Поваляев А. А.
ОАО «Российские космические системы»

Влияние вращения Земли на определение координат и составляющих вектора скорости потребителя в ГНСС

Москва, 25 ноября 2009 г

Базовые понятия спутниковой радионавигации

$$t_{\text{изм}} \qquad t_{\text{пр}}^{j}$$

$$T_{\text{п}}\left(t_{\text{изм}}\right) \qquad \hat{T}^{j}\left(t_{\text{ïð}}^{j}\right)$$

$$j = \overline{1, J}$$

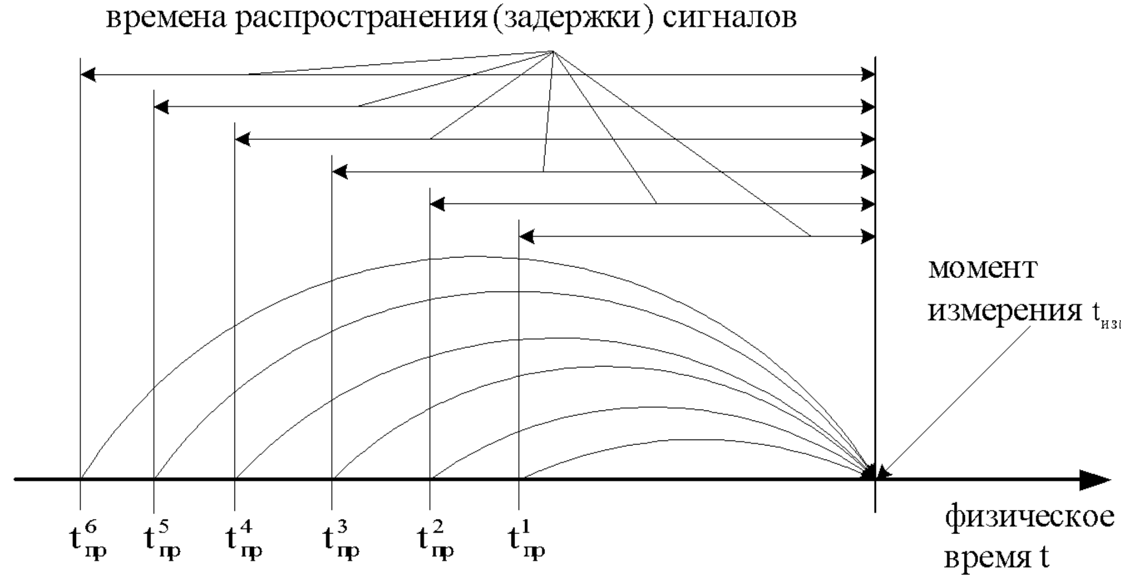

Рис. 1

$$\hat{T}_{\text{Ãí ÑÑ}}^{j}\left(t_{\text{ïð}}^{j}\right) = \hat{T}^{j}\left(t_{\text{ïð}}^{j}\right) - \Delta T^{j}\left(t_{\text{ïð}}^{j}\right)$$

$$T_{\text{Ãí ÑÑ}}\left(t_{\text{èçì}}\right) - \frac{R^{j}}{c} = \hat{T}_{\text{Ãí ÑÑ}}\left(t_{\text{ïð}}^{j}\right) \qquad T_{\text{Ãí ÑÑ}}\left(t_{\text{èçì}}\right) - \frac{R^{j}}{c} = \hat{T}^{j}\left(t_{\text{ïð}}^{j}\right) + \Delta T^{j}\left(t_{\text{ïð}}^{j}\right)$$

$$R^{j} + \Delta R_{\text{п}}\left(t_{\text{изм}}\right) = \rho^{j}\left(t_{\text{изм}}\right) + c \cdot \Delta T^{j}\left(t_{\text{пр}}^{j}\right)$$

$$\rho^{j}\left(t_{\text{èçì}}\right) = \tilde{n} \cdot \left(T_{\text{ï}}\left(t_{\text{èçì}}\right) - \hat{T}^{j}\left(t_{\text{ïð}}^{j}\right)\right)$$

