

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ МИКРОСПУТНИКА

Разрабатывается алгоритм на основе субоптимального фильтра Калмана, позволяющий по информации бесплатформенной инерционной навигационной системы идентифицировать дефекты исполнительных органов системы управления ориентацией микроспутника при наличии шумов измерений и действии возмущающих моментов. Приводится математическое моделирование процессов ориентации микроспутника.

1. Постановка задачи

В настоящее время все большую актуальность приобретают проблемы разработки высокоточных систем управления (СУ) космическими аппаратами. Одним из наиболее перспективных направлений в области создания космической техники являются микроспутники [1]. Эффективность применения микроспутников и, следовательно, эффективность решаемых ими практических задач существенным образом зависит от технических характеристик СУ аппарата, поэтому требования к точностным и эксплуатационным характеристикам СУ достаточно жесткие. Дефекты исполнительных органов системы управления ориентацией (СУО) микроспутника могут приводить к невыполнению целевой задачи и раскрутке микроспутника до недопустимых угловых скоростей. Существующие методы контроля работоспособности СУО микроспутника [2, 3] являются достаточно грубыми, чтобы выявлять дефекты исполнительных органов на фоне действия внешних возмущающих моментов (гравитационных, аэродинамических, магнитных, световых и др.). Поэтому разработка алгоритмов идентификации дефектов исполнительных органов при наличии шумов измерений и действии внешних возмущающих воздействий является актуальной задачей. В настоящей статье для построения алгоритма идентификации дефектов исполнительных органов предлагается использовать фильтр Калмана [4]. В процессе исследований микроспутник рассматривается как абсолютно твердое тело (ТТ), не содержащее каких-либо движущихся масс [2]. СУО микроспутника включает силовой гироскопический комплекс (СГК), состоящий из n одинаковых гиродинов, три пары реактивных двигателей (РД) малой тяги и три инерционных маховика (ИМ), обеспечивающих управляющие моменты вдоль главных связанных осей инерции ТТ, в дальнейшем называемых связанными. В этих условиях динамика вращения микроспутника вокруг центра масс описывается следующим векторным уравнением Эйлера:

$$I\dot{\bar{\omega}} + (\bar{\omega} \times I\bar{\omega}) = \bar{M}_{УПР} + \bar{M}_B, \quad (1)$$

где $\bar{\omega}$ – вектор угловой скорости ТТ в проекциях на связанные оси; I – диагональная матрица главных моментов инерции; $\bar{M}_{УПР}$ – управляющий момент; \bar{M}_B – внешний возмущающий момент.

Наряду с динамическим уравнением рассматривается кинематическое уравнение, связывающее вектор угловой скорости $\bar{\omega}$ с углами поворота триэдра осей $Oxuz$ относительно триэдра осей некоторой базовой системы координат (БСК), начало которой совпадает с началом координат связанной системы координат (ССК), а оси определенным образом ориентированы в инерциальном пространстве и движутся поступательно. Пусть кватернион ориентации, компоненты которого являются параметрами Родрига-Гамильтона, полностью определяют угловое положение ССК относительно БСК. Понятие кватерниона ориентации становится однозначным лишь после того, как введена последовательность поворотов твердого тела вокруг осей Ox , Oy , Oz . Для данной последовательности поворотов воспользуемся кватернионной кинематической моделью сферического типа [5]:

$$\dot{\Lambda} = \frac{1}{2} \Lambda \circ \bar{\omega}; \quad (2)$$

$$\Lambda^*(t) = \Lambda_1(t) \circ \Lambda_2(t) \circ \Lambda_3(t), \quad (3)$$

где $\Lambda_i(t) = \cos\left(\frac{\Psi_i(t)}{2}\right) + \sin\left(\frac{\Psi_i(t)}{2}\right) \cdot \bar{b}_i$, $i = \overline{1,3}$.

