Algoritmy pro řízení 2m-dalekohledu

P. Hadrava

Abstrakt

Cílem tohoto dokumentu je shromáždit všechny základní algoritmy potřebné k naprogramování a odladění softwaru pro řízení 2-dalekohledu v Ondřejově. Je zde rovněž stručně popsán program KOR2M k výpočtu koeficientů pro softwarové korekce mechanických nepřesností dalekohledu.

1 Juliánské datum

Modifikované juliánské datum v gregoriánském kalendáři je dáno vztahem

$$GJD = 367y - \left[\frac{7(y + [\frac{m+9}{12}])}{4}\right] - \left[\frac{3(\left[\frac{y+[\frac{m-9}{7}]}{100}\right] + 1)}{4}\right] + [\frac{275m}{9}] + d + 1721028.5\,, \qquad (1)$$

kde d je den (se zlomkovou částí počítanou od půlnoci), m a y jsou celočíselné pořadí měsíce (leden=1 atd.) a letopočet, [ ] označuje celou část.

2 Rovníkové souřadnice

Na polární ose se odečítá zdrojový hodinový úhel $SHA \equiv T \in (0°, 540°)$, na deklinační ose zdrojová deklinace $SDA \equiv D \in (0°, 360°)$. V základní poloze $T = 180°, D = 180°$ dalekohled míří k pólu a je otočen směrem k východnímu bodu. Astronomická deklinace

$$\delta = 90° - |D - 180°|\,, \qquad (2)$$

takže

$$\sin\delta = -\cos D\,, \quad \cos\delta = \sin D \qquad \text{ve východní poloze } (D < 180°)\,, \qquad (3)$$

$$\sin\delta = -\cos D\,, \quad \cos\delta = -\sin D \qquad \text{v západní poloze } (D > 180°)\,, \qquad (4)$$

a astronomický hodinový úhel

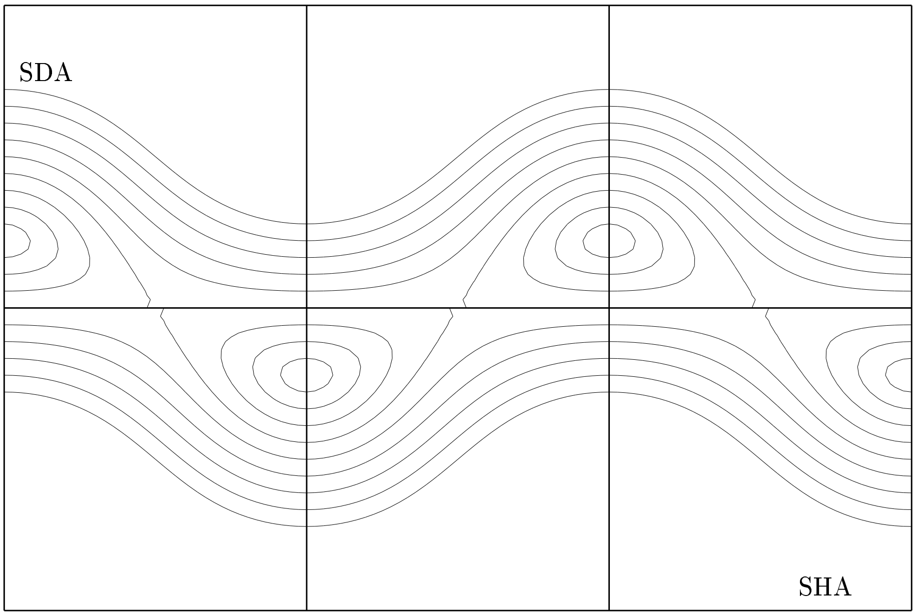
$$\tau = T - 180° \qquad \text{ve východní poloze } (D < 180°)\,, \qquad (5)$$

$$\tau = T \qquad \text{v západní poloze } (D > 180°)\,, \qquad (6)$$

takže sin i cos τ a T se liší znaménkem ve východní a zcela shodují v západní poloze.

