

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ УГЛА МЕЖДУ НОРМАЛЬЮ К ПАНЕЛИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ И НАПРАВЛЕНИЕМ НА СОЛНЦЕ С УЧЕТОМ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НАБЛЮДЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ СЪЕМКИ

Среднесуточный угол (или косинус угла) между нормалью к панели солнечной батареи (СБ) космического аппарата (КА) наблюдения и направлением на Солнце (в дальнейшем угол α или косинус угла α) является одним из важных проектных параметров, определяющим облик КА и циклограммы работы бортовой аппаратуры. Математические модели для оценки угла α построены в работе [1], однако они учитывают не все аспекты компоновки и этапы эксплуатации КА наблюдения. В настоящей работе предлагаются модели, которые при оценке угла α позволяют учитывать направление оптической оси аппаратуры наблюдения, ориентацию панелей СБ в базовой системе координат КА, изменение ориентации КА в процессе перевода в рабочее положение, а также изменение ориентации КА в процессе съемки.

Техническая постановка задачи

Определить текущий угол (или косинус угла) между нормалью к поверхности СБ и направлением на Солнце с учетом времени года, параметров рабочей орбиты, компоновочной схемы аппаратуры наблюдения и схемы установки панели СБ, изменения ориентации КА в процессе целевой работы и поворотов панелей СБ.

Математическая постановка задачи

Определить координаты $n_x^{CB}, n_y^{CB}, n_z^{CB}$ единичного вектора \vec{n}^{CB} нормали к поверхности панели СБ и координаты s_x^C, s_y^C, s_z^C единичного вектора \vec{S}^C направления на Солнце в какой-либо одной системе координат (СК) в произвольный момент времени полета КА и осуществить расчет косинуса угла α по следующей зависимости [1]:

$$\cos \alpha = (\vec{S}^C, \vec{n}^{CB}) = s_x^C \cdot n_x^{CB} + s_y^C \cdot n_y^{CB} + s_z^C \cdot n_z^{CB}. \quad (1)$$

Исходные данные для расчета и выбор системы координат для расчета угла α

Ω – долгота восходящего узла орбиты;

i – наклонение плоскости орбиты;

ω – аргумент перигея;

ν – угол истинной аномалии КА;

δ_C – угол между эклипстикой и экватором (23,5°).

N – число дней, прошедших с момента весеннего равноденствия до расчетной даты.

Вычисление угла α (или его косинуса) может проводиться в любой СК. В данной работе выбираем базовую систему координат КА.

Плоскости стабилизации ракеты-носителя и базовая система координат КА

В КА имеется некая основная (базовая) СК $Ox_B y_B z_B$ (рис. 1), которая привязана к плоскостям стабилизации ракеты-носителя (РН) и КА и используется при разработке проекта, изготовлении и эксплуатации.

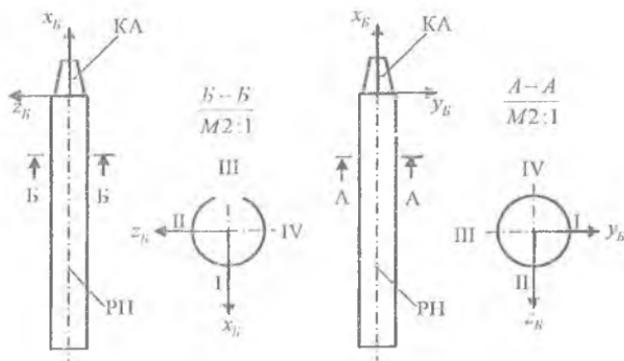


Рис. 1. Плоскости стабилизации и базовая система координат КА

Обычно ось Ox_B совпадает с продольной осью КА и РН и направлена в сторону полета ракеты, плоскость $Oy_B z_B$ совпадает с плоскостью сопряжения (стыка, посадки) стыковых шпангоутов КА и переходного отсека РН. Ось Oy_B расположена в плоскости I – III КА и направлена в сторону полуплоскости I. Ось Oz_B дополняет систему координат до правой.

Варианты компоновки оптической аппаратуры наблюдения

Некоторые варианты компоновки аппаратуры наблюдения по отношению к базовой СК представлены на рис. 2. Стрелками показано направление полета (ПП).

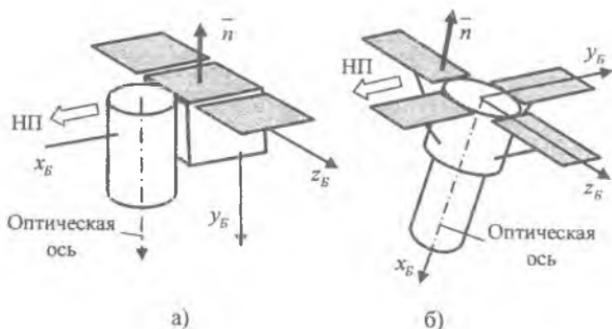


Рис. 2. Варианты компоновок аппаратуры наблюдения и панелей СБ

Изменение ориентации КА в процессе активного участка траектории

На рис. 3 представлена схема, иллюстрирующая изменение направления осей базовой системы координат КА наблюдения в стартовой СК в процессе выведения КА на орбиту и перевода его в рабочее положение.