Положения гринвичской системы координат в моменты измерения и предшествия

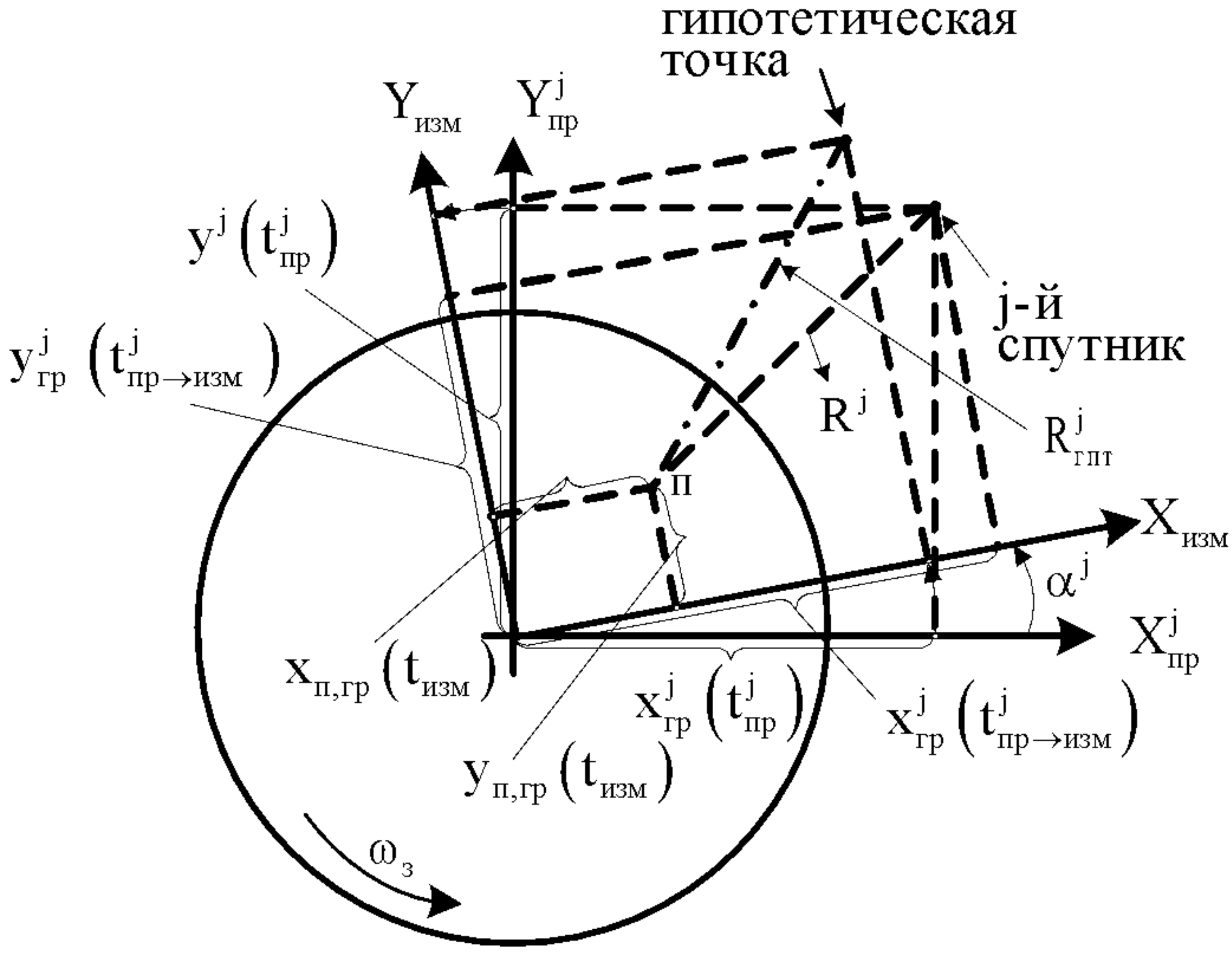

Рис. 2

Формулы пересчета координат спутников

$$x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}\rightarrow\text{èçì}}\right)=x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)\cdot\cos\alpha^{j}+y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)\cdot\sin\alpha^{j},$$

