

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

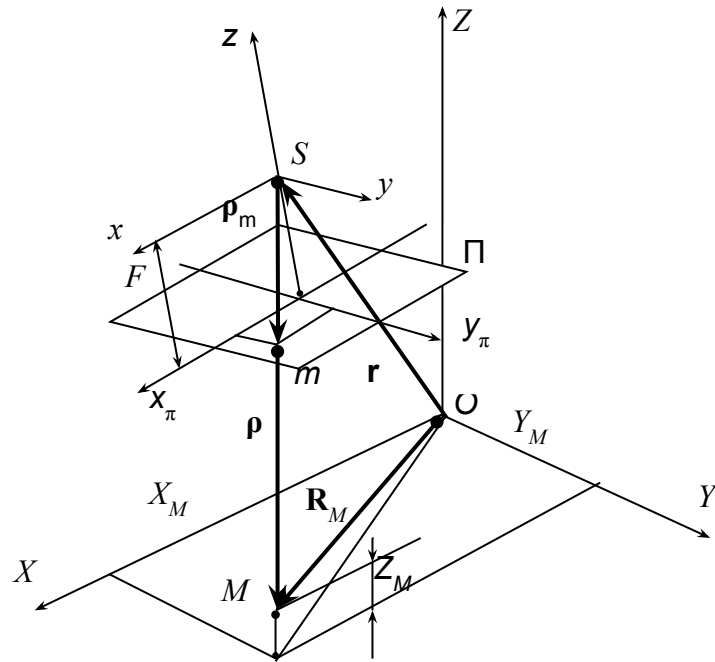


Рисунок 1 – Формирование отображения точки M на плоскости Π

(r, C)

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

В системе координат XYZ (I)

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

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

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

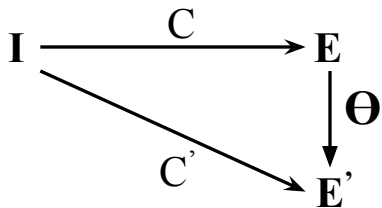
В системе координат xyz (E)

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

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

$$\begin{aligned}
 X_M &= X_I + (Z_M - Z_I) \frac{c_{11}x + c_{21}y - c_{31}F}{c_{13}x + c_{23}y - c_{33}F}, \\
 Y_M &= Y_I + (Z_M - Z_I) \frac{c_{12}x + c_{22}y - c_{32}F}{c_{13}x + c_{23}y - c_{33}F}.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 x &= -F \frac{c_{11}(X_M - X_I) + c_{12}(Y_M - Y_I) + c_{13}(Z_M - Z_I)}{c_{31}(X_M - X_I) + c_{32}(Y_M - Y_I) + c_{33}(Z_M - Z_I)}, \\
 y &= -F \frac{c_{21}(X_M - X_I) + c_{22}(Y_M - Y_I) + c_{23}(Z_M - Z_I)}{c_{31}(X_M - X_I) + c_{32}(Y_M - Y_I) + c_{33}(Z_M - Z_I)}.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$



- I – опорная система координат (СК);
- E – СК, жестко связанная с КА;
- E' – СК, связанная с оптической системой КА (камерой)

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

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

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

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

$$\mathbf{R}_M = \{X_M, Y_M, 0\}, \quad \mathbf{r}_I = \{0, 0, Z_*\}, \quad \mathbf{C} = \mathbf{E}_3 \quad (6)$$

$$x^* = FX_M / Z_*, \quad y^* = FY_M / Z_* \quad (7)$$

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

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

$$a_1^2 + a_4^2 + F^2 a_7^2 = a_2^2 + a_5^2 + F^2 a_8^2 = Z_*^2 / Z_E^2, \quad a_1 a_2 + a_4 a_5 + F^2 a_7 a_8 = 0. \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
c_{11} &= a_1/q, & c_{12} &= a_2/q, & c_{13} &= F(a_5a_7 - a_4a_8)/q^2, \\
c_{21} &= a_4/q, & c_{22} &= a_5/q, & c_{23} &= F(a_1a_8 - a_2a_7)/q^2, \\
c_{31} &= -Fa_7/q, & c_{32} &= -Fa_8/q, & c_{33} &= (a_1a_5 - a_2a_4)/q^2, \\
X_E &= -Z_*a_3/(qF), & Y_E &= -Z_*a_6/(qF), & Z_E &= Z_*/q, \\
\mathbf{r}_I &= \mathbf{C}^T \mathbf{r}_E, & q &= (a_1^2 + a_4^2 + F^2a_7^2)^{1/2} = (a_2^2 + a_5^2 + F^2a_8^2)^{1/2}.
\end{aligned} \tag{11}$$

