

1 Úvod

$$\frac{\partial^2 Q(y)}{\partial y^2} = 2$$

Test vztahu

$$H = 15 \cdot t_{\text{GMST}} + \lambda - \alpha + x$$

Byl pozdní večer, první máj,
první máj byl lásky čas,
hrdličin hlas zval k lásce,

```
Byl pozdní večer, první máj, \\  
první máj byl lásky čas, \\  
hrdličin hlas zval k lásce, \\  

```

Byl pozdní večer, první máj,
první máj byl lásky čas,
hrdličin hlas zval k lásce,

Byl pozdní večer, první máj,
první máj byl lásky čas,
hrdličin hlas zval k lásce,

Máme rádi Praktickou astrofyziku. ůžýščřřžý

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Aliquam risus nunc, fermentum eget blandit lobortis, hendrerit vel libero. Phasellus tristique cursus molestie. Mauris semper est non massa vulputate, in varius ligula pretium. Maecenas vitae dolor pellentesque, placerat justo non, molestie dui. Nunc pulvinar rhoncus urna. Nam sit amet ante ut ligula feugiat tempus. Nullam nec sem id ex tempor dapibus et sit amet lacus. Mauris sit amet sodales velit. Pellentesque maximus arcu quis volutpat auctor. Quisque a metus lorem. Fusce bibendum velit quam, in fringilla justo sollicitudin eget.

Proin vitae nunc blandit lectus euismod condimentum ac at justo. Sed nec consequat arcu. Nam bibendum arcu vel facilisis rhoncus. Maecenas pellentesque, libero id mattis dictum, turpis tortor malesuada diam, sed accumsan sem purus non diam. Donec vel sapien efficitur, accumsan tellus in, commodo arcu. Mauris pretium consectetur sapien eu fringilla. Sed pretium volutpat egestas. Proin sit amet dui neque. Fusce dignissim eros eget elit consectetur, ut dictum odio scelerisque. Maecenas tincidunt, mi ac eleifend scelerisque, nisi risus interdum lectus, in laoreet mauris lacus at ex. Quisque consectetur dignissim tortor a sagittis. Interdum et malesuada fames ac ante ipsum primis in faucibus. Nam facilisis nisl tellus, vitae lobortis leo lacinia sodales.

Donec ut elementum ex, at egestas erat. Vivamus ultrices nulla eget aliquam auctor. Duis accumsan mauris faucibus varius fermentum. Mauris feugiat, dolor

et aliquam lobortis, diam risus tempus mauris, et pellentesque justo risus et tortor. Duis varius augue vel tellus semper mattis. Ut mi arcu, porta at justo ut, porttitor imperdiet lacus. Aenean tincidunt non neque ut tincidunt. Nulla dignissim dolor nec sodales dapibus. Integer euismod vulputate sollicitudin. Etiam mattis, nulla eu tincidunt ullamcorper, mauris felis euismod eros, a dignissim nibh lorem tempor magna. Pellentesque accumsan imperdiet facilisis. Pellentesque ultricies, diam quis sodales sollicitudin, arcu purus vulputate diam, nec blandit urna massa nec leo.

Quisque venenatis lorem tellus, non cursus dui sagittis molestie. Duis suscipit mollis magna, sit amet condimentum nibh. Nunc nec justo non eros vulputate pellentesque eget ut lorem. Vivamus tincidunt ultricies odio, et ornare eros facilisis eget. Proin nisi odio, feugiat id dolor id, tincidunt semper elit. Nam lobortis sodales sapien a faucibus. Mauris maximus eu lorem a laoreet. Sed scelerisque sagittis sem eu ornare. Morbi vulputate, felis quis cursus sagittis, turpis nisi cursus turpis, at congue magna nibh congue ipsum. Morbi faucibus condimentum ipsum, non volutpat purus egetas non. Vestibulum luctus pretium rutrum. Ut dignissim elit est, a placerat mi dignissim sed.