3 Obzorníkové souřadnice

Zvolíme kartézské souřadnice x, y, z s počátkem ve středu kopule, osou x směřující k západnímu bodu, osou y k jižnímu bodu a osou z k zenitu a souřadnice x', y', z' otočené vůči nim v rovině poledníku tak,



Obrázek 1: Almukantaráty v souřadnicové síti SHA a SDA.

že osa z' směřuje k severnímu pólu a osa y' k průsečíku poledníku s rovníkem,

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin\varphi & -\cos\varphi \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} , \tag{7}$$

kde φ je zeměpisná šířka. Pro hvězdu o souřadnicích τ, δ

$$\vec{r}' \equiv \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\delta\sin\tau \\ \cos\delta\cos\tau \\ \sin\delta \end{pmatrix} , \tag{8}$$

takže

$$\vec{r} \equiv \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\delta\sin\tau \\ \cos\delta\cos\tau\sin\varphi - \sin\delta\cos\varphi \\ \cos\delta\cos\tau\cos\varphi + \sin\delta\sin\varphi \end{pmatrix} . \tag{9}$$

Výška hvězdy nad obzorem h a zenitová distance $ZA = 90^\circ - h$ jsou potom dány vztahem

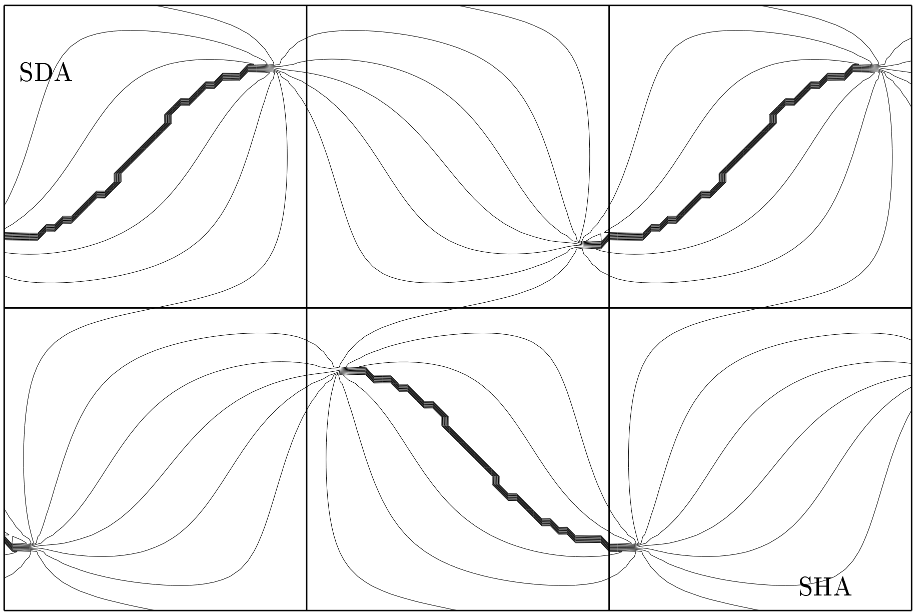
$$\begin{aligned} \sin h = \cos ZA &= z = \cos\delta\cos\tau\cos\varphi + \sin\delta\sin\varphi = \\ &= -\sin D\cos T\cos\varphi - \cos D\sin\varphi \, . \end{aligned} \tag{10}$$

Astronomický azimut hvězdy by byl dán vztahem $A = \mathrm{atan2}(y, x)$.

4 Azimut štěrbiny

Osa dalekohledu je od středu kopule posunuta o vektor

$$\vec{b}' \equiv \begin{pmatrix} x'_b \\ y'_b \\ z'_b \end{pmatrix} = |b| \begin{pmatrix} \cos T \\ -\sin T \\ 0 \end{pmatrix} , \tag{11}$$



Obrázek 2: Azimuty štěrbiny v souřadnicové síti SHA a SDA.

