

**Куренков В.И.****МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕОРИЕНТИРОВАННОГО ПОЛЕТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ОЦЕНКИ СРЕДНЕГО КОСИНУСА УГЛА МЕЖДУ НАПРАВЛЕНИЕМ НА СОЛНЦЕ И НОРМАЛЬЮ К ПОВЕРХНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ**

Одним из требований, предъявляемых к современным высокопроизводительным космическим аппаратам (КА) детального и оперативного зондирования Земли с длительным сроком активного существования, является требование по сохранению работоспособного состояния отдельных бортовых систем КА в режиме неориентированного полета. Выполнение этого требования, как правило, связано с ограничениями по мощности системы электропитания в неориентированном полете, характеристики которой, в частности, зависят от среднего косинуса угла между направлением на Солнце и нормалью к поверхности солнечной батареи (в дальнейшем «косинус альфа»).

По своей физической природе задача определения среднего косинуса альфа в неориентированном полете имеет вероятностный характер. Аналитические методы оценки вероятностных характеристик среднего косинуса альфа не могут с достаточной степенью точности учесть влияние многих факторов, влияющих на косинус альфа в процессе неориентированного полета КА по орбите Земли. Поэтому для решения этой задачи можно использовать метод имитационного моделирования, возможности которого ограничиваются лишь ресурсами ЭВМ.

За основу алгоритма решения такой задачи можно взять алгоритм оценки среднего косинуса альфа в ориентированном полете КА [1]. Однако его использование требует многократного пересчета координат различных точек конструкции панели солнечной батареи (СБ) и координат точек элементов конструкции КА, которые могут затенить панели от Солнца. Этот алгоритм нерационален при имитационного моделировании, поскольку требует больших затрат времени и ресурсов ЭВМ. Поэтому предлагается алгоритм оценки среднего косинуса альфа, который свободен от указанных недостатков.

Основная идея уменьшения объема вычислений заключается в раздельном (независимом) моделировании процесса вращения КА относительно центра масс и процесса движения

КА как материальной точки. Это возможно, поскольку при неориентированном полете характеристики вращательного движения КА при определенных допущениях не зависят от положения КА в какой-либо точке его орбиты. При этом не требуется пересчет координат точек конструкции панели СБ и точек, затеняющих элементы конструкции КА, из одних систем координат (СК) в другие. Пересчитываются лишь координаты конечной точки единичного вектора направления на Солнце из неподвижной геоцентрической СК в СК, связанную с КА, и тем самым экономятся ресурсы ЭВМ.

При моделировании приняты следующие основные допущения.

1. Для расчета параметров орбит используются уравнения эллиптического движения с периодической коррекцией расчетных значений долготы восходящего узла (прецессии орбиты) и аргумента перигея в процессе длительного полета, вызванных несферичностью Земли (учитываются вековые возмущения от второй зональной гармоники в разложении геопотенциала).

2. Динамическими силами, возникающими в процессе вращения КА и влияющими на характеристики углового движения, пренебрегаем в связи с малой скоростью вращения (до трех градусов в секунду), т.е. вектор кинетического момента КА сохраняется неизменным в процессе каждого цикла статистических испытаний.

3. Аэродинамическими силами пренебрегаем в связи с относительно большой высотой орбиты (350...1300 км), гравитационные моменты не учитываются в связи с относительно малым временем неориентированного полета (до трех суток).

Приведем основные положения предлагаемого алгоритма оценки среднего косинуса альфа и соответствующие математические модели.

1. Задаются количество статистических испытаний  $N$  в зависимости от требуемой точности расчета и значение максимально возможной при статистических испытаниях угловой скорости вращения КА в неориентированном полете  $\omega_{\max}$ .

2. Задаются направляющие косинусы нормали  $n_b^{CB}$  к плоскости солнечной батареи КА в связанной с КА (базовой) СК. Если панели СБ поворотные, то начальная их ориентация задается с помощью генератора случайных чисел в пределах возможных углов поворота. Если панели СБ неповоротные и плоскость СБ перпендикулярна оси  $X_b$  КА, то

$$n_{x_b}^{CB} = -1; n_{y_b}^{CB} = 0; n_{z_b}^{CB} = 0.$$

3. Реализуется случайная начальная (в каждом цикле статистических испытаний) ориентация КА в неподвижной геоцентрической системе координат. С помощью генератора

случайных чисел организуются реализации случайных углов направляющих косинусов (углов Эйлера) в пределах от  $-\pi$  до  $+\pi$ :  $\vartheta = -\pi + 2\pi \cdot \xi$ ;  $\gamma = -\pi + 2\pi \cdot \xi$ ;  $\psi = -\pi + 2\pi \cdot \xi$ ; где  $\xi$  - значение случайных чисел с равномерным законом распределения на отрезке  $[0,1]$ .