2 Určení zeměpisné polohy

Za starých dobrých časů, byl jeden z klíčových úkolů, čekající na odvážné mořeplavce, určení jejich polohy na moři, neboť nepřesné souřadnice pro ně mohly znamenat život nebo smrt, bohatství či chudobu. Námořní kapitáni, kormidelníci a lodivodi tak byli vybaveni důkladnými znalostmi sférické trigonometrie a důmyslnými pomůckami na měření poloh nebeských těles. Metody, které používaly, byly generacemi matematiků, astronomů ale i hodinářů pečlivě rozvíjeny, až k dnešní skoro dokonalosti. Paradoxně tak na konci svého rozkvětu už vlastně nejsou, na první pohled, třeba, protože moderní systémy družicové navigace udávají polohu neznalému uživateli o mnoho řádů přesněji a přitom bez jakýchkoli předchozích dovedností. Zkušenosti a metody námořní navigace, v moderní době, přešly do obvodů elektronických systémů. Přesto jsou její základy stále součástí učiva na školách přímořských států. A taktéž branou k pochopení sférické astronomie.

3 Zeměpisné souřadnice

Za zeměpisné souřadnice byla zvolena dvojice úhlů s počátkem ve středu Země, kterou si modelujeme koulí. Za zeměpisnou šířku byl zvolen úhel φ s nulovou hodnotou v rovině rotace Země. Jako zeměpisná délka λ pak úhel v kolmé rovině. [obr?]

Zeměpisnou šířku měříme od rovníku směrem k pólům v intervalu 0 deg až 90 deg pro severní šířky a od -90 deg do 0 deg pro šířky jižní. Jako počátek zeměpisné délky byla vybrána poloha observatoře v Londýnské čtvrti Greenwich. Ve způsobu používání délkových souřadnic neexistuje shoda. Logicky by

měla zeměpisná délka růst kladně směrem na západ od Evropy k americkému kontinentu. Z ne úplně jasných důvodů se lze ovšem v pracích evropanů často setkat s kladným měřením na východ od nultého poledníku. Zeměpisná délka nabývá hodnot od 0 deg do 360 deg a nebo se používá konvenčně rozsah od -180 deg do $+180$ deg.

4 Vztahy mezi souřadnicemi

Základem metod astronomického určení zeměpisné polohy jsou vztahy mezi obzorníkovými a rovníkovými souřadnicemi.

Obzorníkové souřadnice jsou opět úhly. Azimut A , s počátkem od Jihu¹ je úhel kolem vertikální osy a nabývá hodnot 0 deg až 360 deg (někdy ovšem také ± 180 deg). Druhý úhel je zenitová vzdálenost z , která udává úhlovou vzdálenost od zenitu nabývající hodnot 0 deg (zenit) až 90 deg (obzor) pro objekty nad obzorem. Často se lze také setkat s úhlovou výškou nad obzorem $h = 90$ deg $- z$ jako doplňkem do $\pi/2$.

Rovníkové souřadnice udávají polohy hvězd vzhledem k souřadnému systému danému vzhledem ke kvasarům (jakožto nejvzdálenějším nejpřesněji pozorovaným bodovým objektům). Jsou navrženy jako obdoba zeměpisné délky, tedy odklonu od nultého poledníku v okamžiku Jarní rovnodennosti (od pravé pozice — right ascension) kterou je rektascenze α a deklinace (úhlová odchylka od rovníku) δ .

Za pomoci sférické věty kosinové [?] nebo rotačních matic ([?]) obdržíme z rovníkových souřadnic obzorníkové za pomoci vztahů

$$\begin{aligned} \sin z \sin A &= \cos \delta \sin H, \\ \sin z \cos A &= \sin \varphi \cos \delta \cos H - \cos \varphi \sin \delta, \\ \cos z &= \cos \varphi \cos \delta \cos H + \sin \varphi \sin \delta, \end{aligned} \tag{1}$$

ve kterých se snažíme určit: azimut A a zenitovou vzdálenost z s použitím hodinového úhlu H . Ten je definován jako rozdíl mezi greenwichským hvězdným časem (Greenwich mean sidereal time, GMST) t_{GMST} a rektascenzí hvězdy na poledníku s λ :

$$H = 15 t_{\text{GMST}} + \lambda - \alpha. \tag{2}$$

Hvězdný čas t_{GMST} je ve vzorci (2) uváděn v hodinách, kdežto všechny ostatní úhly ve stupních. Vzájemný převod mezi nimi zajišťuje konstanta 15 deg/h = 360 deg/24 h, která má význam úhlové rychlosti rotace Země vyjádřené ve stupních za časovou jednotku. Země se za hodinu otočí o 15 deg, za 1 min o 15', za 1 s o 15" atd. Podrobnější popis hvězdného času včetně jeho výpočtu nalezneme v oddíle ??.

