ВИЗУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЮСТИРОВКИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО КОМПЛЕКСА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Д.В. Лебедев, А.И. Ткаченко

Международный научно-учебный центр
информационных технологий и систем НАН и МОНМС Украины
e-mail: dep180@irtc.org.ua

Семинар «Образный компьютер»
г. Киев, 31 января 2012 г.

План выступления

1. Введение
2. Варианты схемы решения задачи
3. Алгоритмы оценки взаимной ориентации трехгранников
4. Сценарии и результаты моделирования
5. Заключение

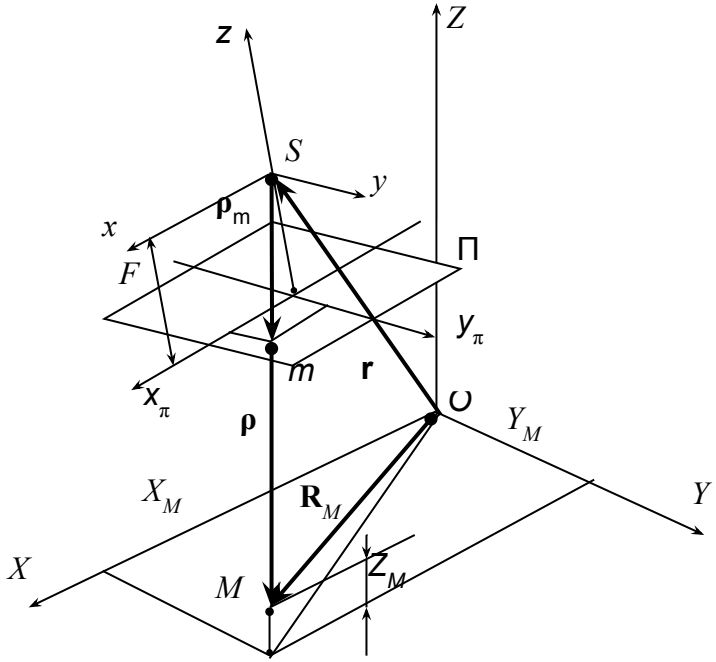


Рисунок 1 – Формирование отображения точки *M* на плоскости П

(r, C)

$$\rho_m = \kappa\,\rho,\ \ \rho = \mathbf{R}_M - \mathbf{r} \qquad (1)$$

В системе координат *XYZ* (*I*)

$$\rho_{mI} = \mathbf{C}^T \rho_{mE}$$

$$\rho_{mE} = \{x,\, y,\, -F\}$$

$$\rho_I = \{X_M - X_I,\, Y_M - Y_I,\, Z_M - Z_I\}$$

В системе координат *xyz* (*E*)

$$\rho_{mE} = \{x,\, y,\, -F\}$$

$$\rho_E = \{\rho_x,\, \rho_y,\, \rho_z\} = \mathbf{C}\rho_I$$

$$X_M = X_I + (Z_M - Z_I)\frac{c_{11}x + c_{21}y - c_{31}F}{c_{13}x + c_{23}y - c_{33}F},$$

$$Y_M = Y_I + (Z_M - Z_I)\frac{c_{12}x + c_{22}y - c_{32}F}{c_{13}x + c_{23}y - c_{33}F}. \qquad (2)$$

$$x = -F\frac{c_{11}(X_M - X_I) + c_{12}(Y_M - Y_I) + c_{13}(Z_M - Z_I)}{c_{31}(X_M - X_I) + c_{32}(Y_M - Y_I) + c_{33}(Z_M - Z_I)},$$

$$y = -F\frac{c_{21}(X_M - X_I) + c_{22}(Y_M - Y_I) + c_{23}(Z_M - Z_I)}{c_{31}(X_M - X_I) + c_{32}(Y_M - Y_I) + c_{33}(Z_M - Z_I)}. \qquad (3)$$

$$\begin{tikzcd} \mathbf{I} \arrow[r, "C"] \arrow[dr, "C'"'] & \mathbf{E} \arrow[d, "\boldsymbol{\Theta}"] \\ & \mathbf{E'} \end{tikzcd}$$

I – опорная система координат (СК);

E – СК, жестко связанная с КА;

