



Использование кластерного блока чувствительных элементов для поиска и устранения cycle-slip в интегрированном спутниковом навигационном приемнике

Новичков А.Р.¹ Гончаров И.К.¹ Егорушкин А.Ю.¹

¹Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э.
Баумана
МГТУ им. Н.Э. Баумана

International Workshop Navigation and Motion Control, 2021



Введение

- ▶ Кластерный блок чувствительных элементов
- ▶ Оценка погрешностей кластерного инерциального блока
- ▶ Оценка выходных погрешностей БИНС на базе кластерного инерциального блока
- ▶ Схема интеграции ИНС/ГНСС
- ▶ Дальнейшие планы

Кластерный блок чувствительных элементов

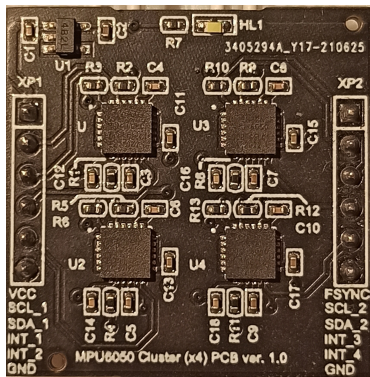


Рис. 1: Печатная плата кластерного БЧЭ

Остаточная погрешность чувствительных элементов

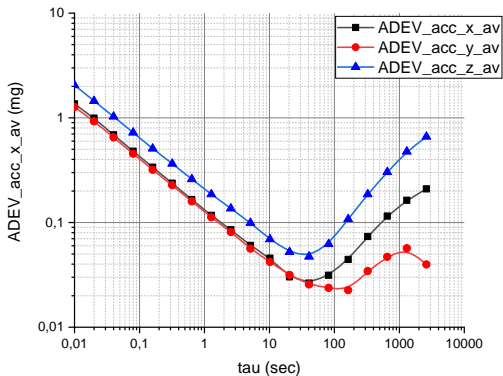


Рис. 2: Девииции Аллана для акселерометров

Остаточная погрешность чувствительных элементов

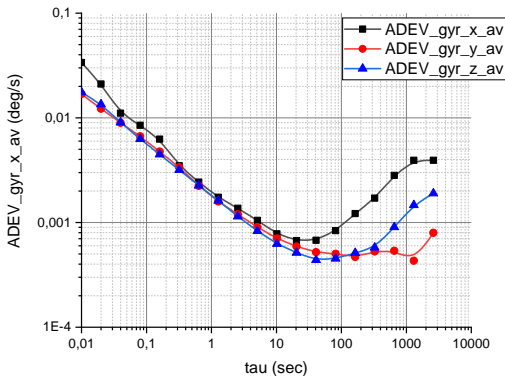


Рис. 3: Девиации Аллана для гироскопов



Выходные погрешности БИНС

$$\delta V_e(t) = -\Phi_y(0)R \sin \nu t + \delta V_x(0) \cos \nu t - \xi_y R(1 - \cos \nu t) + \frac{\sin \nu t}{\nu} B_x(0) \quad (1)$$

$$\delta V_n(t) = -\Phi_x(0)R \sin \nu t + \delta V_y(0) \cos \nu t + \xi_x R(1 - \cos \nu t) + \frac{\sin \nu t}{\nu} B_y(0) \quad (2)$$

$$\lambda(t) = \int \frac{\delta V_e(t)}{R \cos \phi} dt \quad (3)$$

$$\phi(t) = \int \frac{\delta V_n(t)}{R \cos \phi} dt \quad (4)$$

где $\nu = \sqrt{\frac{g}{R}}$ - шулеровская частота колебания;

$B_x(0), B_y(0)$ - смещения нулей акселерометра;

ξ_x, ξ_y, ξ_z - дрейф гироскопа;