¹Někdy se také lze setkat s azimutem měřeným od severu, jak je definovaný pro zeměpisná měření. Pro takto měřený azimut by se ovšem vztahy (1) musely upravit.

5 Odhad zeměpisné polohy

Při měření zeměpisné polohy astronomickými metodami vycházíme z pozorování význačných nebeských těles.

Jedno se základních, pro určení zeměpisné délky na severní polokouli, je Polárka, jejíž deklinace je přibližně $\delta \approx 90$ deg. Pozorujeme ji vždy nad severem v úhlové výšce ($h = 90$ deg $- z$) nad obzorem odpovídající zeměpisné šířce. Ze vztahů (1) máme pro $\cos H \approx \cos 180$ deg $= -1$, což nám zjednoduší vzorce na

$$\cos z \approx \sin \varphi \sin \delta - \cos \varphi \cos \delta.$$

Užitím součtových vzorců tak pro Polárku máme

$$z \approx \varphi.$$

Symbol \approx užíváme proto, že jde pouze o aproximativní vztah a platící jen v současné době. Polárka neleží přímo na pólu, ale v důsledku precese Země je v době, kdy provádíme tuto aproximaci, poměrně blízko k němu.

Polárku nelze užít pro jižní polokouli, neboť leží pod obzorem. Na jižní obloze je konvenčním pólem rovnoramenný trojúhelník mezi Magelanovými mračny a Jižním křížem (opravdu?).

V případě zeměpisné délky už je situace složitější neboť nemáme vždy k dispozici vhodný pevný objekt. Z historických důvodů se jako pevný bod bere tzv. Jarní bod (na souřadnicích $\alpha, \delta = 0$), avšak díky složení rotace a oběhu kolem Slunce u Země se jeho úhlová poloha během roku mění podobně jako je tomu u hvězd. Musíme proto znát nejen polohu hvězdy, ale i přesný čas. Jako nejvhodnější se jeví změřit jeho rektascenzi a za pomoci známého času odhadnout zeměpisnou délku.

Právě určení zeměpisné délky dělalo starým mořeplavcům největší problémy. Je totiž vázané na určení času s přesností několika sekund, k čemuž je třeba velmi přesných hodin. Užívalo se řady náhrad, například určení času prostřednictvím fáze Měsíce. Avšak solidní měření délky přineslo až sestavení přesných hodin — lodních chronometrů — na které dokonce vyhlásila soutěž samotná anglická královna. Podmínky byly jasné: odchylka mezi chronometrem, který absolvoval cestu lodí do Karibiku a zpátky, a přesnými hodinami ve Greenwichi nesmí být větší než pár sekund.

6 Měření zeměpisné polohy

Předpokládejme, že jsme v průběhu večera změřili zenitovou vzdálenost z_1, z_2 dvou objektů nad obzorem ve dvou přesně určených časech t_1, t_2 a přitom neznamenali azimut obou objektů. Pro jednoznačné určení polohy jsme použili dva objekty: první ve vhodné výšce nad západním α_1, δ_1 a druhý pak nad východním obzorem α_2, δ_2 . Dostali jsme tak dvojici údajů:

$$\begin{aligned} t_1, z_1, \alpha_1, \delta_1, \\ t_2, z_2, \alpha_2, \delta_2. \end{aligned} \tag{3}$$

Pro zjištění zeměpisných souřadnic přepíšeme vztah pro zenitovou vzdálenost ze vztahů (1) do tvaru

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos(H + \lambda), \quad (4)$$

v němž jsme označili hodinový úhel hvězdy na Greenwichském poledníku jako $H = 15 t_{\text{GMST}} - \alpha$. Ten nás pak vede k soustavě dvou rovnic se dvěma neznámými:

$$\begin{aligned} z_1 &= \arccos[\sin \varphi \sin \delta_1 + \cos \varphi \cos \delta_1 \cos(H_1 + \lambda)], \\ z_2 &= \arccos[\sin \varphi \sin \delta_2 + \cos \varphi \cos \delta_2 \cos(H_2 + \lambda)]. \end{aligned} \quad (5)$$