$$y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}\rightarrow\text{èçì}}\right)=y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)\cdot\cos\alpha^{j}-x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)\cdot\sin\alpha^{j},$$

$$z^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}\rightarrow\text{èçì}}\right)=z^{j}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)$$

$$x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}\rightarrow\text{èçì}}\right)=x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)+y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)\cdot\alpha^{j}$$

$$y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}\rightarrow\text{èçì}}\right)=y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)-x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)\cdot\alpha^{j}$$

$$z^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}\rightarrow\text{èçì}}\right)=z^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)$$

Системы уравнений навигационной задачи, записанные для расстояния до гипотетической точки

$$R^{j}_{\text{ãï ò}} = \sqrt{\left(x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right) - x_{\text{ï ,ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)\right)^{2} + \left(y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right) - y_{\text{ï ,ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)\right)^{2} + \left(z^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right) - z_{\text{ï ,ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)\right)^{2}}$$

$$T_{\text{ÃÍ ÑÑ}}\left(t_{\text{èçì}}\right) - \frac{1}{c}\sqrt{\left(x^{j}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right) - x_{\text{ï}}\right)^{2} + \left(y^{j}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right) - y_{\text{ï}}\right)^{2} + \left(z^{j}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right) - z_{\text{ï}}\right)^{2}} = \hat{T}_{\text{ÃÍ ÑÑ}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)$$

$$\sqrt{\left(x^{j}\left(t^{j}_{\text{пр}}\right) - x_{\text{п}}\right)^{2} + \left(y^{j}\left(t^{j}_{\text{пр}}\right) - y_{\text{п}}\right)^{2} + \left(z^{j}\left(t^{j}_{\text{пр}}\right) - z_{\text{п}}\right)^{2}} + \Delta R_{\text{п}}\left(t_{\text{изм}}\right) = \rho^{j}\left(t_{\text{изм}}\right) + c \cdot \Delta T^{j}\left(t^{j}_{\text{пр}}\right)$$

Вычисление поправки к расстоянию до гипотетической точки на каждой s-й итерации (поправки к псевдодальности)

$$R^{j,s} \approx R^{j,s}_{\text{ãï ò}} + \frac{x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right) - x^{s}_{\text{ï}}}{R^{j,s}_{\text{ãï ò}}}\, y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)\ \alpha^{j} - \frac{y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right) - y^{s}_{\text{ï}}}{R^{j,s}_{\text{ãï ò}}}\, x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)\ \alpha^{j}$$

$$R^{j,s}_{\text{ãï ò}} \approx R^{j,s} - \Delta R^{j,s}$$

$$\Delta R^{j,s} \approx \frac{x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right) - x^{s}_{\text{ï}}}{R^{j,s}_{\text{ãï ò}}}\, y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)\ \alpha^{j} - \frac{y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right) - y^{s}_{\text{ï}}}{R^{j,s}_{\text{ãï ò}}}\, x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)\ \alpha^{j} =$$

$$= \left(y^{s}_{\text{ï}}\, x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right) - x^{s}_{\text{ï}}\, y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)\right)\frac{\alpha^{j}}{R^{j,s}_{\text{ãï ò}}} = \left(y^{s}_{\text{ï}}\, x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right) - x^{s}_{\text{ï}}\, y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)\right)\frac{\omega_{\text{Ç}}\tau^{j}}{R^{j,s}_{\text{ãï ò}}} \approx$$

$$\approx \left(y^{s}_{\text{ï}}\, x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right) - x^{s}_{\text{ï}}\, y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)\right)\frac{\omega_{\text{Ç}}\tau^{j}}{c\tau^{j}} = \left(y^{s}_{\text{ï}}\, x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right) - x^{s}_{\text{ï}}\, y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)\right)\frac{\omega_{\text{Ç}}}{c}$$

