

# Определение антенных баз Сибирского Радиогелиографа

Лесовой С.В., Глоба М.В.

April 2022

Ошибки в положении антенн радиогелиографа приводят к меняющимся во времени фазовым ошибкам измеряемых видностей. Коэффициенты передачи антенн Радиогелиографа калибруются с использованием избыточности – большого количества одинаковых антенных баз. Степень одинаковости антенных баз определяет предел калибровки. Если потребовать, чтобы фазовые ошибки, вызванные ошибками в положении антенн, не выходили за пределы  $\pi$ , то из зависимости  $w$  компоненты от вектора ошибки получим, что любая компонента этого вектора  $\Delta\vec{b}_{kl}$  должна быть меньше  $\lambda_{min}/2$ , где  $\lambda_{min}$  – самая короткая длина волны из рабочего диапазона длин волн.

$$\Psi_{kl}(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \vec{b}_{kl} + \Delta\vec{b}_{kl} \right) \cdot \vec{s}(t) + \Phi_{kl}(t) + \Delta\phi_{kl} \quad (1)$$

где  $\vec{b}_{kl}$  – расчетная база пары антенн  $k, l$ ,  $\Delta\vec{b}_{kl}$  – ошибка в положении антенн,  $\vec{s}$  – направление на Солнце,  $\Phi_{kl}$  – фаза видности, соответствующая  $\vec{b}_{kl}$ ,  $\Delta\phi_{kl}$  – разница задержек в кабелях антенн  $k, l$ . Величина  $\vec{b}_{kl} \cdot \vec{s}(t)$  компенсируется цифровыми приемниками радиогелиографа.  $\Phi_{kl}$  зависит от распределения активности по диску Солнца, если активность мала или симметрична, то  $\Phi_{kl}$  близка к нулю.  $\Delta\phi_{kl}$  меняется во времени из-за изменений температур кабелей. С учетом этого зависимость фазы видности от времени можно записать как:

$$\Delta\Psi_{kl}(t, \Delta\vec{b}_{kl}) \approx \cos \delta \cos h \Delta x_{kl} - \cos \delta \sin h \Delta y_{kl} + \sin \delta \Delta z_{kl} + C \quad (2)$$

где  $h, \delta$  – часовой угол и склонение,  $C$  – сумма солнечной и инструментальной фаз, считающаяся постоянной. Учитывая, что склонение Солнца меняется в течение дня очень медленно, это выражение можно переписать как

$$\Delta\Psi_{kl}(h, \Delta x_{kl}, \Delta y_{kl}) \approx \cos \delta \cos h \Delta x_{kl} - \cos \delta \sin h \Delta y_{kl} + C_z \quad (3)$$

Аппроксимация 3 функцией вида  $A \cos h - B \sin h + C$  или оптимизация разности  $\Delta\Psi_{kl}(h)$  и функции коррекции геометрических задержек

$$\mathbf{argmin} \left( \Delta\Psi_{kl}(h) - 2\pi\nu\tau_g(\Delta\vec{b}_{kl}, h) \right)^2 \quad (4)$$

позволяют определить  $\Delta x_{kl}, \Delta y_{kl}$  с точностью до константы. Чтобы избавиться от влияния  $C_z$  можно составить уравнения для  $\Delta y_{kl}$  в окрестностях  $h = [-\frac{\pi}{4}, 0, \frac{\pi}{4}]$ :

$$\Delta\Psi_{kl}\left(-\frac{\pi}{4}, \Delta x_{kl}, \Delta y_{kl}\right) \approx \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \delta (\Delta x_{kl} - \Delta y_{kl}) + C_z \quad (5)$$

$$\Delta\Psi_{kl}(0, \Delta x_{kl}, \Delta y_{kl}) \approx \cos \delta \Delta x_{kl} + C_z \quad (6)$$

$$\Delta\Psi_{kl}\left(\frac{\pi}{4}, \Delta x_{kl}, \Delta y_{kl}\right) \approx \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \delta (\Delta x_{kl} + \Delta y_{kl}) + C_z \quad (7)$$

Для большей компактности выражений опустим зависимость  $\Delta\Psi$  от  $\Delta x_{kl}, \Delta y_{kl}$ . Тогда из вышеприведенных соотношений следует, что

$$\Delta\Psi_{kl}\left(-\frac{\pi}{4}\right) - \Delta\Psi_{kl}\left(\frac{\pi}{4}\right) \approx -\sqrt{2} \cos \delta \Delta y_{kl} \quad (8)$$

$$\Delta\Psi_{kl}\left(-\frac{\pi}{4}\right) + \Delta\Psi_{kl}\left(\frac{\pi}{4}\right) - \Delta\Psi_{kl}(0) \approx (\sqrt{2} - 1) \cos \delta \Delta x_{kl} \quad (9)$$

Таким образом можно получить точные решения для  $\Delta x_{kl}, \Delta y_{kl}$ , вносящих наибольший вклад в фазовую ошибку. Еще одним способом получения точных решений для  $\Delta x_{kl}, \Delta y_{kl}$  является использование производных фазовой ошибки по часовому углу:

$$\frac{\partial \Delta\Psi_{kl}}{\partial h}\left(-\frac{\pi}{4}\right) + \frac{\partial \Delta\Psi_{kl}}{\partial h}\left(\frac{\pi}{4}\right) = -\sqrt{2} \cos \delta \Delta y_{kl} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \Delta\Psi_{kl}}{\partial h}\left(-\frac{\pi}{4}\right) - \frac{\partial \Delta\Psi_{kl}}{\partial h}\left(\frac{\pi}{4}\right) = \sqrt{2} \cos \delta \Delta x_{kl} \quad (11)$$

При обработке реальных данных значения производных можно заменить линейными наклонами, полученными из регрессий для выборок данных в окрестностях заданных часовых углов. Полученные таким образом  $\Delta x_{kl}, \Delta y_{kl}$  можно использовать при аппроксимации дневной зависимости  $\Delta\Psi_{kl}(h, \Delta x_{kl})$ . Практика показывает, что применение производных фаз дает лучшую точность  $\Delta x_{kl}, \Delta y_{kl}$  относительно применения самих фаз. Видимо это связано флуктуациями фазы, вызванными взаимовлиянием каналов приемников.