

Реализация географической привязки данных измерений МТВЗА-ГЯ

Садовский И.Н., Сазонов Д.С.

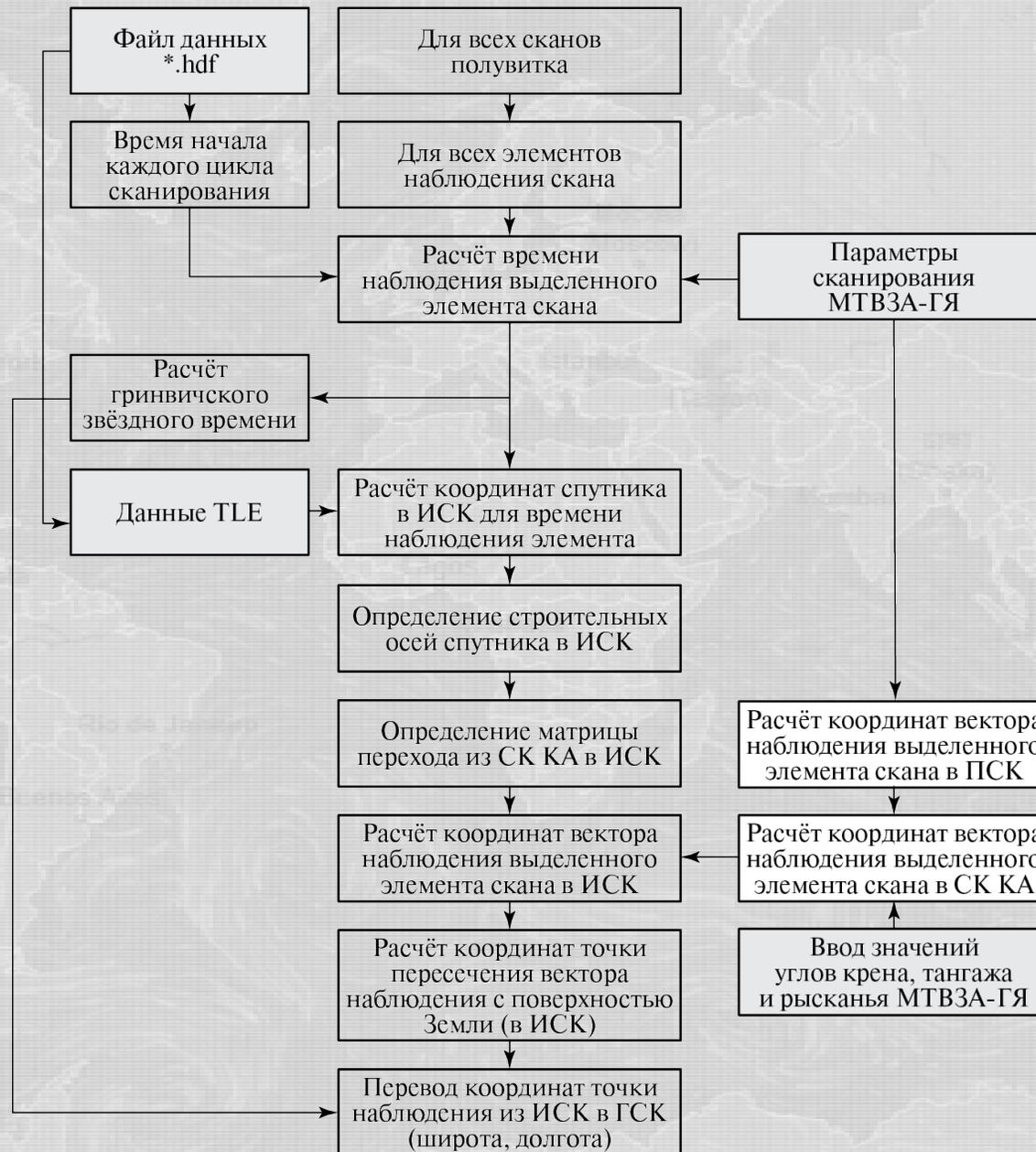
Институт космических исследований РАН, Москва

