

1 Úvod

XXX

2 Použitý software

2.1 Stellarium

Open-source program simulující planetárium. Pomocí grafické knihovny OpenGL vykresluje na hvězdné obloze hvězdy, planety, souhvězdí, obrazy mlhovin a galaxií v realistické atmosféře. Zobrazení lze přepínat mezi různými typy pohledu jako je například rybí oko pro projekci v samotných planetáriích. Stellarium je vyvíjeno od roku 2001 Fabienem Chéreau a dodnes do něj přibývají nové funkce.

Při vývoji aplikace jsem využíval schopnosti Stellaria zobrazovat údaje nebeského objektu jako je rektascenze, deklinace, azimut nebo výška k ověřování výpočtů z užití literatury.

2.2 Základní astronomické výpočty

Pro ověřování juliánského a hvězdného času jsem využil jednoduchou javascriptovou aplikaci na URL adrese <http://www.jgiesen.de/astro/astroJS/siderealClock>. Pro další ověření juliánského a hvězdného času, azimutu a výšky (tedy předchozí dvě aplikace) byl použit taktéž javascriptový program a to na URL adrese http://koti.mbnet.fi/jukaukor/star_altitude.html.

2.3 Minima proměnných hvězd

Formát výpisu časů minim proměnných hvězd byl převzat podle javascriptového výpisu, ke kterému se dá dostat z URL adresy <http://www.as.up.krakow.pl/ephem/> po výběru souhvězdí žádané hvězdy a hvězdy samotné.

3 Popis aplikace

V této části je popsáno s čím se lze v aplikaci setkat při jejím používání.

3.1 Místo a čas

Pro pozorovací výpočty je potřeba nejdříve nastavit některé údaje týkající se místa a času.

- **Zeměpisná šířka:** Vodorovné linky kolem obvodu Země vyjadřující úhel mezi bodem na povrchu a rovníkem, procházejícím středem planety. V aplikaci je potřebný k výpočtu hodinového úhlu, azimutu a výšky (příslušné rovnice budou uvedeny dále). Kladnou částí značím sever, takže spodní hranice -90° přísluší jižnímu pólu a horní hranice $+90^\circ$ pólu severnímu. Česká a Slovenská republika se pohybují kolem 50° severní šířky, od $47^\circ 43' 54''$ v okolí obce Patince po $51^\circ 03' 20''$ v Lobendavě.
- **Zeměpisná délka:** Svislé linky kolem obvodu Země vyjadřující úhel mezi bodem na povrchu a rovinou Greenwichského (nultého) poledníku. V aplikaci je potřebný pro výpočet hvězdného času. Kladnou částí značím západ, což není v našich končinách zvykem. Je to způsobeno tím, že javascriptové aplikace, na kterých jsem porovnával výpočty časů, jsou od amerických autorů. U nás se zeměpisná délka pohybuje v rozmezí $12^\circ 05' 26''$ východní délky v Krásné a $22^\circ 34'$ východní délky v Nové Sedlici, což podle aplikace dává časový rozdíl asi 42 minut.
- **Časové pásmo:** U nás se čas od Greenwichského liší o 1 hodinu na celém území Česka a Slovenska. V aplikaci je tedy čas GMT nastaven na +1. Interně se počítá s časem UTC, tedy bez časového pásma, ten je přičten až k výsledku. Jen bych si snad dovolil zmínit, že právě časové pásmo bylo v průběhu programování nejčastějším zdrojem chyb a několikrát jsem chybu ve špatném výsledku hledal hodiny, než jsem ji našel právě v tomto.
- **Letní čas:** Pokud je zapnut letní čas, s GMT se nakládá jako by se rovnal +2. V případě, že není nalezena uložená hodnota, letní čas se automaticky zapne, pokud je nastaven počáteční čas na duben až říjen.
- **Datum:** Nastavuje požadované rozmezí nebo v některých případech jen jeden konkrétní den pro výpočty. Grafické rozhraní je zajišťováno javascriptovou knihovnou JSCalendar.

3.2 Východ / západ Slunce

Díky rozptylu světla v zemské atmosféře nemůžeme hvězdy pozorovat za dne (výjimku tvoří například některé výbuchy supernov, ale i ty po čase na denní obloze pohasnou). Nepomůže ani

hluboká studna, jak se často mezi lidmi traduje. Proto nezbyvá než počkat na noc, jejíž délka se v našich zeměpisných šířkách den ode dne liší.