který je kolmý k $\vec{r}$. Osa dalekohledu tedy protíná kopuli (o poloměru R) v bodě o nečárkovaných souřadnicích

$$
\begin{aligned}
k\vec{r} + \vec{b} &= k \begin{pmatrix} \cos\delta \sin\tau \\ \cos\delta\cos\tau\sin\varphi - \sin\delta\cos\varphi \\ \cos\delta\cos\tau\cos\varphi + \sin\delta\sin\varphi \end{pmatrix} + |b| \begin{pmatrix} \cos T \\ -\sin\varphi\sin T \\ -\cos\varphi\sin T \end{pmatrix} = \\
&= \begin{pmatrix} -k\sin D\sin T + |b|\cos T \\ k(-\sin D\cos T\sin\varphi + \cos D\cos\varphi) - |b|\sin\varphi\sin T \\ k(-\sin D\cos T\cos\varphi - \cos D\sin\varphi) - |b|\cos\varphi\sin T \end{pmatrix} , \qquad (12)
\end{aligned}
$$

kde pro k platí

$$R^2 = |k\vec{r} + \vec{b}|^2 = k^2 + b^2 \ . \qquad (13)$$

Azimut štěrbiny má tedy být

$$RAS = \mathrm{atan2}(y, x) \ . \qquad (14)$$

5 Oprava o refrakci

V přiblížení rovinné atmosféry je pozorovaná zenitová vzdálenost ZA' hvězdy dána její skutečnou zenitovou vzdáleností ZA vně atmosféry a indexem lomu vzduchu $n \sim 1$ v místě pozorování

$$n \sin ZA' = \sin ZA \ . \qquad (15)$$

Odtud refrakční úhel

$$R \equiv ZA - ZA' \simeq (1-n)\frac{d\,ZA'}{dn} = (n-1)\frac{\tan ZA'}{n} \simeq (n-1)\tan ZA \ . \qquad (16)$$

Index lomu závisí na vlnové délce světla i na vlhkosti vzduchu, především je však přibližně úměrný hustotě vzduchu, takže je dán jeho teplotou $T[K] = 273.15 + AT[C]$ a tlakem P

$$n \sim 1 + k\frac{P}{T} \sim 1 + 60.2'' \frac{P/1013.25hPa}{1 + AT/273.15C} \, . \tag{17}$$

Zenitová vzdálenost je dána pomocí deklinace a hodinového úhlu cosinovou větou (10) v nautickém trojúhelníku. Průmět refrakce R do směrů τ, resp. δ je dán sinem, resp. cosinem paralaktického úhlu q protilehlého zenitové vzdálenosti pólu v nautickém trojúhelníku, pro který podle cosinové, resp. sinové věty platí

$$\cos q = \frac{\sin\varphi - \sin\delta\cos ZA}{\cos\delta\sin ZA} \, , \qquad \sin q = \cos\varphi\frac{\sin\tau}{\sin ZA} \, . \tag{18}$$

Proto tedy

$$\tau - \tau' = \frac{R\sin q}{\cos\delta} = \frac{(n-1)\sin q\sin ZA}{\cos\delta\cos ZA} = \frac{(n-1)\cos\varphi\sin\tau}{\cos\delta\cos ZA} \, , \tag{19}$$

$$\delta - \delta' = R\cos q = \frac{(n-1)\cos q\sin ZA}{\cos ZA} = (n-1)\frac{\sin\varphi - \sin\delta\cos ZA}{\cos\delta\cos ZA} \, , \tag{20}$$

takže[1]

$$T - T' = \frac{(n-1)\cos\varphi\sin T}{\sin D(\sin D\cos T\cos\varphi + \cos D\sin\varphi)} \, , \tag{21}$$

$$D - D' = (n-1)\frac{\sin\varphi\sin D - \cos D\cos\varphi\cos T}{\sin D\cos T\cos\varphi + \cos D\sin\varphi} \, . \tag{22}$$

Za $n-1$ se přitom dosazuje druhý člen výrazu (17).

6 Oprava o precesi a aberaci

Tyto opravy se v řídícím softwaru dalekohledu počítají podle přibližných vztahů v *Astronomické příručce* [2], str. 16–18 a 21–24. V programu KOR2M (viz str. 8) je pro výpočet přesných poloh měřených hvězd užito procedury AABER3 laskavě poskytnuté C. Ronem (viz Ron a Vondrák 1986).