E-mail: Ilya_Nik_Sad@mail.ru



Институт Космических Исследований
Space Research Institute

Основные этапы процедуры геопривязки



Расчёт времени наблюдения элемента на поверхности

$$t_i^{\text{UTC}} = \text{БШВ} + 0.95236 + \frac{2.5}{360} \cdot \frac{145}{200 - 1} \cdot (i - 1)$$

$$1 \leq i \leq 200$$

$$t_i^{\text{UTC}} = \text{БШВ} + 0.95236 + \frac{2.5}{360} \cdot \frac{145}{200 - 1} \cdot (i + 12)$$

$$1 \leq i \leq 123$$

$$14 \leq i \leq 137$$

Определение координат спутника в ИСК

Для определения вектора координат \mathbf{R} и вектора мгновенной скорости \mathbf{V} космического аппарата (в ИСК на момент проведения измерений) используется модель **SGP4** (англ. Simplified General Perturbations). Входными параметрами расчёта выступают расчётное время в формате UTC, для которого нужно определить расположение спутника (t_i^{UTC}), и TLE-информация для этого КА (актуальная на момент расчётного времени)

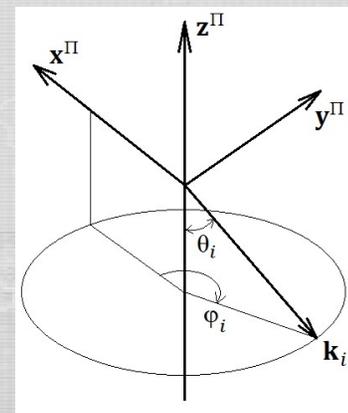
Определение координат вектора наблюдения в ПСК

Расчет координат вектора наблюдения в ПСК выполняется для каждого элемента наблюдения (для каждого i -го измерения или момента времени t_i^{UTC}). Если известны мгновенные значения углов θ_i и φ_i , вектор наблюдения определяется следующим образом:

$$\mathbf{k}_i = \begin{bmatrix} \sin \theta_i \cos \varphi_i \\ \sin \theta_i \sin \varphi_i \\ -\cos \theta_i \end{bmatrix}$$

$$\theta_i = 53.3^\circ \quad \varphi_i = \left(\frac{360}{2,5} \right) \cdot \left(0.95236 + \left(\frac{2.5}{360} * \frac{145}{200 - 1} \right) (i - 1) \right) + \varphi_{КОР}$$

$$\varphi_{КОР} = -25^\circ$$

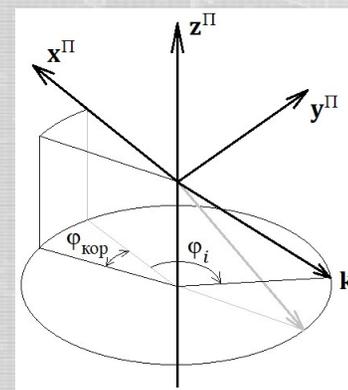


Последовательность преобразования координат

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{M}_i^{ИСК \leftarrow ОСК} \mathbf{M}_i^{ОСК \leftarrow СККА} \mathbf{M}_i^{СККА \leftarrow ПСК} \mathbf{k}_i$$

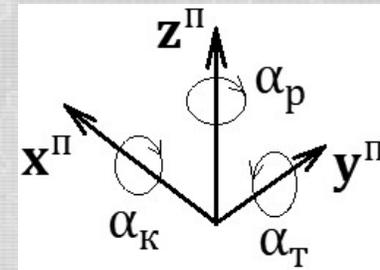
Матрица перехода из СККА в ОСК

$$\mathbf{M}_i^{ОСК \leftarrow СККА} = \mathbf{M}_i^{ОСК \leftarrow СККА} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Матрица перехода из ПСК в СК КА