E’ – СК, связанная с оптической системой КА (камерой)

$$x' = \frac{a_{11}x + a_{12}y + a_{13}}{a_{31}x + a_{32}y + a_{33}}, \quad y' = \frac{a_{21}x + a_{22}y + a_{23}}{a_{31}x + a_{32}y + a_{33}} \tag{4}$$

$$\det\{a_{ij}\} \neq 0$$

$$x' = \frac{a_1x + a_2y + a_3}{a_7x + a_8y + 1}, \quad y' = \frac{a_4x + a_5y + a_6}{a_7x + a_8y + 1}, \tag{5}$$

$$a_i = a_{1i} / a_{33},\ a_{i+3} = a_{2i} / a_{33},\ a_7 = a_{31} / a_{33},\ a_8 = a_{32} / a_{33}\ (i = 1, 2, 3)$$

$$\mathbf{R}_M = \{X_M, Y_M, 0\},\ \mathbf{r_I} = \{0, 0, Z_*\},\ \mathbf{C} = \mathbf{E}_3 \tag{6}$$

$$x^* = FX_M / Z_*, \quad y^* = FY_M / Z_*\,. \tag{7}$$

$$x = \frac{a_1x^* + a_2y^* + a_3}{a_7x^* + a_8y^* + 1}, \quad y = \frac{a_4x^* + a_5y^* + a_6}{a_7x^* + a_8y^* + 1} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} &a_1 = c_{11}Z_* / Z_E,\ a_2 = c_{12}Z_* / Z_E,\ a_3 = -FX_E / Z_E, \\ &a_4 = c_{21}Z_* / Z_E,\ a_5 = c_{22}Z_* / Z_E,\ a_6 = -FY_E / Z_E, \\ &a_7 = -c_{31}Z_* / (FZ_E), \quad a_8 = -c_{32}Z_* / (FZ_E) \end{aligned} \tag{9}$$

$$a_1^2 + a_4^2 + F^2a_7^2 = a_2^2 + a_5^2 + F^2a_8^2 = Z_*^2 / Z_E^2, \quad a_1a_2 + a_4a_5 + F^2a_7a_8 = 0. \tag{10}$$

$$
\begin{gathered}
c_{11} = a_1 / q, \quad c_{12} = a_2 / q, \quad c_{13} = F(a_5 a_7 - a_4 a_8) / q^2, \\
c_{21} = a_4 / q, \quad c_{22} = a_5 / q, \quad c_{23} = F(a_1 a_8 - a_2 a_7) / q^2, \\
c_{31} = -F a_7 / q, \quad c_{32} = -F a_8 / q, \quad c_{33} = (a_1 a_5 - a_2 a_4) / q^2, \\
X_E = -Z_* a_3 / (qF), \quad Y_E = -Z_* a_6 / (qF), \quad Z_E = Z_* / q, \\
\mathbf{r_I} = \mathbf{C}^T \mathbf{r_E}, \quad q = (a_1^2 + a_4^2 + F^2 a_7^2)^{1/2} = (a_2^2 + a_5^2 + F^2 a_8^2)^{1/2}.
\end{gathered}
\tag{11}
$$

Алгоритм 1

$$
\begin{gathered}
a_1 x_i^* + a_2 y_i^* + a_3 = x_i (a_7 x_i^* + a_8 y_i^* + 1), \\
a_4 x_i^* + a_5 y_i^* + a_6 = y_i (a_7 x_i^* + a_8 y_i^* + 1) \\
(i \geq 4)
\end{gathered}
\tag{12}
$$

$$
\Theta = C' C^T \tag{13}
$$

$M_1 = \{50; 0; 0{,}05\}$, $M_2 = \{0; 50; 0{,}1\}$, $M_3 = \{-50; 0; -0{,}02\}$, $M_4 = \{0; -50; -0{,}08\}$ (*км*)

$F = 1$ *м*, $H_o = 400$ *км*, $i = 98^\circ$, $\varphi_* = 44^\circ 27'$, $\lambda_* = 9^\circ 07'$

t, *с*	$r_p = 0$		$r_p = 1$ *м*		$r_p = 5$ *м*	
	μ, *угл. с*	δr, *м*	μ, *угл. с*	δr, *м*	μ, *угл. с*	δr, *м*
5	20,5	131,7	26,9	109,3	36,0	44,0
10	12,1	82,4	12,6	92,8	110,3	147,8
15	6,9	41,0	13,7	94,2	114,8	140,8
20	9,6	17,8	20,8	64,8	134,4	551,7
25	13,7	7,6	14,8	110,8	129,0	149,7
30	17,1	4,5	22,7	22,6	67,5	156,9
35	19,7	4,8	37,1	23,9	171,1	78,7
40	21,7	6,6	21,9	11,6	116,0	73,7
45	23,3	9,0	6,5	48,3	72,4	219,0
50	24,4	11,2	38,1	18,7	166,8	293,6