Při přechodu z jedné inerciální soustavy do jiné s relativní rychlostí v se vlivem aberace mění úhel θ paprsku vůči apexu na hodnotu θ' splňující

$$\cos\theta' = \frac{c\cos\theta - v}{c - v\cos\theta} \, , \tag{23}$$

takže v lineárním přiblížení

$$\Delta\theta = \theta' - \theta \simeq \frac{v}{c}\sin\theta \, . \tag{24}$$

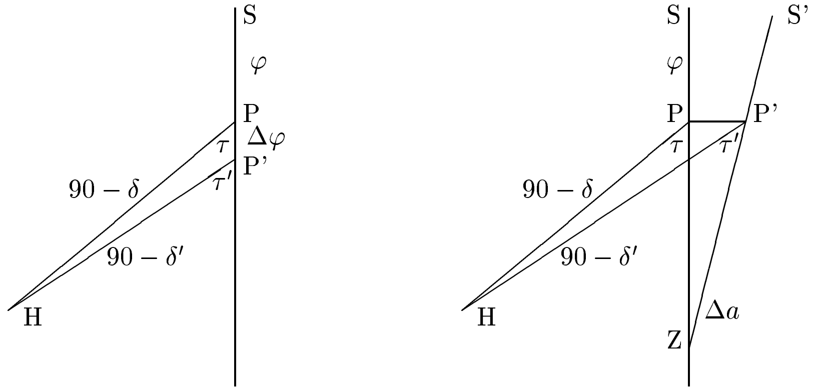
Jestliže apex má rovníkové souřadnice α_A, δ_A, pak

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \sin\delta_A\sin\delta + \cos\delta_A\cos\delta\cos(\alpha - \alpha_A) && (25) \\ \sin\theta\sin\phi &= \cos\delta\sin(\alpha - \alpha_A) \, , && (26) \end{aligned}$$

kde ϕ je neměnný polární úhel v souřadné soustavě s pólem orientovaným k apexu. Odtud diferencováním

$$\begin{aligned} -\sin\theta\Delta\theta &= (\sin\delta_A\cos\delta - \cos\delta_A\sin\delta\cos(\alpha-\alpha_A))\Delta\delta && (27) \\ &\quad - \cos\delta_A\cos\delta\sin(\alpha - \alpha_A)\Delta\alpha \\ \cos\theta\sin\phi\Delta\theta = \cot\theta\cos\delta\sin(\alpha-\alpha_A)\Delta\theta &= -\sin\delta\sin(\alpha-\alpha_A)\Delta\delta + \cos\delta\cos(\alpha-\alpha_A)\Delta\alpha \, . && (28) \end{aligned}$$

[1] Po dosazení (10) lze totiž čitatel (20) upravit do složitějšího, ale obvyklejšího tvaru $\sin\varphi - \sin\delta\cos ZA = \cos\delta(\sin\varphi\cos\delta - \sin\delta\cos\varphi\cos\tau)$.



Obrázek 3: Vliv chyb v nastavení polární osy

7 Oprava na mechanické nepřesnosti

Justážní a konstrukční nepřesnosti (např. v nastavení polární osy nebo v nekolmosti os) způsobují chyby v rektascenzi a deklinaci, jejichž velikost je třeba stanovit empiricky z pozorování hvězd, a takto stanovené konstanty je pak možno zadat do korekčních procedur řídícího systému. K měření lze použít buď programové hvězdy, jejichž zdrojové souřadnice se zaznamenají několikrát v průběhu expozice, nebo (zejména k doplnění dat z méně obvyklých poloh dalekohledu) měřením libovolných jasných hvězd. Poloha a čas se zaznamená kliknutím na ikonku "korekce" při hvězdě napointované na clonku image-sliceru (CTC přitom může být dle libosti ON nebo OFF). Ke zpracování dat, která se ukládají do souboru `file.dat` v knihovně `/tcsuser/corr`, slouží fortranský program KOR2M, který měřenou hvězdu identifikuje s nejbližší hvězdou ze svého katalogu, obsahujícího všechny hvězdy do 4. magnitudy podle BSC (je v plánu úprava na HIPPARCOS). Proto není vhodné měřit složky blízkých dvojhvězd a při použití slabších programových hvězd je třeba zkontrolovat jejich zařazení do katalogu. Rovněž je vhodné poznamenat chybná měření (např. pomocí jejich času), aby mohla být vypuštěna z datového souboru ještě před jeho zpracováním.