Алгоритм 1

$$\begin{aligned}
a_1x_i^* + a_2y_i^* + a_3 &= x_i(a_7x_i^* + a_8y_i^* + 1), \\
a_4x_i^* + a_5y_i^* + a_6 &= y_i(a_7x_i^* + a_8y_i^* + 1) \\
&(i \geq 4)
\end{aligned} \tag{12}$$

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

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

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

t, c	$r_p = 0$		$r_p = 1 \text{ м}$		$r_p = 5 \text{ м}$	
	$\mu, \text{ угл. с}$	$\delta r, \text{ м}$	$\mu, \text{ угл. с}$	$\delta r, \text{ м}$	$\mu, \text{ угл. с}$	$\delta r, \text{ м}$
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

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

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

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**.

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

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

$$\begin{aligned}
A_i &= c_{3,i}y' + c_{2,i}F, \quad B_i = c_{3,i}x' + c_{1,i}F, \\
C_i &= c_{2,i}x' - c_{1,i}y', \quad D_i = c_{1,i}x' + c_{2,i}y' - c_{3,i}F \quad (i=1, 2, 3)
\end{aligned} \tag{16}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Алгоритм 3

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

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 Е .

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

$$\mathbf{q}_n = \begin{bmatrix} x_n - x'_n \\ y_n - y'_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{q}_n = G_n \theta, \quad G_n = \begin{bmatrix} 0 & F & -x'_n \\ -F & 0 & y'_n \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$B_n \theta = \mathbf{y}_n \quad (22)$$

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

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

Система возмущений

Оптическая система

(камера)

Звездный датчик

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

GPS

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

$$X = \overset{\boxtimes}{X} + \xi_{X_n}, \quad Y = \overset{\boxtimes}{Y} + \xi_{Y_n}, \quad Z = \overset{\boxtimes}{Z} + \xi_{Z_n};$$

$$M[\xi_{X_n}] = M[\xi_{Y_n}] = M[\xi_{Z_n}] = 0, \quad M[\xi_{X_n}^2] = M[\xi_{Y_n}^2] = M[\xi_{Z_n}^2] = \sigma_R^2$$

Наземные ориентиры

$$X_n = \overset{\boxtimes}{X}_n + \xi_{X_n}, \quad Y_n = \overset{\boxtimes}{Y}_n + \xi_{Y_n}, \quad Z_n = \overset{\boxtimes}{Z}_n + \xi_{Z_n};$$

$$M[\xi_{X_n}] = M[\xi_{Y_n}] = M[\xi_{Z_n}] = 0, \quad M[\xi_{X_n}^2] = M[\xi_{Y_n}^2] = M[\xi_{Z_n}^2] = \sigma_P^2$$

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

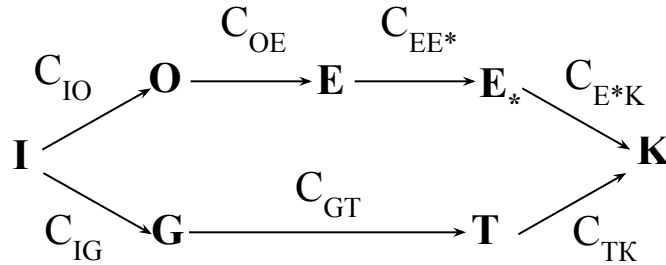
$$\sigma_{\tilde{D}} = \sqrt{\frac{2}{n-1} \tilde{D}}$$

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

$$(\sqrt{\tilde{D} + t_{\beta} \sigma_{\tilde{D}}} - \sqrt{\tilde{D}}) / \sqrt{\tilde{D}} \leq \varepsilon$$