Угол рыскания – α_p
 Угол крена – α_k
 Угол тангажа – α_T



$$\begin{aligned}
 M^{\text{СК КА} \leftarrow \text{ПСК}} &= R_y(\alpha_T) \cdot R_x(\alpha_k) \cdot R_z(\alpha_p) = \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \alpha_T & 0 & \sin \alpha_T \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha_T & 0 & \cos \alpha_T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_k & \sin \alpha_k \\ 0 & -\sin \alpha_k & \cos \alpha_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha_p & -\sin \alpha_p & 0 \\ \sin \alpha_p & \cos \alpha_p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \alpha_T \cdot \cos \alpha_p - \sin \alpha_p \cdot \sin \alpha_k \cdot \sin \alpha_T & -\sin \alpha_p \cdot \cos \alpha_T - \sin \alpha_p \cdot \sin \alpha_k \cdot \sin \alpha_T & \sin \alpha_T \cdot \cos \alpha_k \\ \cos \alpha_k \cdot \sin \alpha_p & \cos \alpha_k \cdot \cos \alpha_p & \sin \alpha_k \\ -\sin \alpha_T \cdot \cos \alpha_p - \cos \alpha_T \cdot \sin \alpha_k \cdot \sin \alpha_p & \sin \alpha_p \cdot \sin \alpha_T - \cos \alpha_p \cdot \sin \alpha_k \cdot \cos \alpha_T & \cos \alpha_k \cdot \cos \alpha_T \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Матрица перехода из ОСК в ИСК

$$\mathbf{z}_i^{\text{OC}} = \mathbf{R}_i / |\mathbf{R}_i|$$

$$\mathbf{y}_i^{\text{OC}} = (\mathbf{V}_i \times \mathbf{R}_i) / |\mathbf{V}_i \times \mathbf{R}_i|$$

$$\mathbf{x}_i^{\text{OC}} = \mathbf{z}_i^{\text{OC}} \times \mathbf{y}_i^{\text{OC}}$$

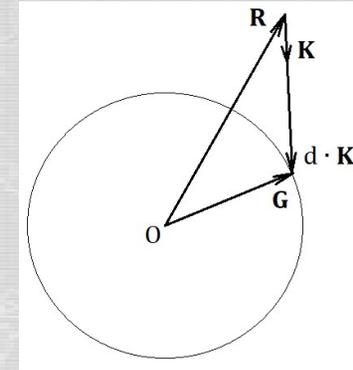
$$M_i^{\text{ИСК} \leftarrow \text{ОСК}} = \begin{vmatrix} \mathbf{x}_i^{\text{OC}} & \mathbf{y}_i^{\text{OC}} & \mathbf{z}_i^{\text{OC}} \end{vmatrix}$$

Расчет координат точки визирования на поверхности Земли

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} R_X + d \cdot K_X \\ R_Y + d \cdot K_Y \\ R_Z + d \cdot K_Z \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R} = [R_X \quad R_Y \quad R_Z] \quad \mathbf{K} = [K_X \quad K_Y \quad K_Z]$$

$$a = \frac{K_X^2 + K_Y^2}{R_{\text{Э}}^2} + \frac{K_Z^2}{R_{\text{П}}^2}$$



$$ad^2 + bd + c = 0$$

$$d = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$b = \frac{2R_X K_X + 2R_Y K_Y + 2R_Z K_Z}{R_{\text{Э}}^2} + \frac{2R_Z K_Z}{R_{\text{П}}^2}$$

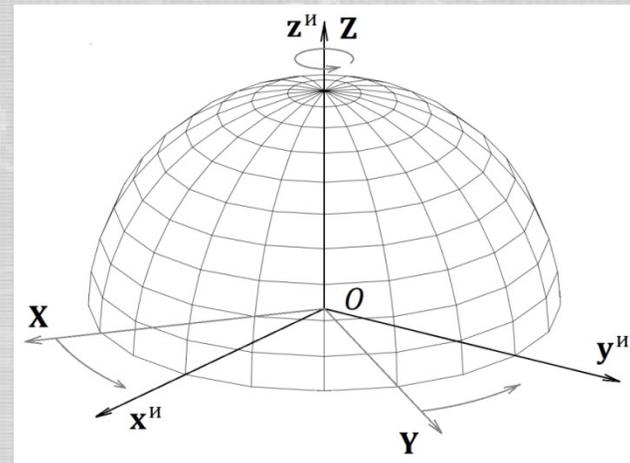
$$c = \frac{R_X^2 + R_Y^2}{R_{\text{Э}}^2} + \frac{R_Z^2}{R_{\text{П}}^2} - 1$$

$$N^{\text{ИСК}} = \arctan \left(G_Z / \left((1 - f^2) \sqrt{G_X^2 + G_Y^2} \right) \right)$$

