

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ПОЛЯ ЗРЕНИЯ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ НА БОРТУ КА С ПРИМЕНЕНИЕМ БСКР

При наблюдениях поверхности Земли с борта орбитального КА с использованием как визуальных средств (визиров), так и регистрирующей аппаратуры, получающей снимки подстилающей поверхности с использованием фотопленки или матричного фотопреобразователя, для обеспечения высокого качества изображения при малых яркости (освещенности) и контрастности наблюдаемой поверхности требуется значительное время наблюдения или экспозиции снимка. Эта задача вполне успешно может быть решена с помощью пространственно-временной стабилизации изображения с применением блока строчно-кадровой развертки (БСКР), разработанного для КА "Электрон" [1].

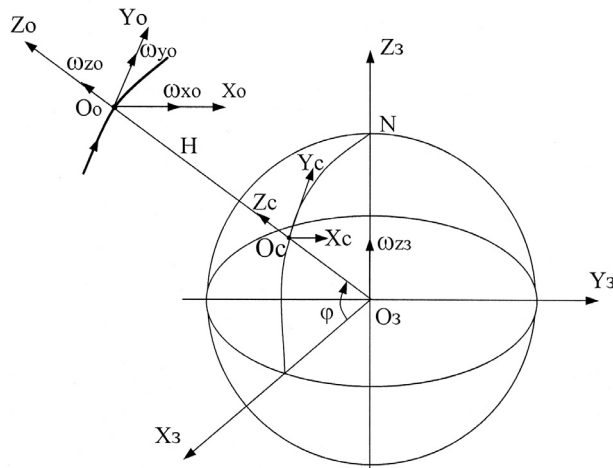
Необходимым условием стабилизации наблюдаемого поля зрения является равенство угловых скоростей визирного луча и наблюдаемой зоны ("точки") на поверхности Земли относительно координатных осей оптического прибора (телескопа), с помощью которого ведется наблюдение (съемка). Значения угловых скоростей наблюдаемой зоны зависят от положения КА (телескопа) относительно Земли. Для определения необходимых функциональных зависимостей заданы следующие системы координат (с.к.) (рис.1):

$O_3X_3Y_3Z_3$  – с.к., связанная с Землей:  $O_3$  – центр Земли, ось  $O_3Z_3$  совпадает с осью вращения Земли;

$O_cX_cY_cZ_c$  – с.к., связанная с зоной съемки поверхности Земли,  $O_c$  – точка пересечения местной вертикали (МВ) с поверхностью Земли, ось  $O_cY_c$  параллельна текущей касательной к орбите КА в направлении полета;

$O_0X_0Y_0Z_0$  – с.к., связанная с приборной платформой КА и расположенным на ней телескопом,  $O_0$  – точка пересечения оптической оси телескопа с отражающей плоскостью сканирующего зеркала (СЗ) БСКР, ось  $O_0Z_0$  совпадает с направлением МВ, ось  $O_0Y_0$  совпадает с текущим направлением касательной к орбите КА, ось  $O_0X_0$  – с оптической осью телескопа.

Другие обозначения:  $R_3$  – средний радиус Земли,  $H$  – текущая высота орбиты КА, угол  $\varphi$  – широта зоны съемки,  $\sigma$  – угол наклона плоскости орбиты;  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  – проекции угловых скоростей на соответствующие оси с.к.



**Рис. 1. Схема определения проекций угловых скоростей наблюдаемой зоны**

Проекция угловой скорости зоны съемки ( $O_c$ ) на оси с.к.  $O_0 X_0 Y_0 Z_0$ :

*вследствие вращения Земли*

$$\omega_{x_0}^3 = \omega_{z_3} \frac{R_3}{H} \cos \varphi \cos \sigma;$$

$$\omega_{y_0}^3 = \omega_{z_3} \frac{R_3}{H} \cos \varphi \sin \sigma;$$

$$\omega_{z_0}^3 = 0.$$

где  $\omega_{z_3} = 2\pi/T_3$ ;  $T_3 = 24$  ч – период вращения Земли;