Její řešení získáme hodnoty zeměpisné délky a šířky. Rovnice jsou na první pohled poměrně složité, jde totiž o soustavu dvou nelineárních rovnic pro dvě neznámé a při bližším ohledání se snadno přesvědčíme, že neznámé λ a φ z nich nelze vyjádřit a tedy řešení nemůžeme napsat ve tvaru

$$\lambda = \dots, \quad \varphi = \dots$$

prestože určitě existuje (na daných souřadnicích jsme měřili). Rovnice lze řešit pouze numericky, kdy sice nemůžeme napsat obecný tvar, ale numerickou hodnotu zjistit můžeme. K řešení soustavy (5) lze použít několik metod:

Metoda Monte Carlo Správné řešení se snažíme uhádnout. Zkoušíme různé hodnoty souřadnic λ, φ tak, aby rozdíl mezi spočteným a změřeným z byl co nejmenší. Tato metoda je velmi jednoduchá, avšak poměrně pracná a časově náročná.

Metoda sítí V podstatě jde o vylepšenou předchozí metodu. Řešení tentokrát nehledáme náhodně, ale systematicky prohledáváme čtverec řešení pokrytý sítí. Po jeho nalezení čtverec zmenšíme a opět prohledáváme dokud nedosáhneme požadované přesnosti. Tato je sice principiálně snadná, ale vyžaduje znalost programování, neboť lokalizace s přesností na tisíce stupně vyžaduje řádově 10^6 vyhodnocení soustavy (5).

Newtonova metoda Jde o matematicky sofistikovanou metodu, jež vede nejrychleji k cíli. Je popsána v části 7.

7 Newtonova metoda

Newtonova metoda, neboli metoda tečen, je metoda na řešení rovnice typu

$$f(x) = 0. \quad (6)$$

Tato rovnice může mít mnoho podob. Typickým astronomickým případem je Keplerova rovnice

$$E - \varepsilon \sin E = M, \quad (7)$$

v níž se snažíme určit neznámou hodnotu excentrické anomálie² E ze známé střední anomálie M a excentricity elipsy ϵ . Na první pohled je vidět, že se nám nemůže podařit napsat řešení ve tvaru

$$E = \dots$$

V úvahu tedy připadá pouze numerické řešení nebo řešení ve tvaru nekonečné řady. Proto se tomuto typu rovnic říká transcendentní rovnice.

Přesto je jasné, že řešení existuje a můžeme ho určit právě Newtonovou metodou. Předpokládejme, že kolem přibližného odhadu řešení $x^{(0)}$ rovnice (6) rozvineme funkci do Taylorova rozvoje

$$f(x) = f(x^{(0)}) + f'(x^{(0)})(x - x^{(0)}) + \dots \quad (8)$$

Omezíme-li se pouze na první dva členy, vidíme, že jde o rovnici přímky. Tato přímka má sklon daný derivací a proto jde o rovnici tečny. Odtud pochází i květnatý název této metody.

Zanedbáme-li členy vyšších řádů, a zajímá-li nás opravdu řešení rovnice $f(x) = 0$, pak můžeme vyjádřit x ve kterém má hledaná rovnice nulovou hodnotu:

$$x = x^{(0)} - \frac{f(x^{(0)})}{f'(x^{(0)})}. \quad (9)$$

Obvykle dostaneme lepší odhad, než byl ten původní. Pokud by jsme chtěli dostat kořen přece jen přesněji, musíme daný postup opakovat

$$x^{(i+1)} = x^{(i)} - \frac{f(x^{(i)})}{f'(x^{(i)})}, \quad \text{pro } i = 0, \dots \quad (10)$$

a to tak dlouho, dokud nedosáhneme potřebné přesnosti měřené prostřednictvím $|x^{(i+1)} - x^{(i)}|$.

Použití metody je vázané na to, aby derivace $f'(x)$ byla nenulová, počáteční odhad byl dostatečně přesný a druhá derivace byla konečná.

