УДК 681.5.015; 629.7.05

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УГЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПО ВИДЕОСНИМКАМ

Н.Н. Сальников
Институт космических исследований НАН Украины
Украина, 03187, Киев, пр. академика Глушкова, 40, корп. 4/1
E-mail: salnikov.nikolai@gmail.com

С.В. Мельничук
Институт космических исследований НАН Украины
Украина, 03187, Киев, пр. академика Глушкова, 40, корп. 4/1
E-mail: sergvik@ukr.net

В.Ф. Губарев
Институт космических исследований НАН Украины
Украина, 03187, Киев, пр. академика Глушкова, 40, корп. 4/1
E-mail: v.f.gubarev@gmail.com

Ключевые слова: навигация, сближение и стыковка, космический аппарат, ориентация, эллипсоидальное оценивание, нелинейные динамические системы.

Аннотация: В работе рассматривается использование эллипсоидального фильтра для высокоточного определения параметров углового движения некооперируемого космического аппарата (НКА) с использованием информации об относительной ориентации НКА, получаемой с использованием системы технического зрения, которая установлена на сервисном космическом аппарате.

1. Введение

Последние десятилетия интенсивно ведутся работы по созданию сервисных космических аппаратов (СКА) для инспекции и обслуживания некооперируемых космических аппаратов (НКА), утратившими способность совершать управляемые маневры и не оснащенными специальными средствами для стыковки. Важной составляющей этих операций является сближение и стыковка, на заключительных этапах которых используются оптические системы определения относительного положения и ориентации НКА относительно СКА [1]. В частности, система технического зрения (СТЗ) [2,3] позволяет решать эту задачу на основе использования трехмерной графической модели и снимков НКА, получаемых с помощью камеры, установленной на СКА. Увеличение точности этой системы сопряжено с увеличением объема хранимой информации и снижением быстродействия.

Точность СТЗ можно улучшить, если дополнить ее алгоритмами фильтрации помех с использованием динамической модели НКА. Более того, с ее помощью кроме относительного положения в пространстве и углового положения можно определить скорость сближения космических аппаратов и угловую скорость вращения НКА, что необходимо для успешного выполнения маневра сближения и стыковки СКА с НКА.

Динамику орбитального движения и движения вокруг центра масс можно рассматривать отдельно. Многочисленные наблюдения свидетельствуют, что космические аппараты с неработающей системой управления, находясь на орбите, приобретают вращательное движение. Для осуществления стыковки с вращающимся НКА более критичным является точность определения параметров движения вокруг центра масс. Именно поэтому в данной работе рассматривается задача повышения точности определения этих параметров с использованием динамического фильтра.

Для фильтрации используется одна из модификаций [4,5] алгоритмов гарантированного оценивания с помощью эллипсоидов [6-8]. Основные достоинства используемых алгоритмов заключаются в высокой скорости сходимости, эффективном применении для нелинейных систем и в их грубости по отношению к возможным нарушениям априорных гипотез о свойствах неопределенных величин.

2. Задача определения ориентации НКА

Уравнение динамики углового движения НКА

(1) $$J\dot{\omega} + \omega \times J\omega = M$$

рассматривается в системе координат, жестко связанной с НКА (СК НКА), ее начало помещено в центре масс, а оси совпадают с главными осями инерции НКА. В уравнении (1) вектор угловой скорости $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^{\mathrm{T}}$ определяется своими компонентами в СК НКА, вектор моментов $M = (M_1, M_2, M_3)^{\mathrm{T}}$, действующих на НКА, матрица моментов инерции $J = \mathrm{diag}(J_1, J_2, J_3)$ предполагается известной. Моменты, действующие на НКА, обусловлены действием солнечного излучения, потоками частиц, действием гравитационного момента. Все эти моменты достаточно слабые, их действие проявляется на временном промежутке, который существенно больше времени, требуемого для сближения и стыковки. За это время действием указанных моментов можно пренебречь и считать, что $M = 0$ в уравнении (1).

