

УДК 629.78:681.513

В. И. КОРТУНОВ, А. С. КУЛИК

Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків

Алгоритмический контроль работоспособности реактивных двигателей космического летательного аппарата

Надійшла до редакції 22.06.01

Розв'язується задача ідентифікації номера реактивного двигуна, що відмовив, шляхом оцінювання збурюючих моментів і сил в режимах стабілізації і зближення космічного літального апарата з космічною станцією. Проаналізовані методи відновлення вхідних сигналів динамічних систем за критерієм точності і швидкодії. Подано результати моделювання оцінки збурюючих моментів і сил відмовних двигунів, отриманих методом ітеративно-інверсних моделей.

ВВЕДЕНИЕ

Система управления космического летательного аппарата (КЛА), выполняющего доставку грузов на орбиту, решает следующие основные задачи: ориентацию, стабилизацию и коррекцию орбиты в автономном полете, дальнейшее сближение, сближение и причаливание к космической станции (КС) в автоматическом режиме. Исполнительными органами системы управления КЛА являются реактивные двигатели (РД) стабилизации и причаливания. При проектировании системы управления учитываются возможные неисправности РД — невключение или неотключение по заявке от вычислительного комплекса. Парирование возникших неисправностей при неотключении РД на борту КЛА возможно путем отключения магистрали подачи топлива с целью обеспечения выполнения полетного задания. Средства определения состояния РД на борту путем прямого контроля не предусмотрены, а наземный контроль позволяет оценить неисправность только после существенного запаздывания. При отсутствии бортовых средств контроля состояния работы РД возникает задача косвенного контроля работоспособности путем сравнения расчетных моментов двигателей по заявке на включение или неотключение и оценочных моментов, определяемых по измерениям угловых скоростей и угловых величин.

Целью данной работы является алгоритмическое решение задачи идентификации номера отказавшего РД на основе оценивания возмущающих сил и моментов РД (далее просто возмущений) по следующим параметрам. В режиме стабилизации относительно центра масс — по вектору угловой скорости ω ; на участке сближения с КС — по углам пеленга (курса) ψ , тангажа ν , угловой скорости ω и радиальной дальности ρ до КС.

АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА КЛА

Под возмущающими воздействиями (моментами или силами) понимаем моменты и силы динамики КЛА, вызванные гравитационными и аэродинамическими силами, погрешностями изготовления и монтажа РД, отклонением массоинерционных характеристик от номинальных, неточности определения координат центра масс, а также разности расчетных и фактических моментов и сил управляющих РД. Оценку возмущающих моментов и сил можно рассматривать как задачу идентификации неизвестных входных сигналов по измерениям выходных, методы решения которой описаны в обзоре [3]. Выбор метода идентификации входных сигналов определяется требованиями быстродействия

получения амплитудных возмущений и степени устойчивости оценок к измерительным ошибкам или точности оценивания. Проанализируем по этим критериям следующие методы идентификации входных сигналов: 1) — расширенные наблюдатели состояния [2, 7], 2) — робастные наблюдатели с обратными динамическими моделями [4], 3) — итерационно-инверсные фильтры (ИИФ) оценивания [5, 6] и 4) — прямое дифференцирование с предварительной фильтрацией. Данные качественного анализа на тестовом примере типа двойного интегратора даны в таблице, из которой следует, что требованиям быстродействия и точности оценок возмущений удовлетворяет метод на основе итерационно-инверсных фильтров.

Данные качественного анализа

Метод	Быстродействие	Точность определения
1	низкое	высокая
2	среднее	средняя
3	высокое	высокая
4	высокое	низкая

Оценивание возмущений на основе итерационно-инверсных фильтров состоит в следующем. Пусть динамика КЛА для некоторой программной траектории представляется линейной дискретной системой с эквивалентным возмущением

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B_u u(k) + B_v v(k), \\ y(k+1) &= Cx(k) + D_u u(k) + D_v v(k) + \xi(k), \end{aligned} \quad (1)$$

где $x(k) \in R^n$ — вектор состояния динамики КЛА, $y(k) \in R^l$ — вектор измеряемых параметров, $u(k) \in R^m$ — вектор расчетных управляющих моментов и сил, $v(k) \in R^m$ — вектор эквивалентных возмущений, зависящий от параметров состояния и управления, неучтенной параметрической части динамики и внешних возмущений (отклонение моментов и сил РД от номинальных, несрабатывание РД и др.), $\xi(k) \in R^l$ — вектор случайных ошибок измерения выхода, A, B_u, B_v, C, D_u, D_v — матрицы соответствующих размерностей, R^n — евклидово пространство размерности n .