Кватернионное кинематическое уравнение (2) представляют собой систему четырех линейных невырождающихся уравнений, которые удовлетворяют одному уравнению связи для нормирования кватерниона

$$\lambda_0^2 + \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 = 1.$$

Система уравнений (1) и (2) описывает угловое движение твердого тела относительно БСК. Текущее значение $\bar{\omega}$ оценивается в системе по информации измерителя угловой скорости, измеряющего интегралы от проекций вектора абсолютной угловой скорости микроспутника на оси чувствительности прибора.

Интегрируя кинематическое уравнение (2) в бортовой цифровой вычислительной машине (БЦВМ) при начальных значениях углов, а также уравнения движения центра масс микроспутника (1) при соответствующих начальных условиях, реализуют бесплатформенную инерциальную навигационную систему (БИНС). Таким образом, считаем, что текущие величины углов непрерывно вычисляются в БИНС.

Управляющий момент $\bar{M}_{УПР} = \bar{M}_{РД} + \bar{M}_{ГД} + \bar{M}_{ИМ}$ формируется в соответствии с логикой закона управления исполнительных органов СУО микроспутника (реактивных двигателей, гироскопов, инерционных маховиков) и обеспечивает заданное угловое положение микроспутника. Источником внешнего возмущающего момента $\bar{M}_В = \bar{M}_{АЭР} + \bar{M}_{ГРВ} + \bar{M}_{МГН} + \bar{M}_{СВТ}$ является взаимодействие микроспутника с внешней средой, приводящее к появлению воздействия на корпус внешних сил – аэродинамического, гравитационного, магнитного, светового [3].

Законы управления для исполнительных органов СУО микроспутника имеют следующий вид:

а) для реактивных двигателей

$$\bar{M}_{РД} = \{R^3 \mid |M_i| \leq m_i, i = \overline{1,3}\}; \quad (4)$$

б) для гироскопов

$$\bar{M}_{ГД} = -(\bar{\omega} \times \bar{H}) + L(\bar{\beta}) \cdot \dot{\bar{\beta}}; \quad (5)$$

где $H(\bar{\beta})$ – собственный кинетический момент СГК; $L(\bar{\beta})$ – матрица, элементы которой являются функциями от $\bar{\beta}$ – углов прецессии ГД, $\dot{\bar{\beta}}$ – скорости прецессии гироскопов, причем $\bar{\beta} = \{R^n \mid |\beta_i| \leq \beta_{\max}, i = \overline{1,n}\}$;

в) для инерционных маховиков

$$\bar{M}_{ИМ} = -(\bar{\omega} \times \bar{h}) + J\dot{\bar{\Omega}}, \quad (6)$$

здесь \bar{h} – собственный кинетический момент системы ИМ, J – осевой момент инерции ИМ; $\bar{\Omega}$ – вектор угловых скоростей вращения маховиков относительно ТТ, причем

$$\bar{\Omega} = \{R^3 \mid |\dot{\Omega}_i| \leq \dot{\Omega}_{\max}, |\Omega_i| \leq \Omega_{\max}, i = \overline{1,3}\}.$$

Внешние возмущающие моменты в зависимости от физической природы описываются следующим образом:

а) аэродинамический возмущающий момент

$$\bar{M}_{АЭР} = \int_S \bar{r} \times d\bar{F}, \quad (7)$$

где \bar{r} – радиус-вектор площадки, имеющий начало в центре масс тела; $d\bar{F}$ – вектор силы взаимодействия тела и среды;

б) гравитационный возмущающий момент

$$\bar{M}_{ГРВ} = \int_S \bar{p} \times d\bar{G}, \quad (8)$$

здесь \bar{r} – радиус-вектор некоторой элементарной массы материального тела; $d\bar{G}$ – вектор силы тяжести, действующей на эту элементарную массу;

в) магнитный возмущающий момент

$$\bar{M}_{\text{МГН}} = \bar{L} \times \bar{B}, \quad (9)$$

где \bar{L} – вектор магнитного момента; \bar{B} – вектор магнитной индукции;

г) момент от светового давления

$$\bar{M}_{\text{СВТ}} = \int_S \bar{r} \times d\bar{f}, \quad (10)$$

\bar{r} – радиус-вектор площадки, имеющий начало в центре масс микроспутника; $d\bar{f}$ – вектор суммарной силы, действующей на элемент поверхности микроспутника.