*вследствие орбитального вращения КА*

$$\omega_{x_0}^0 = - \frac{2\pi}{T_{КА}} \cdot \frac{R_3 H \cos \varepsilon - 2R_3^2 \sin^2 \frac{\varepsilon}{2}}{H^2 + 4R_3 (H+R_3) \sin^2 \frac{\varepsilon}{2}} ;$$

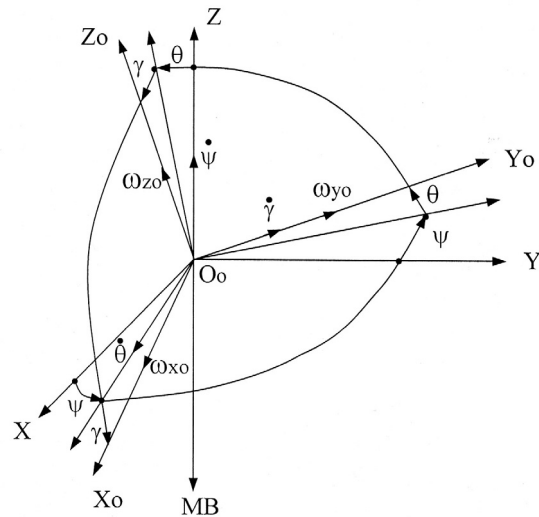
$$\omega_{y_0}^0 = 0; \quad \omega_{z_0}^0 = 0,$$

где  $\varepsilon = 2\pi \frac{t_c}{T_{KA}}$ ;  $t_c$  – длительность съемки (время экспозиции);

$T_{KA}$  – период вращения КА. При  $t_c \leq T_{KA}$

$$\omega_{x_0} \approx -\frac{2\pi}{T_{KA}} \cdot \frac{R_3}{H}.$$

В процессе наблюдения (съемки), помимо указанных перемещений наблюдаемой зоны относительно телескопа (КА), имеются угловые перемещения приборной платформы КА вследствие работ систем ориентации и стабилизации КА.



**Рис. 2. Схема определения проекций угловых скоростей приборной платформы**

Проекция угловых скоростей перемещений приборной платформы КА при работе системы ориентации и стабилизации КА во время съемки (рис.2):

$$\omega_{x_0} = \theta \cos \gamma \pm \psi \cos \theta \sin \gamma;$$

$$\omega_{y_0} = \gamma \pm \psi \sin \theta;$$

$$\omega_{z_0} = \pm \theta \sin \gamma + \psi \cos \theta \cos \gamma,$$

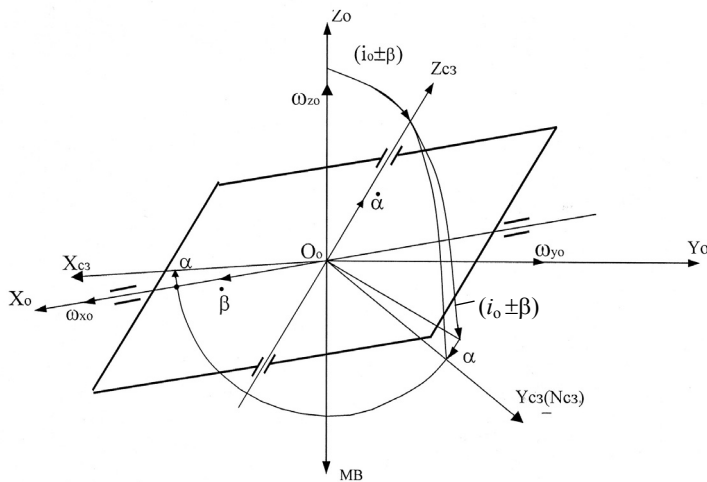
где  $\psi$  - угол рыскания в плоскости  $O_oXY$ ,  $\theta$  - угол тангажа в плоско-

сти  $O_0 X_0 Z_0$ ,  $\gamma$  - угол крена в плоскости  $O_0 X_0 Z_0$ ; с.к.  $O_0 XYZ$  - неподвижно связана с пространством предметов в начале процесса съемки.