Chyba $\Delta\varphi$ ve sklonu polární osy. Jestliže polární osa P' dalekohledu svírá se severním bodem S úhel o $\Delta\varphi$ větší než je skutečná zeměpisná šířka φ, v níž je skutečný pól P, pak podle kosinové věty ve sférickém trojúhelníku $PP'H$ (kde H je měřená hvězda – viz obr. 3 vlevo)

$$\sin\delta' = \sin\delta\cos\Delta\varphi + \cos\delta\sin\Delta\varphi\cos\tau \simeq \sin\delta + \cos\delta\cos\tau\Delta\varphi\ , \tag{29}$$

tj.[2]

$$(\delta' - \delta) \simeq \frac{\sin\delta' - \sin\delta}{\cos\delta} \simeq \cos\tau\Delta\varphi\ . \tag{30}$$

Podle sinové věty

$$\sin\tau' = \sin\tau\frac{\cos\delta}{\cos\delta'} \simeq \sin\tau\frac{\cos\delta}{\cos\delta - (\delta' - \delta)\sin\delta} \simeq \sin\tau[1 + (\delta' - \delta)\tan\delta]\ , \tag{31}$$

takže

$$(\tau' - \tau) \simeq \frac{\sin\tau' - \sin\tau}{\cos\tau} \simeq \sin\tau\tan\delta\Delta\varphi\ . \tag{32}$$

[2]V původních vzorcích od Zeissů je tento člen s opačným znaménkem.

Chyba Δa v azimutu polární osy. Podobně při posunu polární osy v azimutu platí podle kosinové věty v trojúhelníku $PP'H$ (viz obr. 3 vpravo)

$$\sin\delta' = \sin\delta\cos PP' - \cos\delta\sin PP'\sin\tau \simeq \sin\delta - \cos\delta\sin\tau\cos\varphi\Delta a\ , \tag{33}$$

tj.

$$(\delta' - \delta) \simeq \frac{\sin\delta' - \sin\delta}{\cos\delta} \simeq -\sin\tau\cos\varphi\Delta a\ . \tag{34}$$

Podle kosinové věty v trojúhelnících HPZ a $HP'Z$ (kde Z je zenit)

$$\cos HZ = \sin\delta\sin\varphi + \cos\delta\cos\varphi\cos\tau = \sin\delta'\sin\varphi + \cos\delta'\cos\varphi\cos\tau'\ . \tag{35}$$

Odtud

$$\cos\delta\cos\varphi\sin\tau(\tau' - \tau) = (\cos\delta\sin\varphi - \sin\delta\cos\varphi\cos\tau)(\delta' - \delta)\ , \tag{36}$$

tj.

$$(\tau' - \tau) = (\tan\delta\cos\varphi\cos\tau - \sin\varphi)\Delta a\ . \tag{37}$$

Chyba Δw v kolmosti deklinační a polární osy. Při sešikmení deklinační osy o úhel Δw od směru přesně kolmého vůči polární ose dalekohled míří pro různá δ místo do deklinační kružnice do jiné hlavní kružnice protínající ji na rovníku, takže

$$\delta' - \delta = 0 \tag{38}$$

a

$$\tau' - \tau = \cot D\Delta w\ , \tag{39}$$

kde D je zdrojová deklinace.

Chyba Δo v kolmosti optické a deklinační osy. Jestliže optická osa dalekohledu je odkloněna od směru přesně kolmého k deklinační ose, pak při natočení deklinační osy okolo polární osy, které by mělo odpovídat deklinační kružnici se zdrojovým hodinovým úhlem T, dalekohled míří na vedlejší kružnici posunutou o úhel Δo tak, že

$$\delta' - \delta = 0 \tag{40}$$

a

$$\tau' - \tau = \frac{\Delta o}{\sin D} \tag{41}$$

(chyba v hodinovém úhlu tedy diverguje $\sim \cos^{-1}\delta$ na pólu a mění znaménko v proložené poloze).