Алгоритм 2

$$X_n = X + (Z_n - Z)\frac{c_{11}x_n + c_{21}y_n + c_{31}z_n}{c_{13}x_n + c_{23}y_n + c_{33}z_n}, \qquad (14)$$

$$Y_n = Y + (Z_n - Z)\frac{c_{12}x_n + c_{22}y_n + c_{32}z_n}{c_{13}x_n + c_{23}y_n + c_{33}z_n}.$$

X_n, Y_n, Z_n – координаты *n*-го наземного ориентира в системе координат **I**;

X, Y, Z – координаты центра масс КА в СК **I** (от GPS);

c_{ij} – элементы матрицы направляющих косинусов между **I** и **E** (от астросистемы);

x_n, y_n, z_n – координаты отображения *n*-го наземного ориентира, представленные в СК **E**.

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix} = \Theta^T \begin{bmatrix} x_n' \\ y_n' \\ -F \end{bmatrix} \cong (E - \Phi(\theta)) \begin{bmatrix} x_n' \\ y_n' \\ -F \end{bmatrix} \qquad (15)$$

$$\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$$

$$A_i = c_{3,i} y' + c_{2,i} F, \;\; B_i = c_{3,i} x' + c_{1,i} F,$$

$$C_i = c_{2,i} x' - c_{1,i} y', \;\; D_i = c_{1,i} x' + c_{2,i} y' - c_{3,i} F \quad (i = 1, 2, 3) \tag{16}$$

$$\rho_{X_n} = \frac{X_n - X}{Z_n - Z}, \;\; \rho_{Y_n} = \frac{Y_n - Y}{Z_n - Z}$$

$$\mathbf{q}_n = G_n \theta \tag{17}$$

$$\mathbf{q}_n = \{q_{1,n}, q_{2,n}\}, \;\; G_n = \{G_{jk,n}\} \;\; (j = 1, 2; k = 1, 2, 3)$$

$$G_{11,n} = A_1 - \rho_{X_n} A_3, \quad G_{12,n} = -(B_1 - \rho_{X_n} B_3), \quad G_{13,n} = C_1 - \rho_{X_n} C_3,$$

$$G_{21,n} = A_2 - \rho_{Y_n} A_3, \quad G_{22,n} = -(B_2 - \rho_{Y_n} B_3), \quad G_{23,n} = C_2 - \rho_{Y_n} C_3,$$

$$q_{1,n} = D_1 - \rho_{X_n} D_3, \quad q_{2,n} = D_2 - \rho_{Y_n} D_3$$

$$B_n \theta = \mathbf{y}_n \tag{18}$$

$$B_n = \sum_{k=1}^{n} G_k^T G_k = B_{n-1} + G_n^T G_n, \quad \mathbf{y}_n = \sum_{k=1}^{n} G_k^T \mathbf{y}_k = \mathbf{y}_{n-1} + G_n^T \mathbf{q}_n$$

$$B_0 = 0, \;\; \mathbf{y}_0 = 0$$

Алгоритм 3

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix} = \Theta^T \begin{bmatrix} x_n^{'} \\ y_n^{'} \\ -F \end{bmatrix} \cong (E - \Phi(\theta)) \begin{bmatrix} x_n^{'} \\ y_n^{'} \\ -F \end{bmatrix} \tag{19}$$

$x_n^{'}, y_n^{'}$ – координаты отображения n-го наземного ориентира на плоскость изображений П оптической системы; F – фокусное расстояние системы;

x_n, y_n, z_n – координаты отображения n-го наземного ориентира, представленные в СК **E** .