Вектора скоростей спутника и приёмника в первой и второй инерциальных (замороженных) системах координат для моментов измерения и предшествия

$$\mathbf{v}_{\text{èí}}\left(t'\right)=\mathbf{v}_{\text{ãð}}\left(t'\right)+\begin{bmatrix}-\omega_{\text{Ç}}y_{\text{ãð}}\left(t'\right)\\ \omega_{\text{Ç}}x_{\text{ãð}}\left(t'\right)\\ 0\end{bmatrix}$$

$$\mathbf{v}^{j}_{\text{èí}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)=\mathbf{v}^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)+\begin{bmatrix}-\omega_{\text{Ç}}y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)\\ \omega_{\text{Ç}}x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)\\ 0\end{bmatrix}$$

$$\mathbf{v}_{\text{ï},\text{èí}}\left(t_{\text{èçì}}\right)=\mathbf{v}_{\text{ï},\text{ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)+\begin{bmatrix}-\omega_{\text{ç}}y_{\text{ï},\text{ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)\\ \omega_{\text{ç}}x_{\text{ï},\text{ãð}}\left(t_{m}\right)\\ 0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{x}_{\text{ï},\text{ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)-\omega_{\text{ç}}y_{\text{ï},\text{ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)\\ \dot{y}_{\text{ï},\text{ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)+\omega_{\text{ç}}x_{\text{ï},\text{ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)\\ \dot{z}_{\text{ï},\text{ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)\end{bmatrix}$$

Координаты и вектор скорости спутника во второй инерциальной системе координат

$$\mathbf{r}^{j}_{\text{èí}}\left(t^{j}_{\text{ïð}\to\text{èçì}}\right)=\begin{bmatrix} x^{j}_{\text{èí}}\left(t^{j}_{\text{ïð}\to\text{èçì}}\right)\\ y^{j}_{\text{èí}}\left(t^{j}_{\text{ïð}\to\text{èçì}}\right)\\ z^{j}_{\text{èí}}\left(t^{j}_{\text{ïð}\to\text{èçì}}\right)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)+\alpha^{j}y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)\\ y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)-\alpha^{j}x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)\\ z^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)\end{bmatrix}$$

$$\mathbf{v}^{j}_{\text{èí}}\left(t^{j}_{\text{ïð}\to\text{èçì}}\right)=\begin{bmatrix} \dot{x}^{j}_{\text{èí}}\left(t^{j}_{\text{ïð}\to\text{èçì}}\right)\\ \dot{y}^{j}_{\text{èí}}\left(t^{j}_{\text{ïð}\to\text{èçì}}\right)\\ \dot{z}^{j}_{\text{èí}}\left(t^{j}_{\text{ïð}\to\text{èçì}}\right)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \dot{x}^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)-\omega_{\text{ç}}y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)+\alpha^{j}\left(\dot{y}^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)+\omega_{\text{ç}}x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)\right)\\ \dot{y}^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)+\omega_{\text{ç}}x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)-\alpha^{j}\left(\dot{x}^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)-\omega_{\text{ç}}y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)\right)\\ \dot{z}^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)\end{bmatrix}$$

Радиальная скорость во второй инерциальной системе

$$\dot{R}^{j}_{\text{èí}}\left(t_{\text{èçì}}\right)=\left(\mathbf{e}^{j}_{\text{èí}}\left(t_{\text{èçì}}\right)\right)^{T}\cdot\Delta\mathbf{v}^{j}_{\text{ï}}\left(t_{\text{èçì}}\right)$$