Chyby g_δ a g_τ nulových bodů. V důsledku nepřesností justáže čidel kalibračních bodů mohou být zdrojové souřadnice posunuty o konstanty

$$D' - D = g_\delta \tag{42}$$

a

$$T' - T = g_\tau\ . \tag{43}$$

Průhyb Δd deklinační osy. Na rameno $\vec{b}$ deklinační osy působí váha dalekohledu silou $\vec{F}$ v záporném směru osy z, tj. v čárkovaných kartézských souřadnicích

$$\vec{F}' = -F \begin{pmatrix} 0 \\ \cos\varphi \\ \sin\varphi \end{pmatrix} . \tag{44}$$

Moment této síly způsobí ohyb deklinační osy o úhel (cf. (11))

$$\frac{\Delta\vec{b}}{b} = \frac{\Delta d}{F}\left(\vec{F}' - \vec{b}'\frac{(\vec{F}'\vec{b}')}{b^2}\right) = -\Delta d \begin{pmatrix} \cos\varphi\cos T\sin T \\ \cos\varphi\cos^2 T \\ \sin\varphi \end{pmatrix} . \tag{45}$$

Složka ve směru z' je nezávislá na poloze dalekohledu a ekvivalentní nekolmosti Δw deklinační a polární osy. Lze ji buď ze vztahu pro Δb vypustit a formálně zahrnout do Δw,[3] nebo přidat jí úměrný člen tvaru (39) do výrazu pro $\Delta\tau$ vlivem Δd. Složky $\Delta\vec{b}$ ve směrech os x' a y' odpovídají přídavnému stočení deklinační osy o úhel $\Delta\tau \sim \cos\varphi\cos\tau$ (tj. maximální odchylka v poledníku, kdy deklinační osa míří východním nebo západním směrem, a nulové pro $\tau = \pm 6^{\mathrm{h}}$, kdy je deklinační osa nad nebo pod polární osou). Toto stočení deklinační osy způsobí stočení dalekohledu o stejné $\Delta\tau$ nezávislé na δ, takže výsledný příspěvek ohybu deklinační osy je

$$\delta' - \delta = 0 \tag{46}$$

a

$$\tau' - \tau = \Delta d\,(\cos\varphi\cos T + \sin\varphi\cot D) . \tag{47}$$

Průhyb Δr tubusu dalekohledu. Analogicky vztahu (45) je deformace $\Delta\vec{r}$ osy (8) tubusu dalekohledu vlivem jeho vlastní váhy (44) dána vztahem

$$\Delta\vec{r} = \frac{\Delta r}{F}\left(\vec{F}' - \vec{r}'(\vec{F}'\vec{r}')\right) = \Delta r(- \begin{pmatrix} 0 \\ \cos\varphi \\ \sin\varphi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos\delta\sin\tau \\ \cos\delta\cos\tau \\ \sin\delta \end{pmatrix} (\cos\delta\cos\tau\cos\varphi + \sin\delta\sin\varphi)) . \tag{48}$$

Průměty tohoto posunutí do δ a τ jsou[4]

$$\delta' - \delta = (\Delta\vec{r}\vec{e}_\delta) = -\Delta r(\begin{pmatrix} 0 \\ \cos\varphi \\ \sin\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\sin\delta\sin\tau \\ -\sin\delta\cos\tau \\ \cos\delta \end{pmatrix}) = \Delta r(\sin\delta\cos\tau\cos\varphi - \cos\delta\sin\varphi) \tag{49}$$

a

$$\tau' - \tau = \frac{1}{\cos\delta}(\Delta\vec{r}\vec{e}_\tau) = -\Delta r(\begin{pmatrix} 0 \\ \cos\varphi \\ \sin\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\tau \\ -\sin\tau \\ 0 \end{pmatrix}) = \Delta r\cos\varphi\sin\tau . \tag{50}$$

Výsledná chyba v důsledku všech výše uvedených mechanických vlivů je součtem pravých stran rovnic (30), (34), (42) a (49) pro deklinaci a (32), (37), (39), (41), (43), (47) a (50) pro hodinový úhel. Pro chyby

[3] Toto zjednodušení by bylo rozumné i proto, že tuhost deklinační osy podél a napříč ložiska hodinové osy může být stejně různá.