$$\begin{aligned} x_n &= -F \frac{c_{11}(X_n - X_I) + c_{12}(Y_n - Y_I) + c_{13}(Z_n - Z_I)}{c_{31}(X_n - X_I) + c_{32}(Y_n - Y_I) + c_{33}(Z_n - Z_I)}, \\ y_n &= -F \frac{c_{21}(X_n - X_I) + c_{22}(Y_n - Y_I) + c_{23}(Z_n - Z_I)}{c_{31}(X_n - X_I) + c_{32}(Y_n - Y_I) + c_{33}(Z_n - Z_I)}. \end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{gathered} \mathbf{q}_n = G_n \theta \\ \mathbf{q}_n = \begin{bmatrix} x_n - x_n^{'} \\ y_n - y_n^{'} \end{bmatrix}, \; G_n = \begin{bmatrix} 0 & F & -x_n^{'} \\ -F & 0 & y_n^{'} \end{bmatrix} \end{gathered} \tag{21}$$

$$\begin{gathered} B_n \theta = \mathbf{y}_n \\ B_n = \sum_{k=1}^{n} G_k^T G_k = B_{n-1} + G_n^T G_n, \quad \mathbf{y}_n = \sum_{k=1}^{n} G_k^T \mathbf{y}_k = \mathbf{y}_{n-1} + G_n^T \mathbf{q}_n \\ B_0 = 0, \; \mathbf{y}_0 = 0 \end{gathered} \tag{22}$$

Система возмущений

Оптическая система (камера)

$$x_i^{'} = x_i^{''} + \xi_{x^{'}}, \quad y_i^{'} = y_i^{''} + \xi_{y^{'}}; \quad M[\xi_{x_i^{'}}] = M[\xi_{y_i^{'}}] = 0, \; M[\xi_{x_i^{'}}^2] = M[\xi_{y_i^{'}}^2] = \sigma_K^2$$

Звездный датчик

$$C_\delta = E + \Phi(\delta), \quad \delta = \{\delta_1, \delta_2, \delta_3\}, \quad \Phi(\delta) = \begin{bmatrix} 0 & -\delta_3 & \delta_2 \\ \delta_3 & 0 & -\delta_1 \\ -\delta_2 & \delta_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \delta_i = \xi_{\delta_i}, M[\xi_{\delta_i}] = 0, M[\xi_{\delta_i}^2] = \sigma_{\delta_i}^2$$

GPS

$$X = \overset{\circ}{X} + \xi_X, \; Y = \overset{\circ}{Y} + \xi_Y, \; Z = \overset{\circ}{Z} + \xi_Z;$$
$$M[\xi_X] = M[\xi_Y] = M[\xi_Z] = 0, \; M[\xi_X^2] = M[\xi_Y^2] = M[\xi_Z^2] = \sigma_R^2$$

Наземные ориентиры

$$X_n = \overset{\circ}{X}_n + \xi_{X_n}, \; Y_n = \overset{\circ}{Y}_n + \xi_{Y_n}, \; Z_n = \overset{\circ}{Z}_n + \xi_{Z_n};$$
$$M[\xi_{X_n}] = M[\xi_{Y_n}] = M[\xi_{Z_n}] = 0, \; M[\xi_{X_n}^2] = M[\xi_{Y_n}^2] = M[\xi_{Z_n}^2] = \sigma_P^2$$

$$\widetilde{m} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i, \quad \widetilde{D} = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(X_i - \widetilde{m})^2$$

$$\sigma_{\widetilde{D}} = \sqrt{\frac{2}{n-1}}\widetilde{D}$$

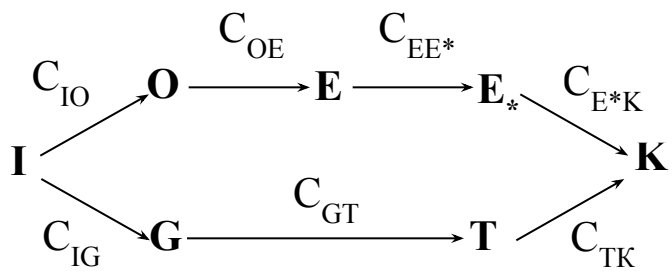
$$I_\beta = (\widetilde{D} - t_\beta \sigma_{\widetilde{D}},\ \widetilde{D} + t_\beta \sigma_{\widetilde{D}}) \qquad t_\beta = \arg\Phi^*\left(\frac{1+\beta}{2}\right)$$

$$(\sqrt{\widetilde{D} + t_\beta \sigma_{\widetilde{D}}} - \sqrt{\widetilde{D}})/\sqrt{\widetilde{D}} \le \varepsilon$$