Полагаем, что определена некоторая инерциальная система координат (ИСК), относительно которой рассматривается навигация НКА и СКА. Изменение ориентации НКА относительно ИСК описывается следующим уравнением

(2) $$\dot{q} = \frac{1}{2}\Omega(q) \cdot \omega,$$

где $q = (q_0, q_1, q_2, q_3)^{\mathrm{T}}$ — кватерниона ориентации СК НКА относительно ИСК, матрица

$$\Omega(q) = \begin{pmatrix} -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_3 & q_0 & -q_1 \\ -q_2 & q_1 & q_0 \end{pmatrix}.$$

Вектор q в уравнении (2) и во всех последующих уравнениях нормирован

(3) $$\| q \| = q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1.$$

Начальные векторы $q_0 = q(t_0)$ и $\omega_0 = \omega(t_0)$ в уравнениях (1) и (2) неизвестны.

Предполагается, что навигационные приборы СКА позволяют определить его ориентацию относительно ИСК с большой точностью, т.е. в каждый момент времени известен соответствующий кватернион q_k^s. Для кватерниона $q(t_k) = q_k$, фигурирующего в уравнении (2), в момент времени t_k можно записать следующее точное соотношение

(4) $$q_k = q_k^s * q_k^n = C(q_k^s) q_k^n ,$$

где q_k^n – кватернион ориентации СК НКА относительно СК СКА, * – означает умножение кватернионов [9], матрица

$$C(q^s) = \begin{pmatrix} q_0^s & -q_1^s & -q_2^s & -q_3^s \\ q_1^s & q_0^s & -q_3^s & q_2^s \\ q_2^s & q_3^s & q_0^s & -q_1^s \\ q_3^s & -q_2^s & q_1^s & q_0^s \end{pmatrix}.$$

Кватернион q_k^n измеряется СТЗ с некоторой ошибкой

(5) $$q_k^n = \tilde{q}_k^n + \xi_k ,$$

где $\tilde{q}_k^n$ – значение q_k^n, полученное СТЗ, $\xi_k = (\xi_{0,k}, \xi_{1,k}, \xi_{2,k}, \xi_{3,k})^{\mathrm{T}}$ – вектор ограниченных погрешностей, для компонент которого известны оценки

(6) $$| \xi_{i,k} | \le c_{i,k}, \quad i = \overline{0,3} .$$

Из (4) и (5) заключаем, что

(7) $$G_k q_k - \tilde{q}_k^n = \xi_k , \; G_k = C^{-1}(q_k^s) ,$$

Из уравнений (6) и (7) следует, что неизвестный кватернион ориентации q_k должен удовлетворять следующим неравенствам

(8) $$| G_{i,k} q_k - \tilde{q}_{i-1,k}^n | \le c_{i-1,k}, \quad i = \overline{1,4}, \quad k = 1,2,\ldots$$

Здесь $G_{i,k}$ – i-я строка матрицы G_k.

Дифференциальные уравнения (1), (2) представляют нелинейные уравнения динамической системы в непрерывном времени, вектор состояния которой имеет вид $x = (\omega^{\mathrm{T}}, q^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}}$. В дискретные моменты времени он должен удовлетворять неравенствам (8), связанными с измерениями. Кроме того, для компоненты q вектора x должно выполняться условие нормировки (3).

Требуется указать способ коррекции оценок $\hat{x}_k$, вычисляемых в силу уравнений (1) и (2), при которой, начиная с некоторого конечного момента времени K, они будут удовлетворять неравенствам (8), связанным с измерениями.

Относительно помех измерения известно только то, что они ограничены, поэтому для решения этой задачи применяется гарантированный подход [6-8]. Поскольку информация о начальном векторе состояния отсутствует и система нелинейная, воспользуемся модифицированным алгоритмом эллипсоидального оценивания [4,5].