[4] Protože jednotkové vektory $\vec{e}_{\delta,\tau} \sim \frac{\partial}{\partial\delta,\tau}\vec{r}'$ jsou kolmé na $\vec{r}'$, můžeme druhý člen v (48) vynechat.

zdrojové deklinace D (která má v západní poloze opačné znaménko než δ) a zdrojového hodinového úhlu T tedy

$$\begin{aligned}
\Delta D &= -\Delta\varphi\cos T + \Delta a \sin T\cos\varphi + g_\delta + \Delta r(\cos D\cos T\cos\varphi - \sin D\sin\varphi)\ , &(51)\\
\Delta T &= \Delta\varphi\cot D\sin T + \Delta a\ (\cot D\cos T\cos\varphi - \sin\varphi) + \Delta w\cot D + \frac{\Delta o}{\sin D} + g_\tau &(52)\\
&\quad +\Delta d\,(\cos T\cos\varphi + \cot D\sin\varphi) - \Delta r\sin T\cos\varphi\ .
\end{aligned}$$

Hodnoty koeficientů $\Delta\varphi$, Δa, Δw, Δo, g_δ, g_τ, Δd a Δr pro výpočet těchto oprav musí být nalezeny z pozorování metodou nejmenších čtverců (tj. minimalizací $(O-C)^2 \sim \sum(\Delta D)^2 + \sin^2 D(\Delta T)^2$). Tento výpočet provádí autorův program KOR2M.FOR, který načítá ze souboru KOR2M.IN hodnoty souřadnic zaznamenaných do souboru 2m-dalekohledem na pokyn z řídícího panelu a porovná je (po příslušných opravách) s katalogovými souřadnicemi nejbližší hvězdy ze souboru KOR2M.DAT. Zpřesňování koeficientů tedy nevyžaduje pozorovací čas dalekohledu, ale lze je provádět na programových hvězdách, pokud jsou jejich souřadnice zařazeny do souboru. Pro přesnost proložení korekčních členů je ovšem třeba dbát na dobré pokrytí celého rozsahu souřadnic dalekohledu a využívat pro měření přednostně chybějících poloh.

8 Předvolba souřadnic

Při zadání přejezdu na předvolené souřadnice by se mělo:
1) Vypočítat a zobrazit výška nového objektu nad obzorem. Pokud je menší než $10°$, napsat vážné varování a požadovat potvrzení příkazu (které by mohlo mít význam pouze k najetí na horizontální omezení pro montážní účely).
2) Vypočítat a zobrazit čas $t = \tau_{10} - \tau$ zbývající k pozorování před naražením na horizontální omezení v hodinovém úhlu τ_{10}, který je podle rov. (10) dán vztahem

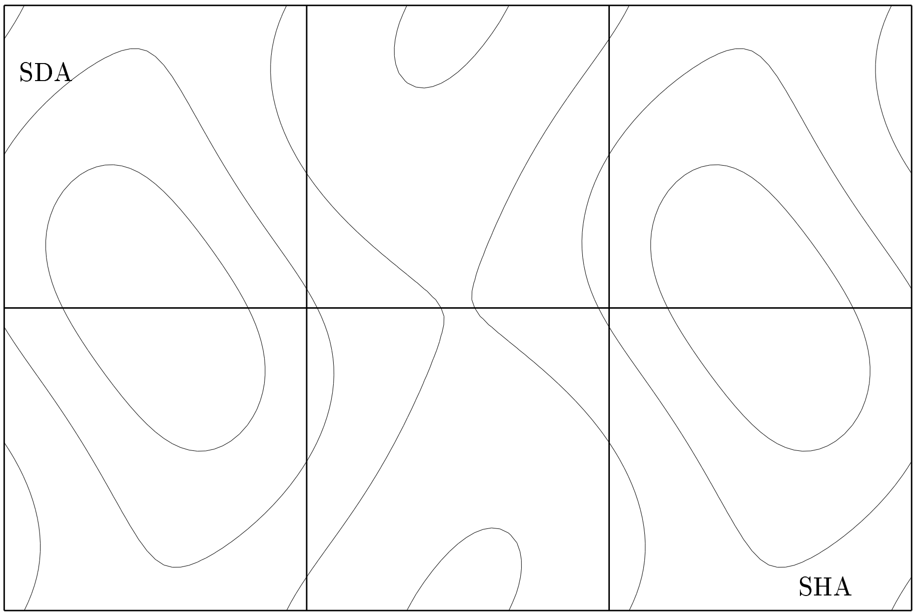
$$\cos\tau_{10} = \frac{\sin 10° - \sin\delta\sin\varphi}{\cos\delta\cos\varphi}\ . \tag{53}$$