$$n \ge \frac{t_\beta^2}{2\varepsilon^2}$$

;

$$t_\beta = 3 \ \ (\beta = 0.9973),\ \ \varepsilon = 0.01 \quad n \ge 45000$$



При решении задачи юстировки искомой является матрица C_{E*K}, при моделировании –
матрица C_{TK}. Последняя вычисляется по формуле

$$C_{TK} = \begin{cases} C_{E*K} C_{OE} C_{IO} C_{IG}^T C_{GT}^T \\ C_{EE*} C_{OE} C_{IO} C_{IG}^T C_{GT}^T, \end{cases} \tag{23}$$

в которой первая строка отвечает случаю, когда используется информация от камеры (при $C_{EE*} = E_3$), вторая – при использовании информации от звездного датчика.

Принимается аппроксимация матрицы C_{E*K} вида

$$\begin{aligned} C_{E*K} &= E_3 - \Phi(\theta) \\ \theta &= [\theta_x, \theta_y, \theta_z]^T \end{aligned} \tag{24}$$

Орты $\mathbf{e}_c$ и $\mathbf{e}_T$ радиусов-векторов центра масс КА и вершины трехгранника Т соответственно в проекциях на оси инерциальной системы координат I находятся по формулам

$$\mathbf{e}_c = \begin{bmatrix} \cos u \sin \Omega + \sin u \cos \Omega \cos i \\ \sin u \sin i \\ \cos u \cos \Omega - \sin u \sin \Omega \cos i \end{bmatrix}, \mathbf{e}_T = \begin{bmatrix} \cos \varphi_* \sin \Lambda_G \\ \sin \varphi_* \\ \cos \varphi_* \cos \Lambda_G \end{bmatrix} \tag{25}$$

где u – аргумент широты, i – наклонение орбиты, Ω – долгота восходящего узла орбиты; $\Lambda_G = \lambda_G + \lambda_*$ (λ_G – текущее значение угла между направлением на точку весны и Гринвичским меридианом).

Из равенства $\mathbf{e}_c = \mathbf{e}_T$, которое выполняется в момент прохождения траектории КА через точку надира, при известных значениях углов $i, \Omega, \lambda_*, \varphi_*$ вычислим значения углов $u = u_*$ и $\Lambda_G = \Lambda_G^*$. Тогда в момент времени τ, отсчитанным от точки надира, справедливы равенства

$$\mathbf{e}_c(\tau) = \begin{bmatrix} \cos(u_* + \omega_o \tau) \sin \Omega + \sin(u_* + \omega_o \tau) \cos \Omega \cos i \\ \sin(u_* + \omega_o \tau) \sin i \\ \cos(u_* + \omega_o \tau) \cos \Omega - \sin(u_* + \omega_o \tau) \sin \Omega \cos i \end{bmatrix}, \tag{26}$$

$$\mathbf{e}_T(\tau) = [\cos \varphi_* \sin \Lambda, \ \sin \varphi_*, \ \cos \varphi_* \cos \Lambda]^T,$$

$$\Lambda = \Lambda_G^* + \omega_3 \tau$$

$$\rho_{i,T}(\tau) = C_{IT}\rho_I^*(\tau) - \mathbf{r}_{i,T},$$
$$\rho_I^*(\tau) = (R+H)\mathbf{e}_c(\tau) - R\mathbf{e}_T(\tau),$$
$$C_{IT} = C_{GT}C_{IG} = \begin{bmatrix} \cos\Lambda & 0 & -\sin\Lambda \\ -\sin\varphi_* \sin\Lambda & \cos\varphi_* & -\sin\varphi_* \cos\Lambda \\ \cos\varphi_* \sin\Lambda & \sin\varphi_* & \cos\varphi_* \cos\Lambda \end{bmatrix}. \tag{27}$$

$$\frac{\partial\sigma_\theta}{\partial\sigma_\beta} = \left\{\frac{\partial\sigma_{\theta_i}}{\partial\sigma_{\beta_j}}\right\}, \quad \frac{\partial\sigma_\theta}{\partial\sigma_P} = \left\{\frac{\partial\sigma_{\theta_i}}{\partial\sigma_P}\right\}, \quad \frac{\partial\sigma_\theta}{\partial\sigma_R} = \left\{\frac{\partial\sigma_{\theta_i}}{\partial\sigma_R}\right\}, \frac{\partial\sigma_\theta}{\partial\sigma_K} = \left\{\frac{\partial\sigma_{\theta_i}}{\partial\sigma_K}\right\}$$
$$(i = x, y, z; \ j = 1, 2, 3)$$