Рис. 3. Изменение направления осей базовой системы координат КА

На активном участке полета РН ось Oy_B постепенно поворачивается в сторону поверхности Земли. Во время отделения КА от последнего ракетного блока РН ось Ox_B направлена по касательной к траектории, а ось Oy_B "смотрит" на Землю.

Ориентация КА в рабочем номинальном положении

Если оптическая ось аппаратуры наблюдения КА располагается поперек базовой оси Ox_B (рис. 2, а), то положение КА после его отделения от последнего ракетного блока РН практически совпадает (или почти совпадает) с номинальным (средним) рабочим положением КА (ось Ox_B КА в готовности к проведению съемок, как правило, направлена в надир). Такое положение КА соответствует позиции 1 на рис. 3.

Если оптическая ось аппаратуры наблюдения КА располагается вдоль базовой оси Ox_B (рис. 2, б), то положение КА после его отделения от последнего ракетного блока РП не соответствует рабочему. Для перевода КА в рабочее номинальное положение необходимо повернуть его таким образом, чтобы оптическая ось (или ось Ox_B) была направлена в сторону "Земли". Такое положение КА соответствует позиции 2 на рис. 3.

Ориентация КА при съеме объектов наблюдения

При съемке объектов наблюдения КА поворачивается по углам тангажа (θ), крена (γ) и рыскания. В данной работе поворот КА по углу рыскания не рассматривается. На рис. 4 в качестве примера, показаны компоновка КА с продольной осью аппаратуры наблюдения, базовая СК и СК при повороте КА.

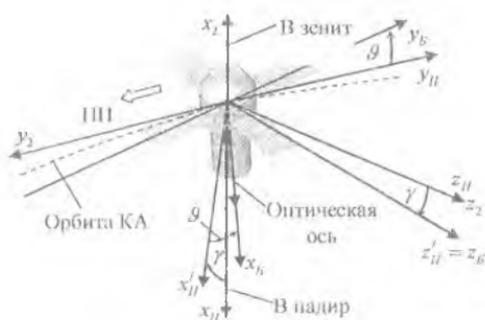


Рис. 4. Базовая система координат и система координат при повороте КА с продольной осью аппаратуры наблюдения

Этапы решения задачи

Для решения поставленной задачи необходимо, во-первых, определить базовую СК (для рассматриваемого конкретного КА) с учетом вариантов компоновки аппаратуры наблюдения и панелей СБ. Необходимо также учесть связь между базовой СК и системой координат РП, а также изменение положения базовой СК в процессе выведения КА на орбиту и перевода его в рабочее положение. Во-вторых, необходимо построить матрицы пересчета с учетом последовательности преобразований координат из одних систем СК в другие.

Построение математических моделей для оценки угла между нормалью к панели солнечной батареи и направлением на Солнце

Разработка математических моделей в основном связана с построением матриц преобразований из одних СК в другие в определенной последовательности. В связи с

громоздкостью преобразований расчетные схемы и подробное построение матриц в данной работе не приводятся. Ниже приведен лишь результирующий алгоритм, с помощью которого можно рассчитать угол между нормалью к панели СБ и направлением на Солнце. В некоторых пунктах данного алгоритма можно увидеть промежуточные формулы для пересчета координат единичных векторов на отдельных этапах преобразования.

Алгоритм

1. Анализируется компоновочная схема КА наблюдения и определяются координаты единичного вектора \vec{n} к поверхности панели СБ в базовой СК. Например, для вариантов а и б (рис. 2) матрицы-столбцы M_n^B , содержащие координаты единичного вектора \vec{n} в базовой СК, выглядят соответственно следующим образом:

$$M_n^{\bar{a}} = \begin{bmatrix} n_{xB}^{CB} \\ n_{yB}^{CB} \\ n_{zB}^{CB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad M_n^{\bar{b}} = \begin{bmatrix} n_{xB}^{CB} \\ n_{yB}^{CB} \\ n_{zB}^{CB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

2. Рассчитывается угол между направлением на точку весеннего равноденствия и линией Земля – Солнце

$$a_c = \frac{2\pi N}{365} \quad (3)$$

3. Рассчитываются проекции единичного вектора направления на Солнце на оси неподвижной геоцентрической СК

$$\left. \begin{aligned} s_x^C &= \cos a_c; \\ s_y^C &= \sin a_c \cdot \cos \delta_c; \\ s_z^C &= \sin a_c \cdot \sin \delta_c; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