$$\mathbf{e}^{j}_{\text{èí}}\left(t_{\text{èçì}}\right)=\begin{bmatrix}\dfrac{x^{j}_{\text{èí}}\left(t^{j}_{\text{ïð}\rightarrow\text{èçì}}\right)-x_{\text{ï,èí}}\left(t_{\text{èçì}}\right)}{R^{j}}\\ \dfrac{y^{j}_{\text{èí}}\left(t^{j}_{\text{ïð}\rightarrow\text{èçì}}\right)-y_{\text{ï,èí}}\left(t_{\text{èçì}}\right)}{R^{j}}\\ \dfrac{z^{j}_{\text{èí}}\left(t^{j}_{\text{ïð}\rightarrow\text{èçì}}\right)-z_{\text{ï,èí}}\left(t_{\text{èçì}}\right)}{R^{j}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)+\alpha^{j}y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)-x_{\text{ï,ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)}{R^{j}}\\ \dfrac{y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)-\alpha^{j}x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)-y_{\text{ï,ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)}{R^{j}}\\ \dfrac{z^{\text{ïë}}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)-z_{\text{ï,ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)}{R^{j}}\end{bmatrix}$$

$$\Delta\mathbf{v}^{j}_{\text{ï}}\left(t_{\text{èçì}}\right)=\mathbf{v}^{j}_{\text{èí}}\left(t_{\text{ïð}\rightarrow\text{èçì}}\right)-\mathbf{v}_{\text{ï,èí}}\left(t_{\text{èçì}}\right)=$$

$$=\begin{bmatrix}\dot{x}^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)-\dot{x}_{\text{ï,ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)-\omega_{\text{ç}}\left(y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)-y_{\text{ï,ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)\right)+\alpha^{j}\left(\dot{y}^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)+\omega_{\text{ç}}x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)\right)\\ \dot{y}^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)-\dot{y}_{\text{ï,ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)+\omega_{\text{ç}}\left(x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)-x_{\text{ï,ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)\right)-\alpha^{j}\left(\dot{x}^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)-\omega_{\text{ç}}y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)\right)\\ \dot{z}^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right)-\dot{z}_{\text{ï,ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)\end{bmatrix}$$

Вычисление радиальной скорости во второй инерциальной системе

$$\dot{R}^{j}_{\text{èí}}\left(t_{\text{èçì}}\right)=h^{j}_{x}\left(\dot{x}^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)-\dot{x}_{\text{ï , ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)\right)+h^{j}_{y}\left(\dot{y}^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)-\dot{y}_{\text{ï , ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)\right)+$$

$$+h^{j}_{z}\left(z^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)-\dot{z}_{\text{ï , ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)\right)+\frac{\dot{y}_{\text{ï , ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)\, x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)\,\alpha^{j}}{R^{j}}+\frac{y_{\text{ï , ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)\dot{x}^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)\,\alpha^{j}}{R^{j}}-$$

$$-\frac{\dot{x}_{\text{ï , ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)\, y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)\,\alpha^{j}}{R^{j}}+\frac{x_{\text{ï , ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)\dot{y}^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)\,\alpha^{j}}{R^{j}}$$

$$h^{j}_{x}=\frac{x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)-x_{\text{ï , ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)}{R^{j}}\qquad h^{j}_{y}=\frac{y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)-y_{\text{ï , ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)}{R^{j}}$$

$$h^{j}_{z}=\frac{z^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ï ð}}\right)-z_{\text{ï , ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right)}{R^{j}}$$

Удобные приближения

$$R^{j} \approx R^{j}_{\text{ãï ò}} \qquad \alpha^{j} = \omega_{\text{Ç}}\tau^{j} \approx \omega_{\text{Ç}} R^{j}_{\text{ãï ò}} / \text{ñ}$$

$$\dot{R}^{j}_{\text{ãï ò}}(t_{\text{èçì}}) = h^{j}_{x}\left(\dot{x}^{j}_{\text{ãð}}(t^{j}_{\text{ï ð}}) - \dot{x}_{\text{ï , ãð}}(t_{\text{èçì}})\right) + h^{j}_{y}\left(\dot{y}^{j}_{\text{ãð}}(t^{j}_{\text{ï ð}}) - \dot{y}_{\text{ï , ãð}}(t_{\text{èçì}})\right) + h^{j}_{z}\left(\dot{z}^{j}_{\text{ãð}}(t^{j}_{\text{ï ð}}) - \dot{z}_{\text{ï , ãð}}(t_{\text{èçì}})\right)$$