$$\sigma_\beta = \{\sigma_{\beta_i}\}, \qquad \sigma_\theta^\beta = \left\{\sigma_{\theta_i}^\beta\right\} = \left\{\sqrt{\sum_{j=1}^{3}\left(\frac{\partial\sigma_{\theta_i}}{\partial\sigma_{\beta_j}}\sigma_{\beta_j}\right)^2}\right\}$$

Характеристики круговой орбиты: высота – 680 *км*; наклонение орбиты – 98 *град*. *фокусное расстояние – 2,2 м; угол зрения – 3,4 град.*

$$\sigma_{\beta_1} = \sigma_{\beta_2} = \sigma_{\beta_3} = 4'', \ \sigma_P = 0.1 м, \ \sigma_R = 15 м, \ \sigma_K = 3 \cdot 10^{-6} м, \ \sigma_{\theta_0} = 10'$$

$$\sigma_{\theta_x} = 6.09, \ \sigma_{\theta_y} = 6.09, \ \sigma_{\theta_z} = 8.36, \ \sigma_\theta^\Sigma = 11.98 \ (угл.\,с)$$

$$\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \sigma_K} = [0.04 \cdot 10^6 \ \ 0.04 \cdot 10^6 \ \ 2.47 \cdot 10^6]^T \ угл.\,сек/м, \quad \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \sigma_K} = 2.47 \cdot 10^6 \ угл.\,сек/м$$

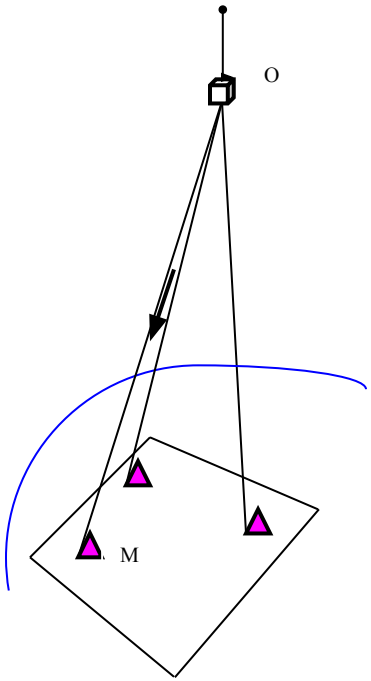
$$\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \sigma_R} = [0.30 \ \ 0.30 \ \ 0]^T \ угл.\,сек/м, \quad \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \sigma_R} = 0.43 \ угл.\,сек/м$$

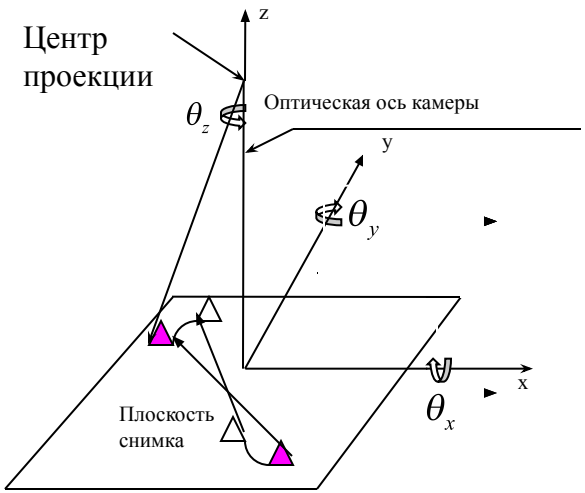
$$\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \sigma_P} = [0.12 \ \ 0.12 \ \ 7.88]^T \ угл.\,сек/м, \quad \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \sigma_P} = 7.88 \ угл.\,сек/м \qquad (28)$$

$$\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \sigma_{\beta_1}} = [0.49 \ \ 0.81 \ \ 0.33]^T, \ \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \sigma_{\beta_2}} = [0.70 \ \ 0.14 \ \ 0.70]^T, \ \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \sigma_{\beta_3}} = [0.53 \ \ 0.57 \ \ 0.64]^T,$$

$$\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \sigma_{\beta_1}} = \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \sigma_{\beta_2}} = \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \sigma_{\beta_3}} = 1;$$

,





$\boldsymbol{\theta}_K = [\theta_x, \theta_y, \theta_z]$ - неизвестный малый вектор углового рассогласования камеры и звездного датчика;

θ_x, θ_y - отклонения модельной плоскости снимка от ее фактического положения;

θ_z - фиктивный поворот изображения в плоскости снимка.