3. Эллипсоидальное оценивание параметров ориентации

Рассмотрим построение эллипсоидальных оценок для вектора состояния системы (1) и (2). Пусть в момент времени t_k известно, что вектор состояния $x_k \in E_k$, где эллипсоид $E_k = \{x : (x - \hat{x}_k)^T H_k^{-1} (x - \hat{x}_k) \le 1\}$. Можно записать, что

$$x_k = \hat{x}_k + \Delta x_k ,$$

где вектор $\Delta x_k \in E_k(0) = \{x : x^T H_k^{-1} x \le 1\}$, $E_k(0)$ — эллипсоид с центром в начале координат. Обозначим $\tilde{x}(t) = (\tilde{\omega}^{\mathrm{T}}, \tilde{q}^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}}$ решение уравнений (1) и (2) на интервале $[t_k, t_{k+1}]$ при начальном условии $\tilde{x}(t_k) = \hat{x}_k$.

Подставим выражение $x(t) = \tilde{x}(t) + \Delta x(t)$ в уравнения (1) и (2). После отбрасывания членов порядка больше первого получаем для $\Delta x(t) = (\Delta\omega^{\mathrm{T}}, \Delta q^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}}$ следующее дифференциальное уравнение

$$\Delta\dot{x} = \begin{pmatrix} A(\tilde{\omega}) & \Theta_4 \\ 0.5\Omega(\tilde{q}) & 0.5 A_\Omega(\tilde{\omega}) \end{pmatrix} \Delta x ,$$

где Θ_4 – нулевая матрица размера 4×4, матрицы

$$A(\omega) = \begin{pmatrix} 0 & (J_2 - J_3) J_1^{-1} \omega_3 & (J_2 - J_3) J_1^{-1} \omega_2 \\ (J_3 - J_1) J_2^{-1} \omega_3 & 0 & (J_3 - J_1) J_2^{-1} \omega_1 \\ (J_1 - J_2) J_3^{-1} \omega_2 & (J_1 - J_2) J_3^{-1} \omega_1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$A_\Omega(\omega) = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_1 & -\omega_2 & -\omega_3 \\ \omega_1 & 0 & \omega_3 & -\omega_2 \\ \omega_2 & -\omega_3 & 0 & \omega_1 \\ \omega_3 & \omega_2 & -\omega_1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Для построения матрицы эллипсоида $E_{k+1|k}$ будем использовать следующий приближенный разностный аналог этого уравнения

$$\Delta x_{k+1} = \mathrm{A}_{k+1} \Delta x_k ,$$

где матрица

$$\mathrm{A}_{k+1} = \exp\left[\begin{pmatrix} A(\omega_{k+1/2}) & \Theta_4 \\ 0.5\Omega(q_{k+1/2}) & 0.5 A_\Omega(\omega_{k+1/2}) \end{pmatrix} \Delta t \right].$$

Здесь $\omega_{k+1/2} = 0.5(\tilde{\omega}_{k+1} + \hat{\omega}_k)$, а кватернион $q_{k+1/2}$ равен нормированному кватерниону $0.5(\tilde{q}_{k+1} + \hat{q}_k)$. Окончательно полагаем

$$E_{k+1|k} = \{x : (x - \hat{x}_{k+1|k})^{\mathrm{T}} H_{k+1|k}^{-1} (x - \hat{x}_{k+1|k}) \le 1\},$$

где $\hat{x}_{k+1|k} = \tilde{x}(t_{k+1})$, матрица $H_{k+1|k} = \mathrm{A}_{k+1} H_k \mathrm{A}_{k+1}^{\mathrm{T}}$.

Рассмотрим способ построения эллипсоида E_{k+1}. Множество $\overline{X}_{k+1}$ векторов x_{k+1}, удовлетворяющее измерениям, можно представить в следующем виде

$$\overline{X}_{k+1} = \bigcap_{j=1}^{4} \overline{X}_{j,k+1} ,$$

где каждое из множеств

(9) $$\overline{X}_{j,k+1} = \{x \in R^n : | C_{j,k+1} x - \tilde{q}^n_{j-1,k+1} | \le c_{j-1,k+1}\}, \quad j = \overline{1,4} ,$$

связано с одним из неравенств (8), рассматриваемых для момента времени $k+1$. В уравнении (9) $C_{j,k+1}$ — j –я строка матрицы $C_{k+1} = (\Theta_{4\times 3} : G_{k+1})$.