Keplerova rovnice pro Zemi Pro ukázkový příklad si zvolíme naprosto náhodně pravou stranu v (7), například $\pi/4$, a řešíme tak rovnici

$$E - 0.017 \sin E = \pi/4. \quad (11)$$

Převedením do obecného tvaru

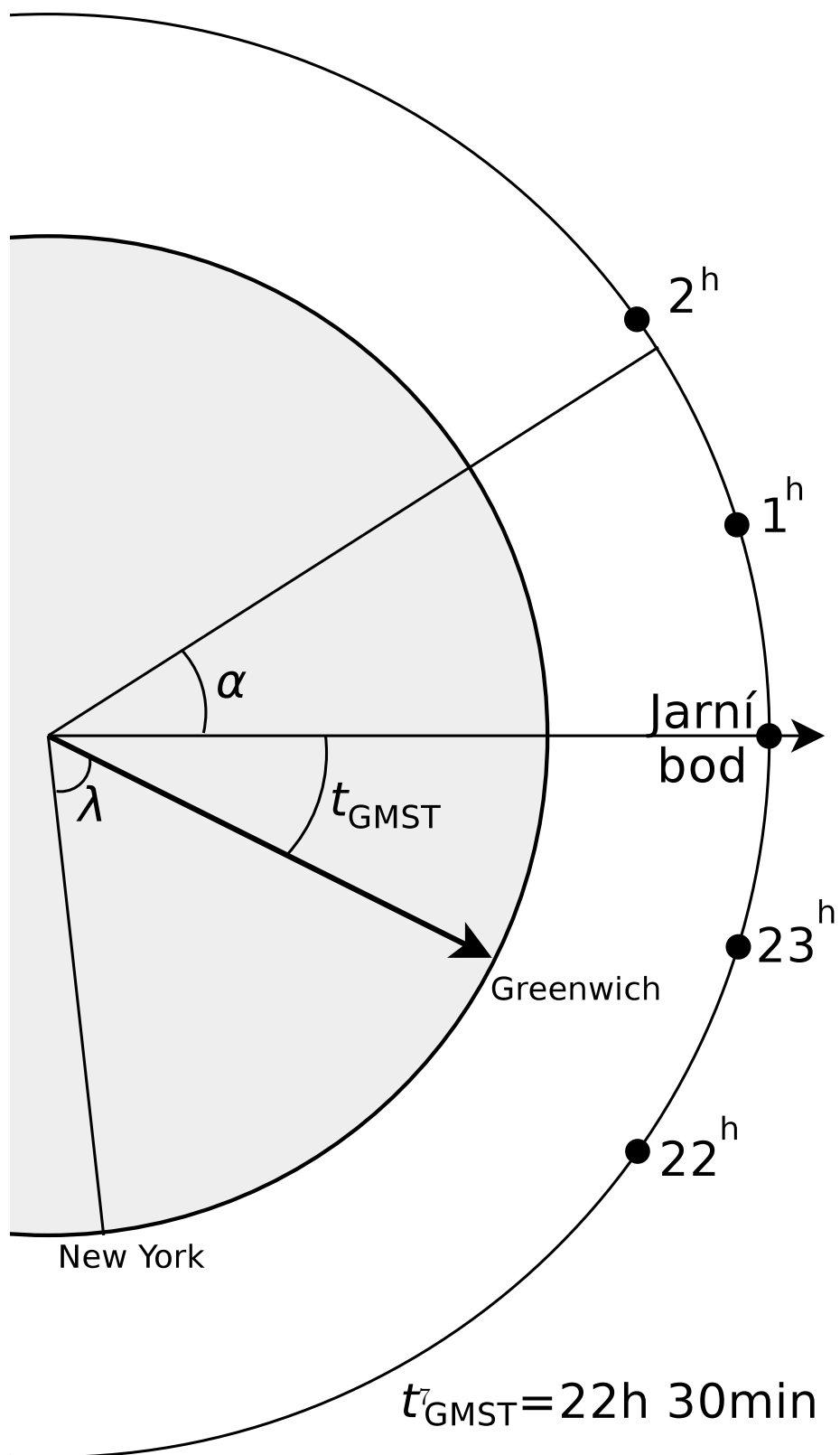
$$f(x) = (x - 0.017 \sin x) - \pi/4 \quad (12)$$

a derivováním dostaneme

$$f'(x) = 1 - 0.017 \cos x. \quad (13)$$

Jelikož je excentricita velmi malá, dráha je prakticky kruhová a jako počáteční odhad můžeme zvolit pravou stranu $x^{(0)} = \pi/4$ (volba počátečních hodnot obvykle vychází ze znalosti problému). Výsledky Newtonových iterací jsou uvedeny v tabulce 1. Vidíme, jak se postupně blížíme k řešení a již po třech iteracích známe řešení s přesností na pět míst.