$\mathbf{s}_i = [x_i \;\; y_i \;\; -F]^T$ – вектор направления на ориентир в базисе камеры; где

x_i, y_i – координаты отображения

i-го ориентира на чувствительной площадке камеры,

F – фокусное расстояние камеры;

$\mathbf{e}_{iK} = \|\mathbf{s}_i\|^{-1}\mathbf{s}_i \approx [x_i/F, \; y_i/F, \; -1]$ – орт направления на ориентир в базисе камеры.

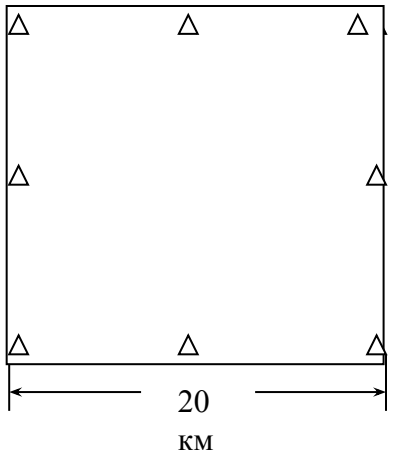
OM – вектор направления на ориентир (находится по заданным координатам ориентира и информации GPS
о местонахождении объекта);

$\mathbf{e}_{iI} = OM/|OM|$ – орт направления на ориентир в инерциальном базисе;

A – преобразование координат из инерциального базиса к осям звездного датчика (по показаниям последнего)

Q – фактическое преобразование из базиса звездного датчика в базис камеры;

$Q^* = Q^*(\boldsymbol{\theta})$ – неточно заданное значение Q.



$$QA\mathbf{e}_{iI} = \mathbf{e}_{iK}, \qquad \mathbf{e}^*_{iK} = Q^* A\mathbf{e}_{iI} \neq \mathbf{e}_{iK} \tag{29}$$

$$\boldsymbol{\theta}_{iK} - \mathbf{e}^*_{iK}\mathbf{e} = \boldsymbol{\theta}_{iK} \times \quad = \Phi(\quad_{iK}) \quad (i=1, 2,\ldots,n). \tag{30}$$

$$\Gamma_n\boldsymbol{\theta} = \mathbf{g}_n, \quad \Gamma_n = \sum_{i=1}^{n}\Phi^2(\mathbf{e}_{iK}), \quad \mathbf{g}_n = -\sum_{i=1}^{n}\Phi(\mathbf{e}_{iK})\mathbf{e}^*_{iK} \tag{31}$$

$$\mathbf{x} = A(t)\mathbf{x}, \quad \mathbf{y} = H(t)\mathbf{x} \tag{32}$$

Начальная неопределенность распределена по нормальному закону, среднеквадратическое отклонение 10 угл. секунд.

Среднеквадратические отклонения ошибок юстировки

Число снимков	$\sigma_{\theta x}$, угл. с	$\sigma_{\theta y}$, угл. с	$\sigma_{\theta z}$, угл. с	Примечание
1	2.9	3.2	18.8	
2	2.2	2.3	13.3	
4	1.7	1.9	10.6	
8	3.8	3.5	7.5	
12	4.3	4.2	7.0	
20	4.6	4.3	6.4	
20	4.6	4.2	5.4	Уточн. разреш.

Максимальные абсолютные значения ошибок юстировки

Число снимков	max $\lvert\theta_x\rvert$, угл. с	max $\lvert\theta_y\rvert$, угл. с	max $\lvert\theta_z\rvert$, угл. с	Примечание
1	8.4	8.1	78.3	
2	6.5	5.9	50.6	
4	5.3	5.1	36.1	
8	11.9	11.5	23.0	
12	11.9	12.1	23.9	
20	12.2	12.8	25.4	
20	12.2	12.8	18.5	Уточн. разреш.