3) Pokud je zdrojový hodinový úhel T nové polohy $T \geq 360°$, vypočítat a zobrazit čas $t = (540° - T)/15°$ zbývající do úplného zamotání kabelů a dát pozorovateli volbu, zda nechce přetočit dalekohled do $T \in (0°, 360°)$.
4) Vypočítat azimut štěrbiny pro novou polohu a pokud je ADC 'on', spustit otáčení kopule do této polohy, nikoliv do průběžně se měnícího RSA podle okamžité polohy dalekohledu.
5) Vypočítat rozdíly $|T_p - T_k|$ a $|D_p - D_k|$ počátečních a koncových zdrojových poloh a nastavit rychlosti hrubých pohybů na maximum v tomto poměru. Pokud je $\tau_p < 180°$ a $\tau_k > 180°$ nebo naopak (tj. jde o přejezd nad severním obzorem), vypočítat výšku $h_s = \varphi + \delta_s - 90°$ pohybu rovnoměrnou rychlostí nad severním bodem, tj. v bodě $\tau_s = 180°$ a $\delta_s = \delta_p + \frac{\delta_p - \delta_k}{\tau_p - \tau_k}(180° - \tau_p)$. Pokud je $h_s \geq 10°$, spustit přejezd. V opačném případě změnit rychlosti jako by $\tau_k = 180°$ a $\delta_k = \delta_{min} > 10°$ a jet pouze hrubým pohybem do tohoto bodu. Po jeho přejetí vypočítat nový přejezd z okamžité do koncové polohy.[5]

9 Propojení Cassegrainova ohniska optickými vlákny

Pro připojení spektrografu v podlaží kopule optickými vlákny ke Cassegrainovu ohnisku je třeba zvolit optimální umístění spektrografu a kontrolovat rozmezí poloh dalekohledu tak, aby vzdálenost ohniska od

[5]Tento algoritmus nezaručuje stoprocentní vyhnutí se horizontálnímu omezení při efektivně malém δ_{min}, empiricky odzkoušená hodnota např. $\delta_{min} \simeq 15°$ by však mohla v praxi vyhovovat.



Obrázek 4: Délka optického vlákna v souřadnicové síti SHA a SDA.

spektrografu nepřesáhla délku l optických vláken. Jestliže a je výška průsečíku hodinové a deklinační osy nad podlažím, resp. nad vyústěním vláken ve spektrografu, b je délka deklinační osy a c je vzdálenost příruby optických vláken (o které předpokládáme, že je v optické ose dalekohledu) od deklinační osy, pak kartézské souřadnice příruby jsou (ve východní poloze dalekohledu)

$$\vec{r} \equiv \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = a \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + b \begin{pmatrix} -\cos\tau \\ \sin\tau\sin\varphi \\ \sin\tau\cos\varphi \end{pmatrix} - c \begin{pmatrix} \cos\delta\sin\tau \\ \cos\delta\cos\tau\sin\varphi - \sin\delta\cos\varphi \\ \cos\delta\cos\tau\cos\varphi + \sin\delta\sin\varphi \end{pmatrix} . \tag{54}$$

Při pevné poloze spektrografu $\vec{r_0} = (x_0, y_0, 0)^T$ je tedy omezení poloh dalekohledu dáno nerovností

$$||\vec{r} - \vec{r_0}|| < l \ , \tag{55}$$

v případě možnosti přesouvání spektrografu pod přírubu dalekohledu postačuje podmínka

$$z < l \ . \tag{56}$$

Reference

[1] C. Ron, J. Vondrák 1986: “Expansion of annual aberration into trigonometric series”, BAC 37, 96 – 103

[2] J. Vondrák 1992: “Korekce souřadnic”, v: *Astronomická příručka*, M. Wolf (ed.), Academia, Praha 1992, str. 16 – 27