4. Реализуется случайное значение модуля вектора угловой скорости вращения КА в неориентированном полете (также в каждом цикле статистических испытаний):  $\omega = \omega_{\max} \cdot \xi$ .

5. Реализуется случайное направление вектора угловой скорости вращения КА. С помощью генератора случайных чисел организуются реализации случайных углов направляющих косинусов вектора угловой скорости вращения КА в пределах от  $-\pi$  до  $+\pi$ :

$$\vartheta_\omega = -\pi + 2\pi \cdot \xi; \quad \gamma_\omega = -\pi + 2\pi \cdot \xi; \quad \psi_\omega = -\pi + 2\pi \cdot \xi.$$

6. Вычисляются проекции единичного вектора нормали к поверхности СБ  $n^{CB}$  в неподвижной геоцентрической СК. Для этого осуществляется преобразование координат точки конца единичного вектора к нормали СБ  $n_B^{CB}$  из связанной с КА СК  $Ox_B y_B z_B$  в неподвижную геоцентрическую систему координат  $OXYZ$ :

$$n^{CB} = \begin{bmatrix} n_x^{CB} \\ n_y^{CB} \\ n_z^{CB} \end{bmatrix}^T = B \times \begin{bmatrix} n_{xB}^{CB} \\ n_{yB}^{CB} \\ n_{zB}^{CB} \end{bmatrix}^T,$$

где матрица  $B$  имеет следующий вид:

$$B = \begin{bmatrix} \cos \vartheta \cos \psi & -\cos \gamma \sin \vartheta \cos \psi + \sin \gamma \sin \psi & \sin \gamma \sin \vartheta \cos \psi + \cos \gamma \sin \psi \\ \sin \vartheta & \cos \gamma \cos \vartheta & -\sin \gamma \cos \vartheta \\ -\cos \vartheta \sin \psi & \sin \psi \sin \vartheta \cos \gamma + \sin \gamma \cos \psi & -\sin \gamma \sin \vartheta \sin \psi + \cos \gamma \cos \psi \end{bmatrix}.$$

7. Осуществляется преобразование координат точки конца единичного вектора к нормали СБ  $n^{CB}$  из неподвижной геоцентрической СК  $OXYZ$  в вспомогательную СК  $Ox_\omega y_\omega z_\omega$ , направление оси  $Oz_\omega$  которой совпадает с вектором скорости вращения КА:

$$n_\omega^{CB} = \begin{bmatrix} n_{x\omega}^{CB} \\ n_{y\omega}^{CB} \\ n_{z\omega}^{CB} \end{bmatrix}^T = A \times \begin{bmatrix} n_x^{CB} \\ n_y^{CB} \\ n_z^{CB} \end{bmatrix}^T,$$

где матрица  $A$  имеет следующий вид (здесь  $\vartheta_\omega, \gamma_\omega, \psi_\omega$  - углы Эйлера, полученные в п. 5):

$$A = \begin{bmatrix} \cos \vartheta_\omega \cos \psi_\omega & \sin \vartheta_\omega & -\cos \vartheta_\omega \sin \psi_\omega \\ \sin \gamma_\omega \sin \psi_\omega - \cos \gamma_\omega \sin \vartheta_\omega \cos \psi_\omega & \cos \gamma_\omega \cos \vartheta_\omega & \sin \psi_\omega \sin \vartheta_\omega \cos \gamma_\omega + \sin \gamma_\omega \cos \psi_\omega \\ \sin \gamma_\omega \sin \vartheta_\omega \cos \psi_\omega + \cos \gamma_\omega \sin \psi_\omega & -\sin \gamma_\omega \cos \vartheta_\omega & \cos \gamma_\omega \cos \psi_\omega - \sin \gamma_\omega \sin \vartheta_\omega \sin \psi_\omega \end{bmatrix}.$$

8. Осуществляется имитация вращения КА в неподвижной геоцентрической СК. Для этого единичный вектор нормали к поверхности СБ во вспомогательной СК  $Ox_\omega y_\omega z_\omega$   $n_\omega^{CB}$  поворачивается вокруг оси  $Oz_\omega$ , на угол  $(\omega \cdot t)$ , где  $t$  - время, прошедшее с момента начала

цикла статистических испытаний. Таким образом, осуществляется переход к новой вспомогательной СК  $O X'_\omega Y'_\omega Z'_\omega$ , ось  $O Z'_\omega$  которой совпадает с осью  $O Z_\omega$ ,  $n_\omega^{CB}$ , а направления осей  $O X'_\omega$  и  $O Y'_\omega$  зависят от времени  $t$ .