Целью настоящей работы является получение алгоритма идентификации дефектов исполнительных органов СУО микроспутника при наличии шумов измерений и действии возмущающих моментов.

Алгоритм обработки данных в бесплатформенной инерциальной навигационной системе строится с использованием субоптимального дискретного фильтра Калмана [4].

Векторные уравнения (1) и (2) в скалярном виде представляют систему из 7 уравнений:

$$\begin{cases} J_x \dot{\omega}_x - (J_y - J_z) \omega_y \omega_z = M_{\text{упrx}} + M_{\text{вx}}, \\ J_y \dot{\omega}_y - (J_z - J_x) \omega_z \omega_x = M_{\text{упry}} + M_{\text{вy}}, \\ J_z \dot{\omega}_z - (J_x - J_y) \omega_x \omega_y = M_{\text{упrz}} + M_{\text{вz}}, \\ \dot{\lambda}_0 = -0,5(\lambda_1 \omega_x + \lambda_2 \omega_y + \lambda_3 \omega_z), \\ \dot{\lambda}_1 = 0,5(\lambda_0 \omega_x + \lambda_2 \omega_z - \lambda_3 \omega_y), \\ \dot{\lambda}_2 = 0,5(\lambda_0 \omega_y + \lambda_3 \omega_x - \lambda_1 \omega_z), \\ \dot{\lambda}_3 = 0,5(\lambda_0 \omega_z + \lambda_1 \omega_y - \lambda_2 \omega_x). \end{cases} \quad (11)$$

2. Решение задачи идентификации дефектов исполнительных органов системы управления

При получении численного решения дифференциальных уравнений движения микроспутника (11) был выбран многошаговый метод Рунге-Кутты 4-го порядка. При численной реализации необходимо выбрать шаг h численного интегрирования рассматриваемых дифференциальных уравнений или, что эквивалентно, общее количество шагов N на временном интервале решения. Для рассматриваемого интервала в 100 с было выбрано $N=100000$.

Для малых угловых отклонений осей ССК от БСК и при условии $I_x \approx I_y \approx I_z$ уравнения (11) запишем в виде

$$\begin{cases} J_j \dot{\omega}_j = M_{\text{упrj}} + M_{\text{вj}}, \\ \dot{\phi}_j = \omega_j. \end{cases} \quad (j = x, y, z)$$

Тогда для построения системы оценки вектора состояния микроспутника примем следующую модель объекта наблюдения:

$$\begin{cases} \dot{\phi}_j = \omega_j, \\ \dot{\omega}_j = m_{\text{вj}} + m_j u_j, \\ \dot{m}_{\text{вj}} = 0, \end{cases} \quad (12)$$

где $m_j = M_{\text{упrj}} / J_j$ – эффективность управляющего момента; $M_{\text{упrj}}$ – управляющий момент; $m_{\text{вj}} = M_{\text{вj}} / J_j$ – эффективность возмущающего момента; u_j – сигнал управления; $j=x, y, z$.

Запишем систему уравнений (12) в стандартной векторно-матричной форме, дополнив ее уравнением измерений

$$\begin{cases} \dot{x}_j = Ax_j + Bu_j, \\ z_j = Hx_j + \xi_j, \end{cases}$$

где x_j – вектор состояния; z_j – вектор измерений; ξ_j – шум измерений;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ m_j \\ 0 \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, j=x, y, z.$$

Используя критерий Калмана, несложно показать, что такая система является полностью наблюдаема $\text{rank}[H^T \ A^T H^T (A^T)^2 H^T] = n=3$, где n – порядок системы.