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

$$t_{\beta} = 3 \quad (\beta = 0.9973), \quad \varepsilon = 0.01 \quad n \geq 45000$$



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

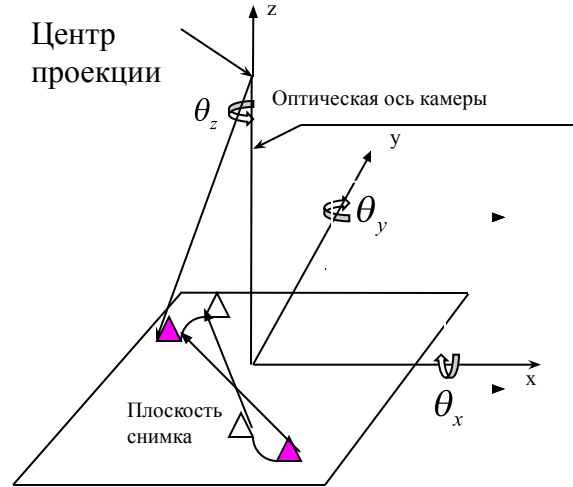
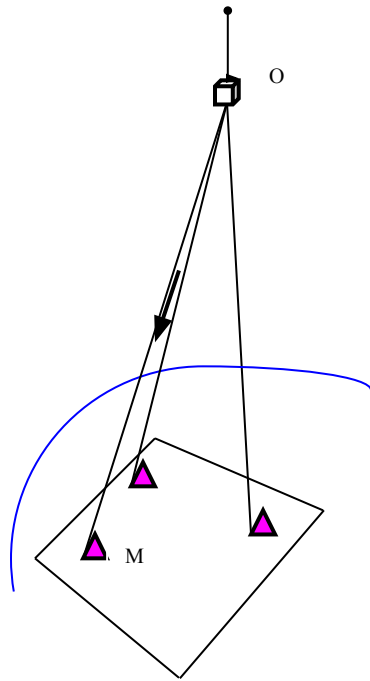
$$\frac{\partial \sigma_{\theta}}{\partial \sigma_R} = [0.30 \quad 0.30 \quad 0]^T \text{ угл. сек / м}, \quad \frac{\partial \sigma_{\theta}}{\partial \sigma_R} = 0.43 \text{ угл. сек / м}$$

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

(28)

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

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



$\theta_K = [\theta_x, \theta_y, \theta_z]$ - 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

x_i, y_i – координаты ориентира на чувствительной площадке

i -го ориентира на чувствительной площадке

камеры,

F – фокусное расстояние

камеры; \mathbf{e}_{iK} – орт направления на ориентир в базисе

$\mathbf{e}_{iK} = \frac{\mathbf{s}_i}{\|\mathbf{s}_i\|} \approx [x_i/F, y_i/F, -1]$ камеры.

OM – вектор направления на ориентир (находится по заданным координатам ориентира и информации GPS

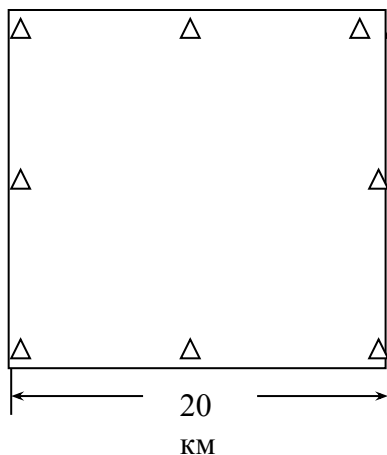
о местонахождении объекта);

$\mathbf{e}_{iI} = OM / |OM|$ – 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;

$Q^* = Q^*(\theta)$ – неточно заданное значение Q



$$QA\mathbf{e}_{iI} = \mathbf{e}_{iK}, \quad \mathbf{e}_{iK}^* = Q^*A\mathbf{e}_{iI} \neq \mathbf{e}_{iK} \quad (29)$$

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

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

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

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

Среднеквадратические отклонения ошибок юстировки

Число снимков	σ_{θ_x} , угл. с	σ_{θ_y} , угл. с	σ_{θ_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 \theta_x $, угл. с	$\max \theta_y $, угл. с	$\max \theta_z $, 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.