Предположим, что при неисправности РД разность расчетного и фактического моментов рассматриваемых двигателей превосходит по величине другие неконтролируемые моменты и силы. Получим уравнения вычисления оценок возмущений методом итерационно-инверсных моделей [5] для системы (1). Для этого запишем наблюдатель состояния на основе фильтра Калмана—Бьюси [8]

$$\begin{aligned} \bar{x}(k) &= A\hat{x}(k-1) + B_u u(k-1), \\ \hat{x}(k) &= \bar{x}(k) + L[y(k) - C\bar{x}(k) - D_u u(k)], \\ \hat{y}(k) &= C\hat{x}(k) + D_u u(k), \end{aligned} \quad (2)$$

где L — настраиваемая матрица наблюдателя. Вычтем системы уравнений (1) и (2), получим систему относительно ошибки оценивания:

$$\begin{aligned} \Delta x(k+1) &= (A - LCA)\Delta x(k) + (B_u LD_u - LCB_u)v(k), \\ \Delta y(k) &= C\Delta x(k) + D_v v(k) + \xi(k), \end{aligned} \quad (3)$$

или в операторной форме

$$\Delta y(k) = W_{\Delta y/v}(z, L)v(k) + \xi(k), \quad (4)$$

где

$$W_{\Delta y/v}(z, L) = C(Iz - A + LC)^{-1}(B_u - LD_u - LCB_u) + D_v$$

— дискретная передаточная функция по возмущению для ошибки оценки выхода, z — оператор сдвига и $zx(k) = x(k+1)$.

Представим операторное уравнение (4) в форме итерационной схемы, добавив к правой и левой части слагаемые $v(k)$:

$$v_j(k) = \lambda \Delta y(k) + (I - \lambda W_{\Delta y/v}(z, L))v_{j-1}(k), \quad (5)$$

где λ — скалярный параметр коррекции сходимости итерационной схемы решения операторного уравнения. Условием сходимости схемы (5) является неравенство [1]

$$\|I - \lambda W_{\Delta y/v}(z, L)\| < 1. \quad (6)$$

Выполнение условия (6) зависит от параметра коррекции сходимости λ и матрицы L параметризации фильтра оценивания состояния (2), которая должна удовлетворять двум критериям — быстродействию наблюдателя и скорости сходимости итерационной процедуры.

Выбор матрицы наблюдателя можно формализовать по следующей вычислительной схеме. Поскольку матрица L должна стабилизировать наблюдатель, то выполнение условия (6) возможно в классе стабилизируемых обратных связей по наблюдению, которым отвечает фильтр Калмана—Бьюси с настроенными матрицами Q и R [8]. В начале процедуры задаем ковариационную матрицу ошибок выходного вектора $R = \text{cov}[\xi(k)\xi^T(k)]$. На первом шаге синтеза для $Q = \gamma^2 I$, где γ — параметр оптимизации, примем $\gamma = \gamma_0$. На втором шаге вычислим $L(\gamma) = P(\gamma)C^T R^{-1}$, где $P(\gamma)$ — решение уравнения Рикатти. Если полученное решение не удовлетворяет условию (6), то, изменяя параметр γ , переходим к повторению второго шага. В противном случае решение считаем найденным и

переходим к анализу итерационно-инверсного фильтра.