Таким образом, получаем суммарные значения угловых скоростей зоны съемки:

$$\left. \begin{aligned} \omega_{x_0}^c &= \omega_{z_3} \frac{R}{H} \cos\varphi \cos\sigma - \frac{2\pi}{T_{KA}} \cdot \frac{R_3}{H} + \theta \cos\gamma \pm \psi \cos\theta \sin\gamma; \\ \omega_{y_0}^c &= \omega_{z_3} \frac{R}{H} \cos\varphi \sin\sigma + \gamma \pm \psi \sin\theta; \\ \omega_{z_0}^c &= \pm \theta \sin\gamma + \psi \cos\theta \cos\gamma. \end{aligned} \right\} (1)$$

Определим проекции угловых скоростей визирного луча на оси с.к.  $O_0 X_0 Y_0 Z_0$  при использовании плоского сканирующего зеркала (СЗ), расположенного во входном зрачке съемочного объектива (телескопа), поворачиваемого относительно осей карданова подвеса (рис.3).



**Рис. 3. Схема определения проекций угловых скоростей сканирующего зеркала**

$O X_{c3} Y_{c3} Z_{c3}$  - с.к., связанная со СЗ, причем оси  $O X_{c3}$ ,  $O Z_{c3}$  лежат в отражающей (рабочей) плоскости СЗ, ось  $O Y_{c3}$  совпадает с нормалью к СЗ;  $i_0$  - угол между нормалью к СЗ и осью  $O Y_0$  в среднем положении СЗ;  $\pm\alpha$  - угол поворота СЗ вокруг внутренней (подвижной)

оси карданова подвеса относительно среднего положения СЗ;  $\pm\beta$  - угол поворота СЗ вокруг неподвижной оси;  $\alpha, \beta$  - угловые скорости поворота СЗ вокруг соответствующих осей.

Проекция угловых скоростей СЗ на оси с.к.  $O_0X_0Y_0Z_0$ :

$$\left. \begin{aligned} \omega_{x_0}^{c3} &= \omega_{x_0} + \dot{\beta}; \\ \omega_{y_0}^{c3} &= \omega_{y_0} + \dot{\alpha} \sin(i_0 \pm \beta); \\ \omega_{z_0}^{c3} &= \omega_{z_0} + \dot{\alpha} \cos(i_0 \pm \beta). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для перехода к осям системы координат  $OX_{c3}Y_{c3}Z_{c3}$  используем матричное уравнение [2]:

$$[\omega_{x_{c3}} \omega_{y_{c3}} \omega_{z_{c3}}]^T = M_0 [\omega_{x_0}^{c3} \omega_{y_0}^{c3} \omega_{z_0}^{c3}]^T, \quad (3)$$

где Т – знак транспонирования матрицы;  $M_0$  – матрица направляющих косинусов:

$$M_0(\pm\alpha, \pm\beta) = \begin{vmatrix} \text{Cosa} & \pm\text{Sina} \text{Cos}\beta' & \pm\text{Sina} \text{Sin}\beta' \\ \pm\text{Sina} & \text{Cosa} \text{Cos}\beta' & \text{Cosa} \text{Sin}\beta' \\ 0 & \text{Sin}\beta' & \text{Cos}\beta' \end{vmatrix},$$

где  $\beta' = i_0 \pm \beta$ .

Проекция угловых скоростей отраженного от СЗ (визирного) луча на оси с.к.  $OX_{c3}Y_{c3}Z_{c3}$  задаются матричным уравнением:

$$[\omega_{x_{c3}}^B \omega_{y_{c3}}^B \omega_{z_{c3}}^B]^T = [2\omega_{x_{c3}} \ 0 \ 2\omega_{z_{c3}}]^T.$$

Проекция угловых скоростей визирного луча на оси с.к.  $O_0X_0Y_0Z_0$  определяются уравнением:

$$[\omega_{x_0}^B \omega_{y_0}^B \omega_{z_0}^B]^T = M_0' [2\omega_{x_{c3}} \ 0 \ 2\omega_{z_{c3}}]^T, \quad (4)$$