$$E^{\text{ИСК}} = \arctan(G_Y / G_X)$$

$$N^{\text{ГСК}} = N^{\text{ИСК}}$$

$$E^{\text{ГСК}} = E^{\text{ИСК}} - \theta_{\text{GAST}}$$



Определение гринвичского звездного времени

$$\theta_{\text{GAST}} = \theta_{\text{GMST}} + \Delta\psi \cos \varepsilon$$

$$0_{\text{GAST}} = 0_{\text{GMST}}$$

$$t_i^{\text{UT1}} = t_i^{\text{UTC}} + \Delta\text{UT1}$$

$$\Delta D = t_i^{\text{UT1}} - t_{2000}$$

$$t_{2000} \leftarrow 2000 - 01 - 01 12:00:00.000$$

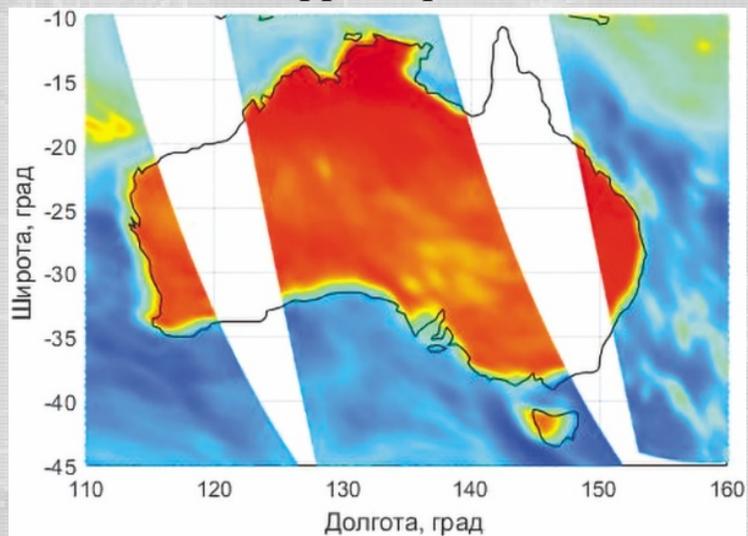
$$\Delta D_{100} = \Delta D / 36525$$

$$0_{\text{GMST}} = \omega_3 \cdot (67310.54841 + \Delta D_{100} \cdot (876600 \cdot 3600 + \\ + 8640184.812866 + \Delta D_{100} \cdot (0.093104 - \Delta D_{100} \cdot 6.2 \cdot 10^{-6})))$$

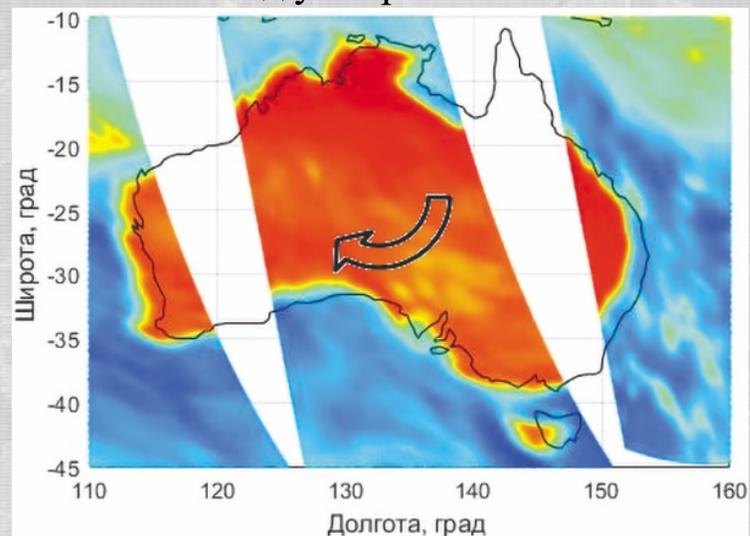
$$\omega_3 = 360 \text{ град} / 86400 \text{ сек} = 1 / 240 \text{ град/сек} = 7.2921158494 \cdot 10^{-5} \text{ град/сек}$$