Поскольку поворот единичного вектора  $n_\omega^{CB}$  совместно с поворотом СК  $O X_\omega Y_\omega Z_\omega$  не изменяет координаты его конца в СК  $O X'_\omega Y'_\omega Z'_\omega$ , то пересчет координат конца этого вектора не требуется, то есть осуществляется только переприсвоение значений координат.

$$n_{\omega t}^{CB} = \begin{vmatrix} n_{X\omega t}^{CB} & n_{Y\omega t}^{CB} & n_{Z\omega t}^{CB} \end{vmatrix}^T = \begin{vmatrix} n_{X\omega}^{CB} & n_{Y\omega}^{CB} & n_{Z\omega}^{CB} \end{vmatrix}^T$$

9. Осуществляется пересчет координат конца вектора  $n_{\omega t}^{CB}$  из СК  $O X'_\omega Y'_\omega Z'_\omega$  в СК  $OXYZ$ . Сначала производится пересчет координат вектора  $n_{\omega t}^{CB}$  из СК  $O X'_\omega Y'_\omega Z'_\omega$  в СК  $O X_\omega Y_\omega Z_\omega$ :

$$n_{\omega t}^{CB} = \begin{vmatrix} n_{X\omega t}^{CB} \\ n_{Y\omega t}^{CB} \\ n_{Z\omega t}^{CB} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(\omega \cdot t) & \sin(\omega \cdot t) & 0 \\ -\sin(\omega \cdot t) & \cos(\omega \cdot t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} n_{X\omega}^{CB} \\ n_{Y\omega}^{CB} \\ n_{Z\omega}^{CB} \end{vmatrix},$$

затем координаты конца вектора  $n_{\omega t}^{CB}$  пересчитываются из СК  $O X_\omega Y_\omega Z_\omega$  в СК  $OXYZ$ :

$$n_{\omega t}^{CB} = \begin{vmatrix} n_X^{CB} & n_Y^{CB} & n_Z^{CB} \end{vmatrix}^T = A^T \times \begin{vmatrix} n_{X\omega}^{CB} & n_{Y\omega}^{CB} & n_{Z\omega}^{CB} \end{vmatrix}^T$$

10. Осуществляется расчет значений координат единичного вектора направления на Солнце в СК  $OXYZ$ :  $\vec{S} = |S_x \ S_y \ S_z|$  учетом угла между направлением на точку весеннего равноденствия и линией «Земля – Солнце» по методике [1] и вычисляется значение косинуса угла альфа:

$$\cos \alpha = (\vec{S}, \vec{n}) = S_x \cdot n_x^{CB} + S_y \cdot n_y^{CB} + S_z \cdot n_z^{CB}$$

11. Проверяется условие нахождения КА в тени. Для этого одновременно с имитацией поворота КА относительно центра масс осуществляется имитация движения КА как материальной точки. В каждый расчетный момент времени из центра масс КА направляется вспомогательный вектор, параллельный единичному вектору направления на Солнце. Модуль вектора циклически возрастает от характерного значения высоты орбиты до характерных размеров Земли. Факт нахождения КА в тени Земли определяется по принадлежности координат конца вспомогательного вектора сферическому телу с радиусом, равным среднему радиусу Земли.

Если КА находится в тени, то текущее значение среднего косинуса альфа принимается равным нулю.

12. Для учета затенения панелей СБ элементами конструкции КА панели предварительно разбиваются на относительно небольшие участки и осуществляется пересчет координат конца единичного вектора направления на Солнце из СК  $OXYZ$  в СК  $OX_B Y_B Z_B$ . Затем с помощью «прощупывания» из каждого участка панели СБ в направлении, параллельном вектору направления на Солнце, определяется факт затенения или незатенения участка и подсчитывается коэффициент незатенения. При этом не требуется многократный пересчет координат элементов конструкции КА, затеняющих панели СБ.

13. В каждом цикле по времени полета КА рассчитывается нарастающим итогом средний косинус угла альфа:

$$\overline{\cos \alpha} = k_{нз} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{i=m} \cos \alpha_i \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^{i=m} \Delta t_i},$$

где  $m$  – количество участков, на которые разбивается время полета КА,  $\Delta t_i$  – время длительности  $i$ -го участка полета.

14. Производится заданное количество статистических испытаний, определяются математическое ожидание и дисперсия среднего косинуса альфа, строятся функции распределения и плотности его распределения.

Данный алгоритм реализован в программном обеспечении. Результаты тестирования показывают, что использование предложенного алгоритма существенно повышает производительность вычислений по сравнению с известными алгоритмами [1] при одинаковой точности вычислений.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Космические аппараты систем зондирования поверхности Земли: Математические модели повышения эффективности КА. // А.В. Соллогуб, Г.П. Аншаков, В.В. Данилов. Под ред. Д.И. Козлова. – М.: Машиностроение, 1993