Погрешность в определении координат

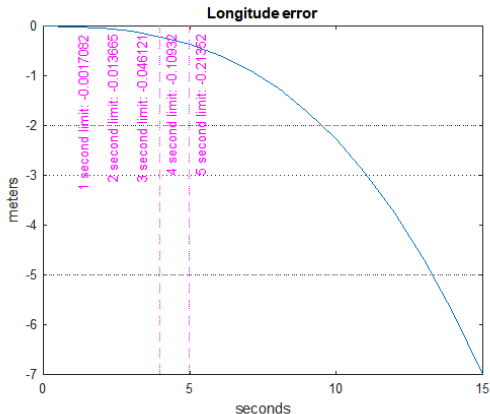


Рис. 4: График нарастания ошибки в определении долготы места



Погрешность в определении координат

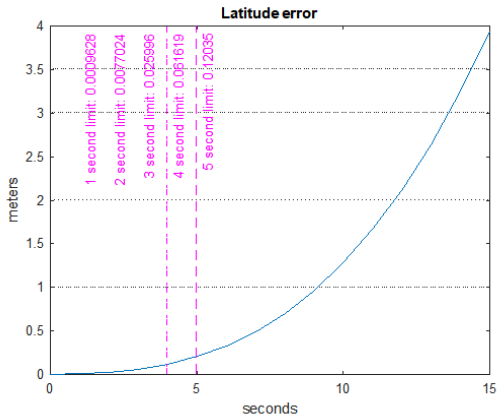


Рис. 5: График нарастания ошибки в определении широты места

Схема интеграции ИНС/ГНСС

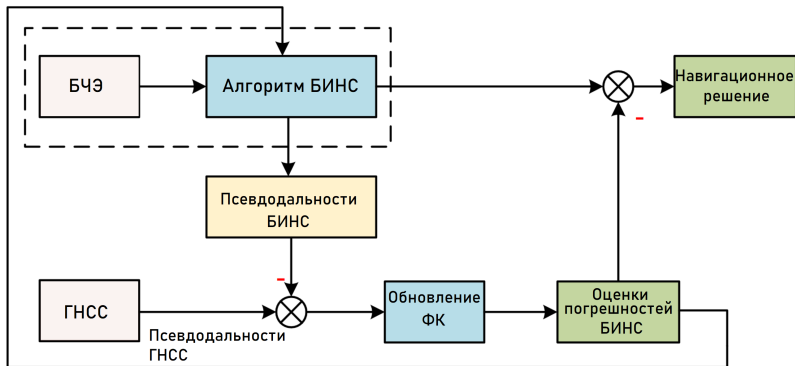


Рис. 6: Схема интеграции ИНС/ГНСС



Алгоритм БИНС

$$\begin{aligned}\mathbf{C}_b^e(+)&= \mathbf{C}_b^e(-)\mathbf{C}_{b+}^{b-} - \boldsymbol{\Omega}_e \mathbf{C}_b^e(-)\tau_{ins} \\ \mathbf{C}_{b+}^{b-}&= I_3 + \sin \alpha (\boldsymbol{\alpha} \times) / \alpha + (1 - \cos \alpha) (\boldsymbol{\alpha} \times)^2 / \alpha^2\end{aligned}\quad (5)$$

$$\boldsymbol{\alpha} = \boldsymbol{\omega} \tau_{ins}, \alpha = \| \boldsymbol{\alpha} \|$$

$$\begin{aligned}\mathbf{v}_{ins}(+)&= \mathbf{v}_{ins}(-) + (\mathbf{f}_e + \mathbf{g}(\mathbf{r}_{ins}(-) - 2\boldsymbol{\Omega}_e \mathbf{v}_{ins}(-)))\tau_{ins} \\ \mathbf{f}_{ins}&= (\mathbf{C}_b^e(-)\mathbf{C}_b^e(+))\mathbf{f}/2\end{aligned}\quad (6)$$

$$\mathbf{r}_{ins}(+) = \mathbf{r}_{ins}(-) + (\mathbf{v}_{ins}(-) + \mathbf{v}_{ins}(+))\tau_{ins}/2 \quad (7)$$