Каждое из множеств $\overline{X}_{j,k+1}$, $j = \overline{1,4}$, как следует из (9), является многомерным слоем в R^n. Построение эллипсоида E_{k+1}, содержащего пересечение множеств $\overline{X}_{j,k+1}$, $j = \overline{1,4}$, с эллипсоидом $E_{k+1|k}$ осуществляется итерационно с использованием алгоритма, изложенного в [4]. Для начального эллипсоида полагаем $\widetilde{E}_{s=0} = E_{k+1|k}$. В качестве эллипсоида $\widetilde{E}_1$ берется эллипсоид минимального объема, содержащий пересечение $\widetilde{E}_0 \cap \overline{X}_{1,k+1}$. В общем случае эллипсоид $\widetilde{E}_{s+1}$ содержит пересечение $\widetilde{E}_s \cap \overline{X}_{1+(s+4) \bmod 4, k+1}$. Этот процесс остановится [4] при некотором конечном $s = N$. Вектор центра получаемого в результате эллипсоида $\widetilde{E}_N$ будет удовлетворять неравенствам (9). Нормировка оценки кватерниона выполняется на каждом шаге построения эллипсоида $\widetilde{E}_s$ с помощью операции сжатия пространства R^n по части переменных, при которой области изменения остальных координат векторов из эллипсоида $\widetilde{E}_s$ не изменяются. Окончательно полагаем $E_{k+1} = \widetilde{E}_N$.

4. Результаты численного моделирования

В качестве модельного примера для НКА были взяты характеристики спутника TOPEX/Poseidon. Моменты инерции спутника $J_1 = 8098$ кгм^2, $J_2 = 7618$ кгм^2, $J_3 = 3616$ кгм^2. Начальные значения угловой скорости $\omega(t_0) = (0.005, 0.010, 0.020)^{\mathrm{T}}$ и кватерниона ориентации СК НКА относительно ИСК $q(t_0) = (0.1005, 0.5025, 0.3015, 0.8040)^{\mathrm{T}}$ были выбраны произвольными, но считались неизвестными. Длительность процесса оценивания составляла 300 секунд, период дискретности по времени $\Delta t = 1$ с. Точность оценивания угловой скорости достигла значения 0.001 рад/сек, что составляет не более 5 % от номинального значения за время около 50 с. Точность оценивания кватерниона за это же время достигла значения 0.001, что в 20 раз меньше максимальной величины $\xi_{i,k}$. Наиболее существенное увеличение точности происходило за первые 20 тактов оценивания.

Список литературы

1. Opromolla R., Fasano G., Rufino G., Grassi M. A review of cooperative and uncooperative spacecraft pose determination techniques for close proximity operations // Progress in Aerospace Sciences. 2017. Vol. 93. P. 53-72.
2. Губарев В.Ф., Боюн В.П., Мельничук С.В., Сальников Н.Н., Симаков В.А., Комисаренко В.И., Годунок Л.А., Деркач С.В., Добровольский В.Ю., Матвиенко С.А. Использование систем технического зрения для определения параметров относительного движения космических аппаратов // Проблемы управления и информатики. 2016. № 6. С. 103-119.
3. Melnychuk S.V., Gubarev V.F., Salnikov N.N. Using information features in computer vision for 3D pose estimation in space // Кибернетика и вычислительная техника. 2017. № 4. С.32-54.
4. Сальников Н.Н. Об одной модификации алгоритма оценивания параметров линейной регрессии с помощью эллипсоидов // Проблемы управления и информатики. 2012. № 2. С. 65-81.
5. Сальников Н.Н. Эллипсоидальное оценивание состояний и параметров динамической системы при отсутствии априорной информации // Проблемы управления и информатики. 2014. № 2. С. 144-156.
6. Избранные труды А.Б.Куржанского / Отв. ред. А.Н.Дарьин, И.А. Дигайлова, И.В.Рублев. М.: Издательство Московского университета, 2009. 756 с.
7. Черноусько Ф.Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. Метод эллипсоидов. М.: Наука, 1988. 320 с.
8. Schweppe F.C. Uncertain dynamic systems. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1973. 563 p.
9. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. М.: Наука, 1971. 320 с.