Используя результаты из [5], итерационный фильтр можно записать в виде

$$\begin{aligned}\bar{x}_j^1(k+1) &= A\hat{x}_j^1(k) + B_0 u(k) + B_v \hat{v}_j(k), \\ \hat{x}_j^1(k) &= \bar{x}_j^1(k) + L(y(k) - C\hat{x}_j^1(k) - D_0 u(k) - D_v \hat{v}_j(k)), \\ \hat{y}_j^1(k) &= C\hat{x}_j^1(k) + D_0 u(k) + D_v \hat{v}_j(k), \\ \bar{v}_{j+1}(k) &= \hat{v}_j(k) + K_v [y(k) - \hat{y}_j^1(k)],\end{aligned}\quad (7)$$

где $K_v = [C(I - A + LCA)(B_v - LD_v - LCB_v) + D_v]^{-1}$, j — номер итерации, $\hat{v}_j(k)$ — оценка возмущения на k -м шаге временного цикла и j -й итерации.

Оценка возмущений на основе итерационно-инверсного фильтра (7) формируется в реальном масштабе времени с итерационным уточнением ее на каждом шаге измерения. Изменение числа итераций приводит к разновидности решения обратной задачи методом разложения оператора в ограниченный ряд Неймана [1].

Рассмотрим применение алгоритмов (7) для оценивания возмущающих моментов и сил в режимах стабилизации КЛА и сближения с КС.

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТРОЛЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РД

Задачу контроля работоспособности двигателей рассматриваем как задачу оценивания разности расчетных и фактических моментов и сил, действующих на КЛА. При различных режимах работы системы управления динамика КЛА описывается

различными уравнениями, поэтому рассмотрим задачу контроля РД для разных режимов движения.

Контроль работоспособности РД в режиме стабилизации КЛА относительно центра масс. Движение КЛА относительно центра масс в связанной системе координат (ССК) по одной из осей, например OX , можно представить уравнением

$$I_{xx} \dot{\omega}_x = \sum_{i=1}^p M_{xi} \eta_i + M_x^B, \quad (8)$$

где I_{xx} — осевой момент инерции; M_{xi} — проекция на ось OX момента от работы управляющего i -го двигателя, p — количество РД; η_i — состояние РД ($\eta_i = 0$ двигатель не включен, $\eta_i = 1$ двигатель включен); M_x^B — проекция на ось OX возмущающих моментов. Анализ возмущающих моментов по осям ССК, вызванных отклонением моментов инерции, технологическими погрешностями изготовления и монтажа двигателей, моментов гравита-

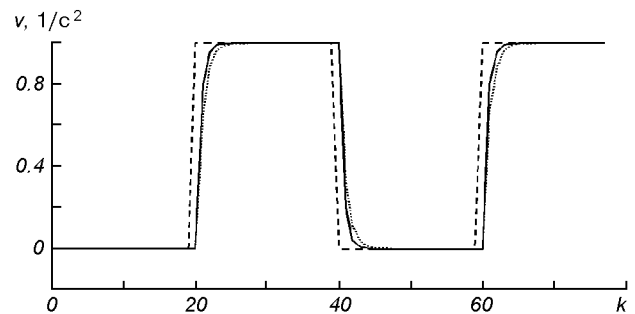


Рис. 1. Тестирование восстановления возмущений для движения КЛА по оси OX : штриховая кривая — истинное возмущение, сплошная — восстановленное при трех итерациях, пунктир — при одной итерации

