали высокую эффективность использования алгоритмов формирования терминального управления, основанных на последовательной линеаризации задачи, при спуске аэрокосмического аппарата в атмосфере.

Список литературы

1. Федоренко Р.П. Приближенное решение задач оптимального управления. - М.: Наука, 1978. - 488 с.
2. Голубев Ю.Ф., Хайруллин Р.З. К решению задач оптимального управления при входе в атмосферу // Космические исследования. 1987. Т.25. С.37.
3. Лазарев Ю.Н. Метод формирования номинального программного управления движением аэрокосмических летательных аппаратов. - Деп. ВИНТИ 14.04.92, N 1284-B92. - 33 с.
4. Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф., Сихарулидзе Ю.Р. Алгоритмы управления космическими аппаратами при входе в атмосферу. - М.: Наука, 1975. - 400 с.
5. Шкадов Л.М., Буханова Р.С., Илларионов В.Ф., Плохих В.П. Механика оптимального пространственного движения летательных аппаратов в атмосфере. - М.: Машиностроение, 1972. - 240 с.

УДК 629.782.015.07

Ю.Н.Лазарев, Лин Сяо Куй

УПРАВЛЕНИЕ СПУСКОМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В АТМОСФЕРЕ

1. Рассматривается траекторное движение космического аппарата (КА), совершающего спуск в атмосфере Земли. Считается, что КА имеет форму тела вращения, центр масс которого смещен от оси симметрии на некоторую величину. Такая компоновка позволяет получить балансирующий угол атаки, отличный от нуля, и обеспечивает при движении в атмосфере возникновение аэродинамической подъемной силы. Изменение скоростного угла крена приводит к изменению вертикальной и боковой