Оценка корректности работы описанного подхода

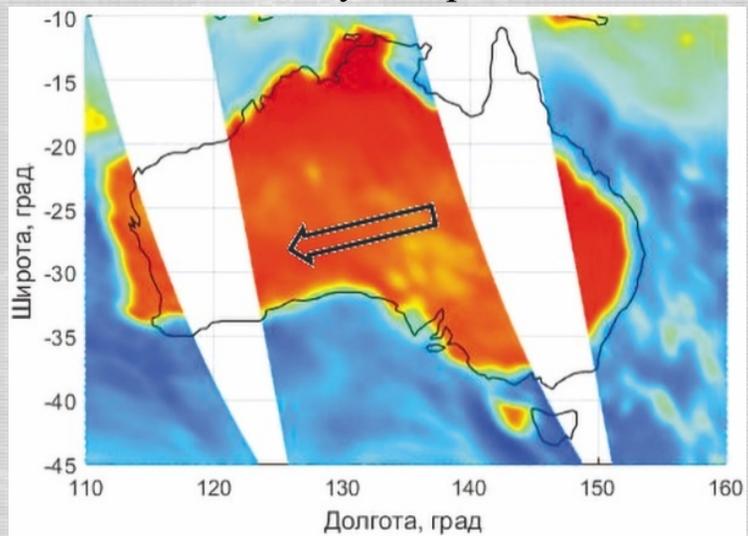
Без корректировки



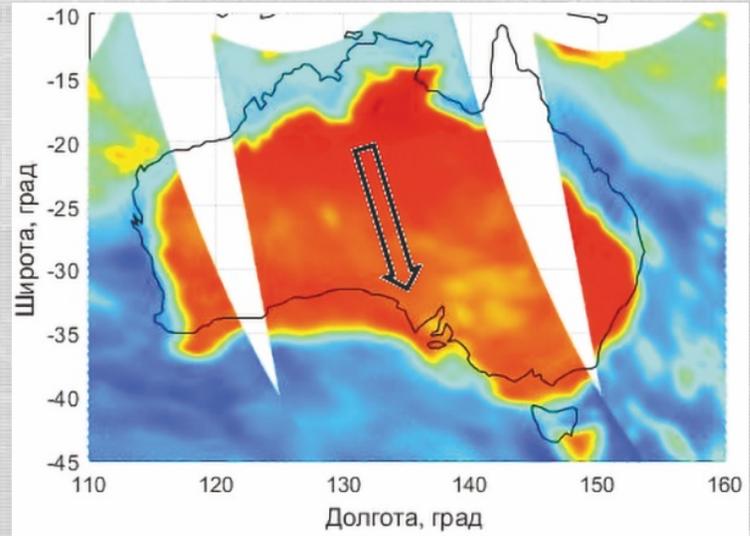
Ввод угла рыскания



Ввод угла крена



Ввод угла тангажа



Заключение:

- Реализована собственная процедура географической привязки данных МТВЗА-ГЯ.
- Алгоритм построен на использовании информации, содержащейся непосредственно в файлах с результатами измерений в формате «hdf».
- Процедура геопривязки позволяет выполнять учет большого числа корректирующих параметров, включая: нестабильность положения носителя на орбите, вариации скорости сканирования прибора, нестабильность установки временных меток, ошибки монтажа прибора на носителе и т.п.
- Описанный подход позволяет использовать его в рамках итерационных алгоритмов поиска корректирующих параметров.
- Представленный подход детально описан в работе [Садовский И.Н., Д.С. Сазонов. Географическая привязка данных дистанционных радиометрических измерений МТВЗА-ГЯ//Исследование Земли из космоса, 2022, № 6, с. 1–12 (в печати)].
- Авторы надеются, что наличие детального описания в совокупности с необходимостью наличия лишь информации, содержащейся в файлах .hdf, обеспечат возможность самостоятельной реализации и корректировки этого процесса заинтересованными пользователями. А это, в свою очередь, будет способствовать повышению востребованности данных МТВЗА-ГЯ при решении практических задач ДЗЗ.

Авторы выражают благодарность А.М.Стрельцову (АО «Российские космические системы») за своевременное и оперативное предоставление предобработанных данных измерений МТВЗА-ГЯ, использованных в работе. Авторы выражают благодарность А.А.Мазурову (ИКИ РАН) за полезное обсуждение получаемых результатов.

Работа выполнена при поддержке темы
«Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8).



Институт Космических Исследований
Space Research Institute