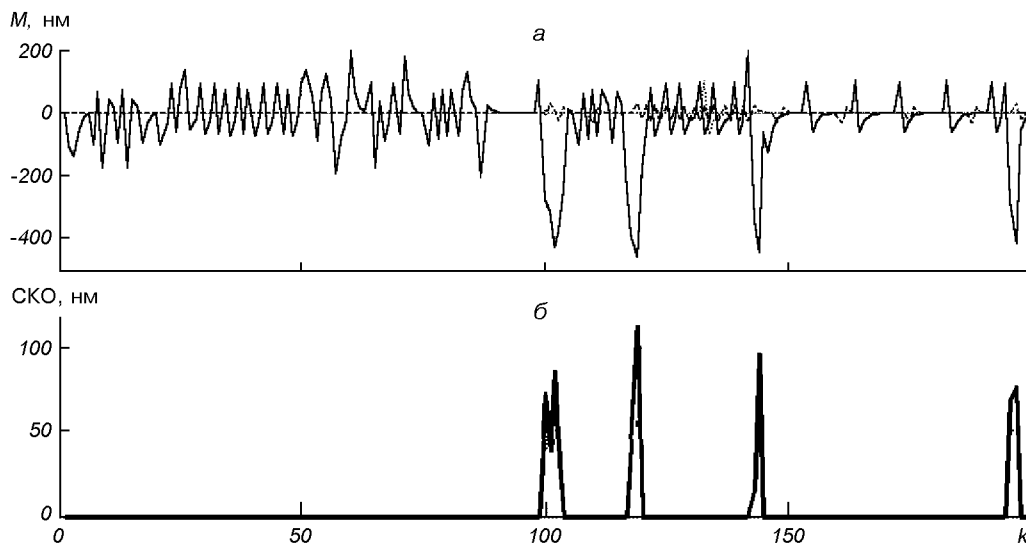


Рис. 2. Оценка проекции возмущающего момента по оси OX (а) и СКО разности расчетного и фактического моментов РД (б)

ционных и аэродинамических сил, показал, что оценка суммарного возмущающего момента не превосходит минимального управляющего момента от одного РД. Этот факт используем далее для идентификации номера отказавшего РД.

Уравнения ИИФ оценивания возмущающих моментов для модели (8) имеет вид, аналогичный (7). Результаты тестирования итерационного фильтра моделированием на входной сигнал типа меандра представлены на рис. 1. Быстродействие фильтра составляет 3—4 такта для периода квантования $T_s = 0.1$ с при имеющемся запаздывании в один такт. Результаты моделирования на данных полной модели системы управления КЛА при невключении РД с 100-го такта, представлены на рис. 2, а.

Среднее квадратичное отклонение расчетного и оценочного моментов отказавшего РД при невключении показано на рис. 2, б.

Из представленных результатов моделирования полной динамики системы управления заключаем о высокой вероятности обнаружения отказавшего двигателя стабилизации.

Контроль работоспособности РД в режиме сближения. На участке сближения КЛА и КС измеряемыми параметрами являются углы взаимной ориентации ψ и v , радиальная дальность ρ , а также угловые скорости вращения КЛА. Динамика сближения в угле курса ψ может быть представлена системой уравнений

$$\begin{aligned} \dot{\psi} &= \omega_y - \Omega_y, \\ \dot{\Omega}_y(t) &= M_{\Omega}^p(t) + M_{\Omega}^b(t), \end{aligned} \quad (9)$$

где ψ — угол пеленга (курса) на КС, ω_y — угловая скорость КЛА вокруг оси OY , Ω_y — угловая скорость линии визирования, $M_{\Omega}^p = a_{\Omega}/\rho$ — расчетный момент от ускорений, создаваемых двигателями причаливания, $M_{\Omega}^b(t)$ — возмущающий момент в канале курса. Параметры взаимного положения КЛА и КС определяются радиотехнической системой, которая измеряет угол курса ψ и дальность ρ . Запишем систему уравнений (9) в форме (1), матрицы которой имеют вид

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 1 & -0.5T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ B_u &= \begin{bmatrix} T_s & -0.5T_s^2 \\ 0 & T_s \end{bmatrix}, \\ B_v &= \begin{bmatrix} -0.5T_s^2 \\ T_s \end{bmatrix}, \\ C &= [1 \ 0], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_u &= [0 \ 0], \\ D_v &= [-0.6T_s^3], \end{aligned}$$

а компоненты векторов

$$\begin{aligned} x(k) &= [\psi(k) \ \Omega_y(k)]^T, \\ u(k) &= [\omega(k) \ M_{\Omega}^p(k)]^T, \\ v(k) &= [M_{\Omega}^b(k)]. \end{aligned}$$

Результаты тестирования фильтра моделированием при изменении настроечной матрицы L показаны на рис. 3. Относительно невысокое быстродействие фильтра в канале курса определяется в основном погрешностью измерения угла курса, влияние которой на дальности $\rho = 500 \dots 700$ м становится значительным, что и ограничивает выбор величины L . Результаты моделирования на данных из полной модели системы управления КЛА при неотключении РД показаны на рис. 4. Факт обнаружения неотключения двигателя устанавливается с пятой секунды.