Модель измерений интегрированной системы

Вектор состояния для случая тесной интеграции:

$$x = (\delta\psi_{ins}^T, \delta r_{ins}^T, \delta v_{ins}^T, b_a^T, b_g^T)^T \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \hat{C}_b^e &= (I_3 - \delta\psi_{ins} \times) C_b^e \\ r_{ins/\hat{gps}} &= r_{ins} + \delta r_{ins} + \hat{C}_b^e l_r \\ \hat{v}_{ins/\hat{gps}} &= v_{ins} + \delta \hat{v}_{ins} + \hat{C}_b^e (\omega \times l_r) + \Omega_e \hat{C}_b^e l_r \\ \rho_r^i &= \| r_{ins/\hat{gps}} - r^i \|, \| v_{ins/\hat{gps}} - v^i \| \end{aligned} \quad (9)$$

Модель измерений интегрированной системы

$$h(\hat{x}) = (h_p(\hat{x})^T, h_{\dot{p}}(\hat{x})^T)^T \quad (10)$$

$$h_p(\hat{x}) = \begin{pmatrix} \rho_r^{12} - cdT^{12} \\ \rho_r^{13} - cdT^{13} \\ \vdots \\ \rho_r^{1m} - cdT^{1m} \end{pmatrix}, h_{\dot{p}}(\hat{x}) = \begin{pmatrix} \dot{\rho}_r^{12} - cd\dot{T}^{12} \\ \dot{\rho}_r^{13} - cd\dot{T}^{13} \\ \vdots \\ \dot{\rho}_r^{1m} - cd\dot{T}^{1m} \end{pmatrix}$$

$$H(\hat{x}) = \left. \frac{\partial h(x)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} = \begin{pmatrix} 0 & -DE & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -DE & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$



Матрица перехода

$$F_k^{k+1} = \begin{pmatrix} I_3 - \Omega_e \tau_r & 0 & 0 & 0 & \hat{C}_b^e \tau_r \\ 0 & I_3 & I_3 \tau_r & 0 & 0 \\ -(\hat{C}_b^e f \times) \tau_r & 0 & I_3 - \Omega_e \tau_r & \hat{C}_b^e \tau_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_3 \end{pmatrix} \quad (12)$$



$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{r}}_{r,k+1}(-) &= \hat{\mathbf{r}}_{r,k}(+) + (\hat{\nu}_{ins/gps,k+1} + \hat{\nu}_{ins/gps,k})\tau_r/2 \\ \hat{\nu}_{r,k+1}(-) &= \hat{\nu}_{ins/gps,k+1}\end{aligned}\quad (13)$$

$$\mathbf{P}_{k+1} = \mathbf{F}_k^{k+1} \mathbf{P}_k(+) \mathbf{F}_k^{k+1T} + \mathbf{Q}_k^{k+1}$$

$$\mathbf{F}_k^{k+1} = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_3 & & & \\ & 0 & & \\ & & \mathbf{I}_{m-1} & \\ & & & \mathbf{I}_{m-1} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{Q}_k^{k+1} = \begin{pmatrix} \mathbf{P}_{\nu-ins/gps,k+1Tr} & & & \\ & \mathbf{P}_{\nu-ins/gps,k+1} & & \\ & & 0 & \\ & & & 0 \end{pmatrix}$$



Невязки с учётом динамики объекта, оцененной при помощи БИНС:

$$\nu = y_k - h(\hat{x}_k(-)) \quad (14)$$

Ковариационная матрица априорной ошибки оценивания:

$$Q_\nu = H(\hat{x}_k(-))P_k(-)H(\hat{x}_k(-))^T + R_k \quad (15)$$

Критерий детектирования cycle-slip фазовых измерений:

$$\nu_i^2 > nq_{i,\nu} \quad (16)$$