4. Осуществляется пересчет координат единичного вектора направления на Солнце из неподвижной геоцентрической СК в геоцентрическую орбитальную СК, связанную с перицентром орбиты

$$M_{S1}^C = \begin{bmatrix} s_{x1}^C \\ s_{y1}^C \\ s_{z1}^C \end{bmatrix} = M_{II} \cdot M_S^C = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_x^C \\ s_y^C \\ s_z^C \end{bmatrix} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} m_{11} &= \cos \omega \cos \Omega - \sin \omega \cos i \sin \Omega; & m_{21} &= -\sin \omega; & m_{31} &= \sin i \sin \Omega; \\ m_{12} &= \cos \omega \sin \Omega + \sin \omega \cos i \cos \Omega; & m_{22} &= -\sin \omega \sin \Omega + \cos \omega \cos i \cos \Omega; & m_{32} &= -\sin i \cos \Omega; \\ m_{13} &= \sin \omega \sin i; & m_{23} &= \cos \omega \sin i; & m_{33} &= \cos i. \end{aligned}$$

5. Осуществляется пересчет координат единичного вектора направления на Солнце из геоцентрической орбитальной СК, связанной с перигелием орбиты, в барицентрическую орбитальную СК

$$M_{S2}^C = \begin{bmatrix} s_{x2}^C \\ s_{y2}^C \\ s_{z2}^C \end{bmatrix} = M_{\vartheta} \cdot M_{S1}^C = \begin{bmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta & 0 \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_{x1}^C \\ s_{y1}^C \\ s_{z1}^C \end{bmatrix} \quad (6)$$

6. Осуществляется пересчет координат единичного вектора направления на Солнце из барицентрической орбитальной СК в СК, связанную с центром масс КА и центром Земли

$$M_{SH}^C = \begin{bmatrix} s_{xH}^C \\ s_{yH}^C \\ s_{zH}^C \end{bmatrix} = M_H \cdot M_{S2}^C = M_H \cdot \begin{bmatrix} s_{x2}^C \\ s_{y2}^C \\ s_{z2}^C \end{bmatrix} \quad (7)$$

где M_H – матрица поворота (косинусов между осями СК).

Для варианта компоновки КА с поперечным расположением оси аппаратуры наблюдения (ось Oy_B базовой СК направлена в надир, рис. 2, а) и для варианта компоновки КА с продольным расположением оси аппаратуры наблюдения (ось Ox_B базовой СК направлена в надир, рис. 2, б) матрицы поворота имеют вид:

$$M_H = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad M_H = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

7. Осуществляется пересчет координат единичного вектора направления на Солнце из СК, связанной с центром масс КА и центром Земли, в базовую СК

$$M_{SB}^C = \begin{bmatrix} s_{xB}^C \\ s_{yB}^C \\ s_{zB}^C \end{bmatrix} = M_B \cdot M_{SH}^C = M_B \cdot \begin{bmatrix} s_{xH}^C \\ s_{yH}^C \\ s_{zH}^C \end{bmatrix} \quad (9)$$

где M_B – матрица поворота (косинусов между осями СК).

Матрицы преобразований для вариантов компоновки КА в соответствии со схемами, представленными на рис. 2, а и 2, б, будут соответственно следующими:

$$M_B = \begin{bmatrix} \sin \vartheta \cos \gamma & -\cos \vartheta & -\sin \vartheta \sin \gamma \\ \cos \vartheta \cos \gamma & \sin \vartheta & \cos \vartheta \sin \gamma \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix}; \quad M_B = \begin{bmatrix} \cos \vartheta \cos \gamma & -\sin \vartheta & -\cos \vartheta \sin \gamma \\ -\sin \vartheta \cos \gamma & \sin \vartheta & -\sin \vartheta \sin \gamma \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (10)$$

7. Осуществляется расчет косинуса угла между направлением на Солнце и нормалью к поверхности панели СБ в базовой СК по формуле:

$$\cos \alpha = (\vec{S}_B, \vec{n}_B^{CB}) = s_{x2}^C \cdot n_{x2}^{CB} + s_{y2}^C \cdot n_{y2}^{CB} + s_{z2}^C \cdot n_{z2}^{CB} \quad (11)$$

где $s_{xB}^C, s_{yB}^C, s_{zB}^C$ – проекции вектора $\overline{S_B}$ на оси базовой СК;

$n_{xB}^{CB}, n_{yB}^{CB}, n_{zB}^{CB}$ – проекции вектора $\overline{n_B^{CB}}$ на оси базовой СК (пункт 1 алгоритма).

Таким образом, разработаны модели для оценки угла между нормалью к панели солнечной батареи и направлением на Солнце, которые позволяют учитывать направление оптической оси аппаратуры наблюдения, ориентацию панелей солнечной батареи в базовой системе координат КА, изменение ориентации КА в процессе перевода в рабочее положение, а также изменение ориентации КА в процессе съемки.

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.