²Anomálie je astronomicko-astrologické označení pro úhel.



Obrázek 1: Hvězdny čas

i	$x^{(i)}$	$f(x^{(i)})$	$f'(x^{(i)})$	$ x^{(i+1)} - x^{(i)} $
0	0.78540	-0.01131	0.98869	0.01144
1	0.79684	0.00026	0.98856	0.00026
2	0.79658	-0.00001	0.98856	0.00001
3	0.79658	0.00000	0.98856	0.00000

Tabulka 1: Postupné iterace Newtonovy metody pro (12)

8 Tečná rovina a zeměpisné souřadnice

Vraťme se opět k výpočtu zeměpisných souřadnic podle vztahů (5). Vidíme, že v tomto případě, hledáme kořen pro dvě proměnné a budeme tedy muset naše úvahy poněkud rozšířit i když naštěstí princip zůstává v platnosti.

V případě Newtonovy metody pro dvě neznámé se obecně zajímáme o řešení soustavy dvou nelineárních rovnic typu

$$\begin{aligned} f_1(x, y) &= 0, \\ f_2(x, y) &= 0, \end{aligned} \tag{14}$$

na kterou snadno převedeme soustavu (5).

Ve dvou dimenzích ovšem místo tečny ke grafu funkce sestrojíme dvě tečné roviny. Tyto roviny mají sklon vůči souřadnicovým osám daným derivací funkce vůči příslušné souřadnicové proměnné. Pokud tyto derivace existují, pak příslušná tečná rovina protíná nulovou rovinu $z = 0$ v přímce.

Máme-li dvě tečné roviny, které vytínají dvě přímky, můžeme z jejich průsečíku určit souřadnice bodu udávající lepší odhad kořene příslušné nelineární rovnice. Postup můžeme opakovat tak dlouho, dokud neznáme polohu kořene s dostatečnou přesností.

Podobně jako v jednorozměrném případě, lze i nyní odvodit Newtonovu metodu mechanickým způsobem z Taylorova rozvoje. Rovnice tečné roviny k ploše zadané funkcí $f(x, y)$ v bodě (a, b) je zobecněním tečny ke křivce a píšeme ji ve tvaru

$$z = f(a, b) + \frac{\partial f}{\partial x}(x - a) + \frac{\partial f}{\partial y}(y - b). \tag{15}$$

přičemž derivace počítáme v bodě (a, b) . Avšak k nalezení souřadnic bodu představujícího přibližné řešení (14) musíme mít k dispozici dvě funkce ke kterým sestrojíme tečné roviny a dostaneme tak dvě přímky v jejichž průsečíku se nachází toužebně očekávané řešení. Tečné roviny k dvěma plochám jsou dány rovnicemi

$$\begin{aligned} z &= f_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x}(x - a) + \frac{\partial f_1}{\partial y}(y - b), \\ z &= f_2 + \frac{\partial f_2}{\partial x}(x - a) + \frac{\partial f_2}{\partial y}(y - b), \end{aligned} \tag{16}$$

jež řešíme za podmínky $z = 0$ (derivace a funkce opět bereme v bodě (a, b)). Dostáváme tak soustavu dvou lineárních rovnic o dvou neznámých představující vlastně hledání průsečíku dvou přímek v rovině. Substituce $x_i \equiv a$, $y_i \equiv b$, $f(x_i) \equiv$

$f(a), f(y_i) \equiv f(b), \dots$ a polohu kořene pro konkrétní řešení x_{i+1}, y_{i+1} a elementární úpravy nás vedou k výrazům

$$\begin{aligned}\frac{\partial f_1}{\partial x}(x_i - x_{i+1}) + \frac{\partial f_1}{\partial y}(y_i - y_{i+1}) &= -f_1, \\ \frac{\partial f_2}{\partial x}(x_i - x_{i+1}) + \frac{\partial f_2}{\partial y}(y_i - y_{i+1}) &= -f_2.\end{aligned}\tag{17}$$

Abychom se v této změti písmen lépe orientovali, lineární soustavu přeznačíme $\vec{x}_i = (x_i, y_i), \vec{\Delta}_i = (x_i - x_{i+1}, y_i - y_{i+1}), \vec{f}_i = (f_1, f_2)$ a dále