$$\dot{R}^{j}_{\text{èí}}(t_{\text{èçì}}) \approx \dot{R}^{j}_{\text{ãï ò}}(t_{\text{èçì}}) + \frac{\dot{y}_{\text{ï , ãð}}(t_{\text{èçì}})\, x^{j}_{\text{ãð}}(t^{j}_{\text{ï ð}})\, \alpha^{j}}{R^{j}_{\text{ãï ò}}} + \frac{y_{\text{ï , ãð}}(t_{\text{èçì}})\, \dot{x}^{j}_{\text{ãð}}(t^{j}_{\text{ï ð}})\, \alpha^{j}}{R^{j}_{\text{ãï ò}}} -$$

$$- \frac{\dot{x}_{\text{ï , ãð}}(t_{\text{èçì}})\, y^{j}_{\text{ãð}}(t^{j}_{\text{ï ð}})\, \alpha^{j}}{R^{j}_{\text{ãï ò}}} + \frac{x_{\text{ï , ãð}}(t_{\text{èçì}})\, \dot{y}^{j}_{\text{ãð}}(t^{j}_{\text{ï ð}})\, \alpha^{j}}{R^{j}_{\text{ãï ò}}}$$

$$\dot{R}^{j}_{\text{èí}}(t_{\text{èçì}}) = \dot{R}^{j}_{\text{ãï ò}}(t_{\text{èçì}}) - \frac{\omega_{\text{Ç}}}{c}\Big(\dot{x}_{\text{ï ,ãð}}(t_{\text{èçì}})\, y^{j}_{\text{ãð}}(t^{j}_{\text{ï ð}}) + x_{\text{ï ,ãð}}(t_{\text{èçì}})\, \dot{y}^{j}_{\text{ãð}}(t^{j}_{\text{ï ð}}) -$$

$$- \dot{y}_{\text{ï ,ãð}}(t_{\text{èçì}})\, x^{j}_{\text{ãð}}(t^{j}_{\text{ï ð}}) - y_{\text{ï ,ãð}}(t_{\text{èçì}})\, \dot{x}^{j}_{\text{ãð}}(t^{j}_{\text{ï ð}})\Big)$$

Оценка величины поправок

- Малоподвижный приемник

$$\omega_{\text{Ç}} x_{\text{ï},\text{ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right) \cdot y^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right) / \text{ñ}$$

$$\omega_{\text{Ç}} y_{\text{ï},\text{ãð}}\left(t_{\text{èçì}}\right) \cdot x^{j}_{\text{ãð}}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right) / \text{ñ}$$

- 0.6 см/с
- Быстродвижущийся приемник ~ 8 км/с

$$\omega_{\text{Ç}} \dot{x}_{\text{ï}}\left(t_{\text{èçì}}\right) y^{j}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right) / c$$

$$\omega_{\text{Ç}} \dot{y}_{\text{ï}}\left(t_{\text{èçì}}\right) x^{j}\left(t^{j}_{\text{ïð}}\right) / c$$

- 5.1 см/с

Выводы

- При обработке измерений псевдодальностей для определения координат потребителя учет вращения Земли является обязательным.
- Для обработки измерений псевдодальностей предложены два способа учета вращения Земли
- При обработке измерений псевдодоплеровских смещений с целью определения составляющих вектора скорости потребителя влияние вращения Земли становится заметным только в случае быстродвижущихся потребителей (~ несколько км/с)
- Получены выражения для вычисления поправок к радиальной скорости в гринвичской системе, позволяющие учитывать вращение Земли при обработке измерений псевдодоплеровских смещений.

Благодарю за внимание

Вопросы?