Реализация в бортовом вычислителе дискретного фильтра Калмана сводится к оценке вектора состояния по следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{K+1,j} &= \Phi_{Kj} \hat{x}_{Kj} + K_{K+1,j} (z_{K+1,j} - H_j \Phi_{Kj} x_{Kj}); \\ K_{K+1,j} &= P_{K+1,j}^* H_j^T (H_j P_{K+1,j}^* H_j^T + R_{Kj})^{-1}; \\ P_{K+1,j} &= P_{K+1,j}^* - K_{K+1,j} H_j P_{K+1,j}^*; \\ P_{K+1,j}^* &= \Phi_{Kj} P_{Kj} \Phi_{Kj}^T, \end{aligned} \quad (13)$$

где \hat{x}_{Kj} – оценка вектора состояния; Φ_{Kj} – переходная матрица для вектора состояния; H_j – матрица измерений; P_{Kj} – ковариационная матрица ошибок фильтрации; P_{Kj}^* – ковариационная матрица ошибок прогноза; K_{Kj} – матричный коэффициент усиления; R_{Kj} – ковариационная матрица шумов измерения; $j = x, y, z$.

Работа алгоритма основана на анализе величины оцениваемого в фильтре Калмана возмущающего момента. Если математическое ожидание оценки возмущающего момента, вычисленного на некоторой временной базе, где управление равно нулю, превосходит допустимый порог, то принимается решение о дефекте исполнительного органа СУО микроспутника.

Для проверки работоспособности алгоритма проведено математическое моделирование процессов ориентации микроспутника при возникновении дефекта его исполнительного органа СУО на временном интервале 100 с. Моделирование проводилось для нескольких типов дефектов. Моменты инерции микроспутника принимались равными 10 Нмс² в трех каналах, величина управляющего момента принималась равной 5 Нм, а величина внешнего возмущающего момента – 0,2 Нм в каждом канале управления. Проекция начальной угловой скорости микроспутника задавались равными 0,01 рад/с в трех каналах.

Графики процессов микроспутника приведены на рис. 1-4. На них показаны компоненты векторов угловой скорости и углового ускорения вращения микроспутника, кватерниона ориентации и суммарного управляющего момента микроспутника соответственно.

Как показали результаты моделирования, понижение момента при дефекте исполнительного органа СУО микроспутника приводит к увеличению времени идентификации дефектов. Моделирование показало также, что существенное повышение уровня шумов измерений не приводит к значительному снижению чувствительности системы к выявлению дефектов.

Таким образом, предложенный на основе фильтра Калмана алгоритм позволяет идентифицировать дефекты исполнительных органов СУО микроспутника при наличии шумов измерений и действии возмущающих моментов.