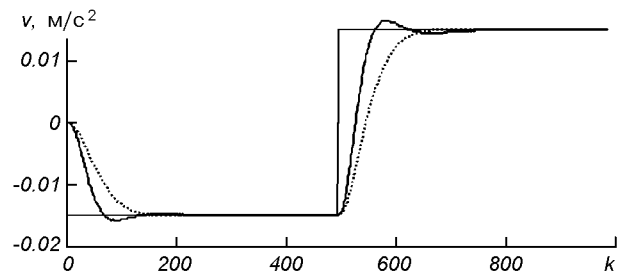


Рис. 3. Тестирование итерационного фильтра для режима сближения: пунктирная линия — одна итерация, сплошная — три итерации

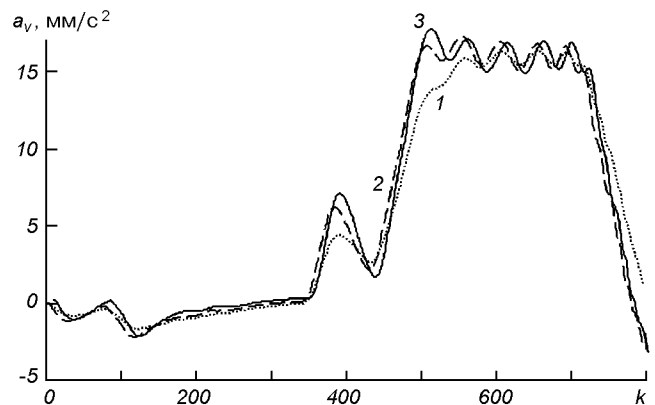


Рис. 4. Восстановленное ускорение на участке сближения от отказавшего РД с 400 такта (1...3 — номера итераций)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возможные отказы в работе РД приводят к снижению эффективности управления КЛА, увеличению затрат топлива и снижению вероятности выполнения полетного задания. При возникновении в системе управления РД неисправностей, связанных с неключением или неотключением двигателей стабилизации или причаливания, программно-алгоритмическое обеспечение бортовой системы контроля позволяет установить факт отказа РД и выработать рабочую конфигурацию РД для выполнения полетного задания. Это дает возможность увеличить вероятность выполнения функциональных задач КЛА с меньшими затратами топлива. Эффект достигается автоматическим парированием неисправностей по результатам оценивания возмущающих моментов и сил на КЛА.

1. Василенко Г. И. Теория восстановления сигналов: О редукации к идеальному прибору в физике и технике. — М.: Сов. радио, 1979.—272 с.
2. Гайдук А. Р. Оценивание воздействий и инвариантность // Автоматика и телемеханика.—1984.—№ 3.—С. 20—28.
3. Клейман Е. Г. Идентификация входных сигналов в динамических системах // Автоматика и телемеханика.—1999.—№ 12.—С. 3—15.
4. Костенко Ю. Т., Любчик Л. М. Методы решения обратных

задач автоматического управления. — Киев: УМК ВО, 1988.—48 с.

5. Кортунов В. И. Дискретные фильтры восстановления возмущений с заданной степенью астатизма // Весник Харьк. Гос. Полит. ун-та: Сб. науч. тр. (Системный анализ, управление и информационные технологии).—2000.— Вып. 121.—С. 118—123.
6. Кортунов В. И. Восстановление возмущений в динамической системе с заданной точностью // Системи обробки інформації. — Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ.—2000.— Вип. 3(9).—С. 55—60.
7. Радченко И. Ф. Об одном способе оценки возмущений // Автоматика.—1991.—№ 4.—С. 77—82.
8. Стрейц В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления: Пер. с англ / Под. ред. Я. З. Цыпкина. — М.: Наука, 1985.—296 с.

ALGORITHMIC MONITORING OF THE WORKING CAPACITY OF SPACECRAFT JET ENGINES

V. I. Kortunov, A. S. Kulik

The problem of defining the number of failed spacecraft jet engine by estimating the disturbance moments and forces during stabilization and closing in on a space station is solved. Methods for the reconstruction of input signals of dynamic systems are analyzed using the criterion of accuracy and speed of response. The results of modeling the estimation of disturbance moments and forces of failed engines obtained with the method of iteratively inverse models are presented.