где  $M_0'$  – матрица направляющих косинусов:

$$M_0'(\pm\alpha, \pm\beta) = \begin{vmatrix} \text{Cosa} & \pm\text{Sina} & 0 \\ \pm\text{Sina} \text{Cos}\beta' & \text{Cosa} \text{Cos}\beta' & \text{Sin}\beta' \\ \pm\text{Sina} \text{Sin}\beta' & \text{Cosa} \text{Sin}\beta' & \text{Cos}\beta' \end{vmatrix}.$$

Решив уравнения (3), (4) и используя уравнение (2), получим:

$$\omega_{x_0}^B = \omega_{x_0} 2\text{Cos}^2\alpha \mp \omega_{y_0} \text{Sin}2\alpha \text{Cos}\beta' \pm \omega_{z_0} \text{Sin}2\alpha \text{Sin}\beta' + \beta 2\text{Cos}^2\alpha; \quad (5)$$

$$\omega_{y_0}^B = \pm\omega_{x_0} \text{Sin}2\alpha \text{Sin}\beta' + \omega_{y_0} (2\text{Sin}^2\alpha \text{Cos}^2\beta' + 2\text{Sin}^2\beta') + \omega_{z_0} 2\text{Sin}^2\beta' \text{Cos}^2\alpha + \dot{\alpha} \text{Sin}2\beta' \text{Cos}\beta' \pm \beta \text{Sin}2\alpha \text{Cos}\beta'; \quad (6)$$

$$\omega_{z_0}^B = \pm \omega_{x_0} \text{Sin}2\alpha \text{Sin}\beta' + \omega_{y_0} 2\text{Sin}^2\beta' \text{Cos}^2\alpha + \omega_{z_0} (2\text{Sin}^2\alpha \text{Sin}^2\beta' + (7) \\ + 2\text{Cos}^2\beta') \pm \beta \text{Sin}2\alpha \text{Sin}\beta' + \alpha 2\text{Cos}\beta'.$$

При  $t_c \ll T_3$  ( $T_3 = 24$  ч – период вращения Земли) угол  $\alpha \ll \beta'$ , поэтому уравнения (5), (6), (7) можно с допустимой погрешностью упростить:

$$\omega_{x_0}^B \cong 2\omega_{x_0} + 2\dot{\beta}; \quad (8)$$

$$\omega_{y_0}^B \cong \omega_{y_0} 2\text{Sin}^2\beta' + \omega_{z_0} \text{Sin}2\beta' + \dot{\alpha} \text{Sin}2\beta' \cdot \text{Cos}\beta'; \quad (9)$$

$$\omega_{z_0}^B \cong \omega_{y_0} \text{Sin}2\beta' + \omega_{z_0} 2\text{Cos}^2\beta' + \dot{\alpha} 2\text{Cos}\beta'. \quad (10)$$

Условия стабилизации поля зрения наблюдательной аппаратуры и отсутствие "смаза" изображения за время наблюдения (съемки):

$$\left. \begin{aligned} \delta\omega_{x_0} &= \omega_{x_0}^B - \omega_{x_0}^C = 0; \\ \delta\omega_{y_0} &= \omega_{y_0}^B - \omega_{y_0}^C = 0; \\ \delta\omega_{z_0} &= \omega_{z_0}^B - \omega_{z_0}^C = 0. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Используя уравнения (1), (8), (9) и (10), получаем условия (11) в виде:

$$\left. \begin{aligned} \omega_{x_0} + 2\dot{\beta} - \omega_{z_3} \frac{R_3}{H} \text{Cos}\varphi \text{Cos}\sigma + \frac{2\pi}{T_{KA}} \frac{R_3}{H} &= 0; \\ \omega_{y_0} \text{Cos}2\beta' + \omega_{z_0} \text{Sin}2\beta' + 2\dot{\alpha} \text{Sin}\beta' \text{Cos}^2\beta' - \omega_{z_3} \frac{R_3}{H} \text{Cos}\varphi \text{Sin}\sigma &= 0; \\ \omega_{y_0} \text{Sin}2\beta' + \omega_{z_0} \text{Cos}^2\beta' + 2\dot{\alpha} \text{Cos}\beta' &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