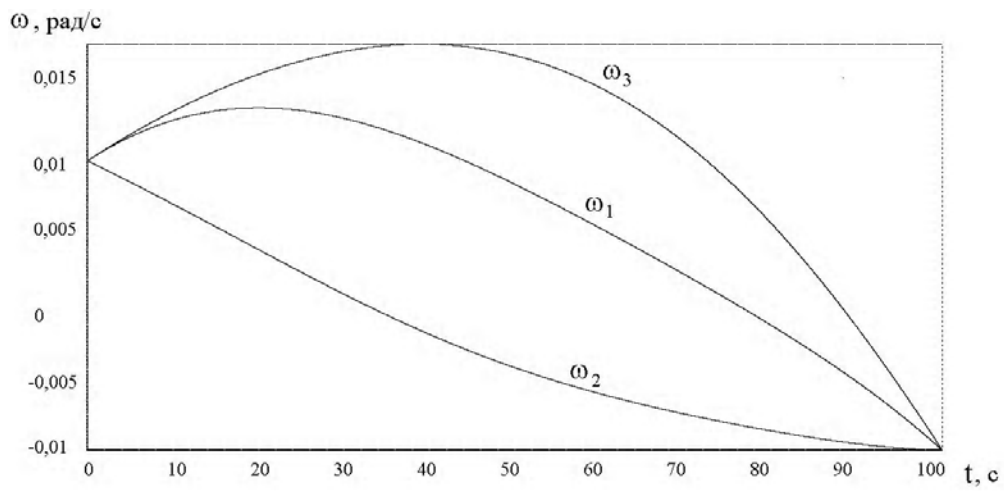


Рис. 1. Угловая скорость вращения микроспутника

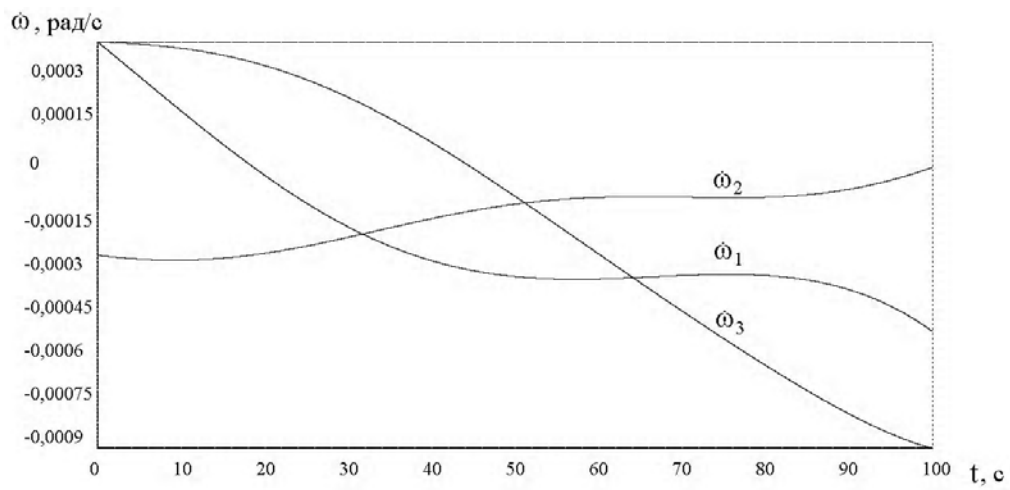


Рис. 2. Угловое ускорение вращения микроспутника

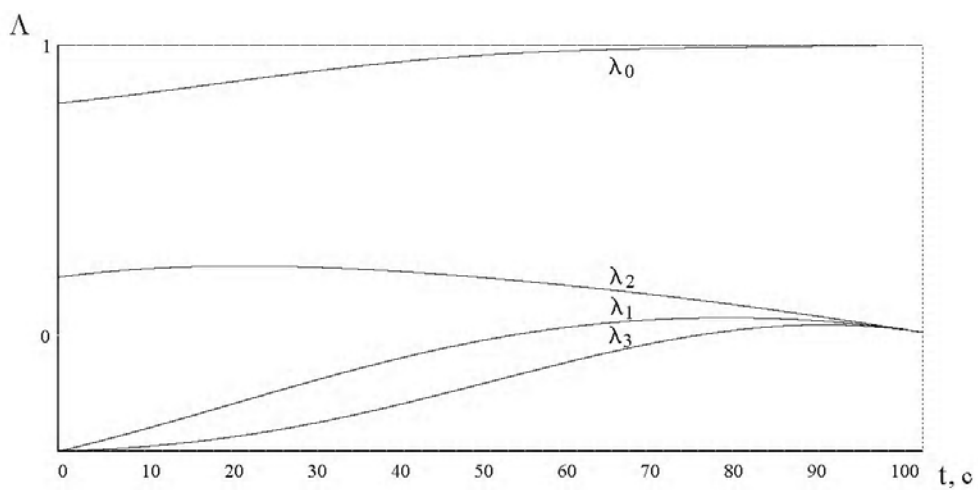


Рис. 3. Кватернион ориентации микроспутника

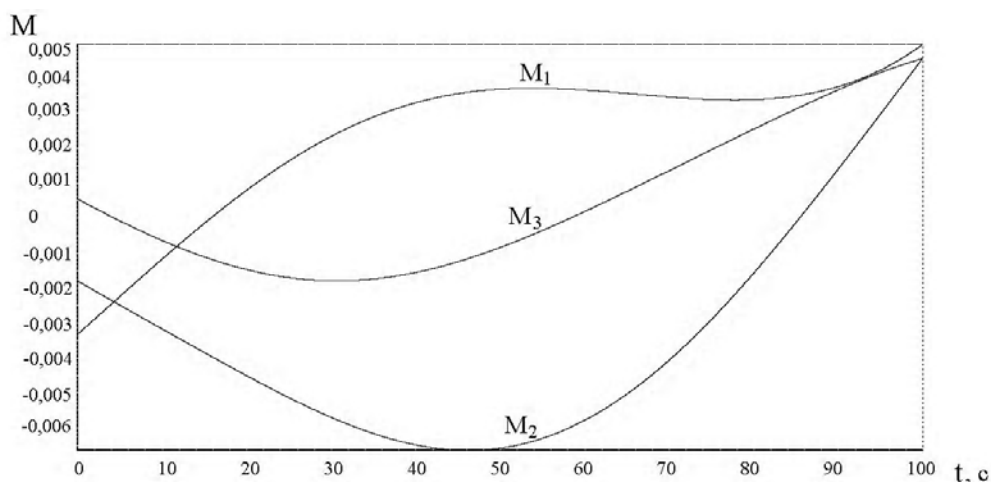


Рис. 4. Суммарный управляющий момент микроспутника

3. Заключение

Предложенный на основе фильтра Калмана алгоритм позволяет идентифицировать дефекты исполнительных органов СУО микроспутника при наличии шумов измерений и действиях возмущающих моментов.

Научная новизна: разработан алгоритм на основе субоптимального фильтра Калмана, позволяющий по информации бесплатформенной инерционной навигационной системы идентифицировать дефекты исполнительных органов системы управления ориентацией микроспутника при наличии шумов измерений и действиях возмущающих моментов.

Практическая значимость: разработано алгоритмическое и программное обеспечение для блока диагностики информационно-управляющих систем транспортных средств.

В дальнейших исследованиях для диагностики и контроля отказов исполнительных органов системы управления ориентацией микроспутника целесообразно использовать элементы искусственного интеллекта, такие как искусственные нейронные сети и методы эволюционного моделирования.