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} \end{pmatrix},\tag{18}$$

(derivace počítáme v (x_i, y_i)) dostáváme soustavu rovnic v maticové notaci

$$\vec{A}_i \cdot \vec{\Delta}_i = -\vec{f}_i,\tag{19}$$

a řešení naší původní soustavy tak získáme jako

$$\vec{x}_{i+1} = \vec{x}_i + \vec{\Delta}_i.\tag{20}$$

Newtonova metoda pro zeměpisné souřadnice V případě soustavy rovnic (5) je řešení přímočaré. Vektorová funkce \vec{f}_i má tvar

$$\vec{f}_i = \begin{pmatrix} \arccos q_1 - z_1 \\ \arccos q_2 - z_2 \end{pmatrix},\tag{21}$$

ve níž jsme použili substituce

$$\begin{aligned}q_1 &= \sin \delta_1 \sin \varphi + \cos \delta_1 \cos \varphi \cos(H_1 + \lambda), \\ q_2 &= \sin \delta_2 \sin \varphi + \cos \delta_2 \cos \varphi \cos(H_1 + \lambda),\end{aligned}\tag{22}$$

a hledáme řešení pro

$$\vec{\Delta}_i = \begin{pmatrix} \lambda_{i+1} - \lambda_i \\ \varphi_{i+1} - \varphi_i \end{pmatrix}.\tag{23}$$

Prvky matice \vec{A}_i jsou

$$\begin{aligned}\frac{\partial f_1}{\partial \lambda} &= -u \cos \delta_1 \cos \varphi \sin(H_1 + \lambda), \\ \frac{\partial f_2}{\partial \lambda} &= -v \cos \delta_2 \cos \varphi \sin(H_2 + \lambda), \\ \frac{\partial f_1}{\partial \varphi} &= u[\sin \delta_1 \cos \varphi - \cos \delta_1 \sin \varphi \cos(H_1 + \lambda)], \\ \frac{\partial f_2}{\partial \varphi} &= v[\sin \delta_2 \cos \varphi - \cos \delta_2 \sin \varphi \cos(H_2 + \lambda)],\end{aligned}\tag{24}$$

v nichž jsme použili pomocné proměnné

$$\begin{aligned} u &= -\frac{1}{\sqrt{1-q_1^2}} \\ v &= -\frac{1}{\sqrt{1-q_2^2}} \end{aligned} \tag{25}$$

9 Numerický výpočet zeměpisné polohy

Vztahy (21) až (24) nepochybně budí respekt. V principu lze jejich iterace spočítat za pomoci kalkulačky, tabulek či logaritmického pravítka ovšem je třeba se obrnit velkou trpělivostí a mít spoustu volného času. Proto je zde uveden výpis skriptu pro Python³ jež může pomoci v řešení této úlohy a může být vodítkem pro vlastní způsob na zpracování.

10 Rozmarná úloha?

Určovat zeměpisnou polohu pomocí úhlooměru nebo sextantu se může zdát v dnešní době poněkud rozmarné. Nejen proto, že existuje několik družicových systémů udávající přesný čas i polohu s až zbytečně velkou přesností (odchylky od správné polohy jsou menší než velikosti lidských těl!).

Nicméně princip této metody má široké uplatnění v astronomii, kdy z různých důvodů můžeme měřit jen jednu souřadnici. V nedávné době tak byla tato metoda hojně rozšířená při určování poloh gama záblesků.

Přesná detekce slabých gama zdrojů, které se navíc objevují náhodně, je poměrně těžký úkol. Pokud se používají nesměrové detektory (představované kusem materiálu ve kterém dopadající gama fotony indukují jiné, lépe zachytitelné fotony) nemáme jinou možnost, než měřit časové zpoždění mezi jednotlivými detektory rozmístěných například na opačných koncích družice nebo na několika družicích rozestých po sluneční soustavě. Tato zpoždění odpovídají právě námi měřeným kružnicím o jistých poloměrech, a proto nepřekvapuje, že zdroje se tak nachází v průsečících několika kružnic přesně stejným způsobem jako při našem měření. Nicméně i tato metoda se již pomalu začíná řadit k překonaným díky družici Swift.

³Python je moderní programovací jazyk volně dostupný na <http://www.python.org>, kde je k nalezení podrobný manuál, instalační soubory a odkazy na další zdroje.