При достаточно точной ориентации ( $\leq 0,1^\circ$ ) и малых значениях угловых скоростей стабилизации КА ( $\leq 5 \cdot 10^{-4}$  °/с) [3] стабилизацию изображения можно обеспечить путем поворота СЗ вокруг двух осей карданова подвеса с угловыми скоростями, определяемыми из уравнений (12), при функциональной погрешности упрощения уравнений на более 1 угл.с/с:

$$\dot{\beta} \approx \pi \frac{R_3}{H} \left( \frac{\text{Cos}\varphi \text{Cos}\sigma}{T_3} - \frac{1}{T_{KA}} \right); \quad (13)$$

$$\dot{\alpha} \approx \pi \frac{R_3}{HT_3} \cdot \frac{\text{Cos}\varphi \text{Sin}\sigma}{\text{Sin}(i_0 \pm \beta) \text{Cos}^2(i_0 \pm \beta)}. \quad (14)$$

Для выполнения условий (13) и (14) можно применить двухкоординатный дефлектор (сканер) с плоским СЗ типа БСКР [4], в ко-

тором для контроля углового положения СЗ используются интерферометрические измерители угловых перемещений (ИУП) СЗ [5].

Программа движения СЗ должна включать три последовательные стадии:

- перемещение СЗ из положения "на упорах" в начальное (среднее) положение ( $\alpha = 0, \beta = 0$ );
- перемещение СЗ на исходное угловое положение;
- рабочее перемещение СЗ по нужному закону в процессе сеанса съемки (наблюдения).

Начало сеанса начинается при отклонении СЗ на угол  $\beta = 1/2 \beta_c$  вперед (в направлении полета КА). Поскольку отсчет углов  $\beta$  производится относительно среднего положения СЗ (середины сеанса съемки), то текущее значение рабочего времени съемки будет иметь смещение, равное половине продолжительности сеанса съемки  $t_c$ . Таким образом, закон движения СЗ по углу  $\beta$  с учетом уравнения (13) будет описываться зависимостью:

$$\beta = \dot{\beta} \left( t - \frac{t_c}{2} \right) = \pi \frac{R_3}{H} \left( \frac{\cos\varphi \cdot \cos\sigma}{T_3} - \frac{1}{T_{КА}} \right) \left( t - \frac{t_c}{2} \right). \quad (15)$$

Для описания программы движения СЗ, выражаемой временной зависимостью числа управляющих импульсов  $N_\beta$ , следует использовать измерительную характеристику ИУП СЗ относительно оси  $OX_0$ , которая для вышеуказанного БСКР описывается зависимостью:

$$\sin\beta = K_\beta (\Delta\beta_0) N_\beta(t),$$

где  $K_\beta$  – постоянный коэффициент,  $(\Delta\beta_0)$  – угловой дискрет при  $\beta = 0$ .

В итоге программа движения СЗ по углу  $\beta$  описывается уравнением:

$$N_\beta(t) = \frac{1}{K_\beta (\Delta\beta_0)} \sin \left[ \pi \frac{R_3}{H} \left( \frac{\cos\varphi \cos\sigma}{T_3} - \frac{1}{T_{КА}} \right) \left( t - \frac{t_c}{2} \right) \right].$$

Отсчет угла  $\alpha$  производится от начала рабочего перемещения, поэтому закон движения СЗ по углу  $\alpha$  с учетом уравнения (14) будет:

$$\alpha = \dot{\alpha} t = \pi \frac{R_3}{H T_3} \cdot \frac{\cos\varphi \sin\sigma}{\sin(i_0 \pm \beta) \cos^2(i_0 \pm \beta)} t. \quad (16)$$

Измерительная характеристика ИУП СЗ относительно оси  $OZ_{СЗ}$  в БСКР задается зависимостью:

$$\text{Sin}\alpha = K_\alpha N_\alpha(t) \frac{1}{\text{Cos}\beta},$$

где  $K_\alpha$  - постоянный коэффициент,  $N_\alpha(t)$  - временная зависимость числа управляющих импульсов при повороте СЗ на угол  $\alpha$ ;

$$N_\alpha(t) = \frac{\text{Cos}\beta}{K_\alpha} \text{Sin} \left[ \pi \frac{R_3}{H T_3} \frac{\text{Cos}\varphi \text{Sin}\sigma}{\text{Sin}(i_0 \pm \beta) \text{Cos}^2(i_0 \pm \beta)} \right] t.$$