Список литературы: 1. Черный И. Интерес к малым спутникам растет / И. Черный, Л. Розенблюм // Новости космонавтики. 2008. Т.18, №3(302). С. 71. 2. Алексеев К.Б. Управление космическими летательными аппаратами / К.Б. Алексеев, Г.Г. Бебенин. М.: Машиностроение, 1974. 340 с. 3. Раушенбах Б.В. Управление ориентацией космических аппаратов / Б.В. Раушенбах, Е.Н. Токарь. М.: Наука, 1974. 600 с. 4. Калман Р.Э. Очерки по математической теории систем / Р.Э. Калман, П.Л. Фалб, М.А. Арбиб. М.: Едиториал УРСС, 2004. 400 с. 5. Бранец В.Н. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.Н. Бранец, И.П. Шмыглевский. М.: Наука, 1992. 280 с.

Поступила в редколлегию 12.05.2011

Никонов Олег Яковлевич, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой информатики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Научные интересы: информационные технологии, системы и процессы управления, математическое моделирование. Адрес: Украина, 61002, Харьков, ул. Петровского, 25, тел.: (057) 707-37-74, e-mail: nikonov@khadi.kharkov.ua.

Назаров Алексей Сергеевич, старший преподаватель кафедры информатики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Научные интересы: системы и процессы управления, математическое моделирование. Адрес: Украина, 61002, Харьков, ул. Петровского, 25, тел.: (057) 707-37-74.