Надо иметь в виду, что при повороте СЗ на угол  $\alpha$  возникает поворот (наклон) изображения (в направлении поворота СЗ) на угол  $\varepsilon$ , определяемый зависимостью [6]:

$$\text{Sin}\varepsilon = \text{Sin}2\alpha \text{Sin}i_0.$$

При малых значениях угла  $\alpha$  :

$$\varepsilon \approx 2\alpha \text{Sin}i_0.$$

Поэтому при получении снимков с использованием многоэлементного (матричного) фотоприемного устройства (ФПУ) для компенсации возникающего наклона изображения необходимо поворачивать ФПУ вокруг оси  $OY_0$  на угол  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = 2\pi \frac{R_3}{H T_3} \cdot \frac{\text{Cos}\varphi \text{Sin}\sigma \text{Sin}i_0}{\text{Sin}(i_0 \pm \beta) \text{Cos}^2(i_0 \pm \beta)} t.$$

Оценим численные значения параметров стабилизации изображения для наблюдательной аппаратуры КА, находящейся, например, на круговой солнечно-синхронной орбите со средней высотой  $H = 650$  км, углом наклона плоскости орбиты  $\sigma = 98^\circ$ , периодом вращения  $T_{\text{КА}} = 98$  мин при продолжительности съемки  $t_c = 1$  с на широте  $\varphi = 60^\circ$ . С этой целью определим угловые скорости и углы поворота СЗ по формулам (13), (14), (15) и (16), полагая, что  $i_0 = 45^\circ$ :

$$|\beta| = 0,30625^\circ/\text{с}; \quad \alpha = 0,02689^\circ/\text{с}; \quad |2\beta| = 0,306265^\circ; \quad \alpha = 0,02689^\circ.$$

Сравнивая полученные значения скоростей и углов поворота СЗ для стабилизации изображения (с учетом условий упрощения использованных для их расчета уравнений) с параметрами БСКР [3], созданного для КА "Электро", можно сделать вывод, что подобное



устройство вполне успешно может быть использовано для целей стабилизации изображения в наблюдательной аппаратуре при длительной съемке, продолжительностью несколько секунд, с обеспечением стабильности углового положения поля изображения не хуже  $\pm 3$  угл.с.

При стабилизации изображения при визуальных наблюдениях с орбиты 300... 400 км с использованием БСКР продолжительность непрерывного наблюдения "неподвижного" изображения может составить несколько десятков секунд со стабильностью углового положения поля зрения не хуже  $\pm 1$  угл.мин.

Таким образом, на основании вышеизложенного, можно сделать вывод о возможности высокоточной стабилизации поля зрения (изображения) наблюдательной аппаратуры на борту КА с использованием БСКР (или его аналога) с продолжительностью съемки (наблюдения) от единиц до десятков секунд, что может существенно повысить чувствительность (соответственно радиометрическое и геометрическое разрешение) аппаратуры при неблагоприятных условиях наблюдения: малых альbedo и слабом контрасте наблюдаемых объектов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вевюрко И.А., Медушев С.В., Ремизов В.Е., Стома С.А. /Прецизионный электропривод с интерферометрическим измерителем перемещений и цифровым программным управлением // М.: Труды ВНИИЭМ. Т.78. 1985.
2. Автоматическая стабилизация оптического изображения. /Сб. под ред. Есекова Д.Н.// Л.: Машиностроение. 1988.
3. Горбунов А.В. /Малые космические аппараты - новые средства дистанционного зондирования Земли из космоса // М.: Труды ВНИИЭМ. Т.100. 2001.
4. Медведев Ю.Е., Медушев С.В., Ремизов В.Е., Шичков В.В. /Исследование метрологических характеристик БСКР //М.: Труды ВНИИЭМ. Т.100. 2001.
5. Вевюрко И.А., Ракитянский В.Е., Шичков В.В./ Интерферометрический измеритель угловых перемещений // М.: Труды ВНИИЭМ. Т.78. 1985.
6. Погарев Г.В. /Оптические юстировочные задачи // Л.: Машиностроение. 1974.