V astronomii se používá několik druhů soumraků (stejně tak i úsvitů). Oficiální západ nastává v okamžiku, kdy se kotouč Slunce dotkne horizontu, pokud se nepočítá atmosférická refrakce. Nastává období občanského soumraku, které končí až když je kotouč 6° pod obzorem; lze ještě rozeznávat objekty a je možno provádět běžnou denní činnost bez nutnosti umělého osvětlení. Nautický soumrak končí, když je kotouč 12° pod obzorem; mořský horizont již není viditelný, na lodích je třeba rozsvítit poziční světla, rozeznávají se jen hlavní obrysy předmětů a jsou vidět jasnější hvězdy. Na rozhraní občanského a nautického soumraku jsou již vidět hvězdy do první magnitudy. V dřívějších dobách se právě při nautickém soumraku prováděla navigační měření na lodích, ideálně v době, kdy bylo Slunce 10° pod obzorem. Mořská hladina je tehdy na horizontu ještě rozeznatelná od oblohy a již se objevují první hvězdy. Po skončení astronomického soumraku, kdy je kotouč více než 18° pod obzorem, rozptýlené sluneční světlo již vůbec neruší pozorování.

Tato strana vypisuje východy a západy Slunce i s kulminací podle výše definovaných typů podle definovaného rozmezí dat den po dni. V polárních oblastech může dojít k situaci, že Slunce ten den vůbec nevyjde nebo nezapadne. Tyto situace jsou označeny jako NR (never rises) a NS (never sets). Další strany zobrazují barvy v závislosti na platnosti dvou hraničních bodů – oficiálního západu (východu) a astronomického soumraku (úsvitu).

3.3 Nejjasnější hvězdy s časy

Pro rychlý přehled jasných hvězd jsem zpracoval tabulku 50 nejjasnějších hvězd ze zdroje na adrese <http://www.cosmobrain.com/cosmobrain/res/brightstar.html>. Vedle vlastního názvu hvězdy je zobrazena její Bayer / Flamsteedova identifikace, zdánlivá magnituda, rektascenze, deklinace a východ / střed / západ objektu. Přehled je pouze pro jeden den kvůli zjednodušení.

Pozadí řádku v tabulce je obarveno podle možnosti pozorování. Pokud nám naše zeměpisná šířka vůbec neumožňuje pozorování, protože hvězda vůbec nevychází, barva je červená. Dále už záleží na zeměpisné délce. Červená, pokud hvězda vychází a zapadá ve dne. Oranžová, pokud lze hvězdu pozorovat alespoň během občanského soumraku. A konečně zelená, pokud můžeme hvězdu pozorovat za noci téměř nerušené rozptylem slunečního světla. Pro rychlý přehled východu a západu Slunce jsou jejich časy pro daný den vypsány nad tabulkou.

Slunce dokáže občas výrazně znepříjemnit pozorování i za astronomické noci a to prostřednictvím Měsíce. Proto aplikace vypočítává i aktuální fázi Měsíce, kterou zobrazuje nad tabulkou jako png obrázek.

3.4 *Bright Star Catalogue*

Všechny hvězdy vizuální magnitudy 6.5 a jasnější jsou zaevidovány v Bright Star Catalogue, také známém i jako Yale Catalogue of Bright Stars. Objekty zhruba této hvězdné velikosti by měly být lidem s ostrým zrakem na obloze bez jakéhokoliv světelného znečištění ještě viditelné. Katalog čítá na 9110 objektů, z čehož 9096 jsou hvězdy, 10 novy nebo supernovy a 4 jsou hvězdokupy. Aktuální verze pochází z roku 1991 a je již 5. vydáním.

Na první stránce se nachází vyhledávací tlačítko pro zúžení výběru, načtení celého katalogu by zabíralo poměrně dost času. Po porovnání řetězce s katalogovými označeními se objeví tabulka objektů, které vyhovují danému řetězci. Jednotlivé řádky zobrazují identifikace, jak je zobrazují různé katalogy a přidává k tomu i údaj o rektascenzi a deklinaci. Protože není zatím možnost přenastavit datum, dal jsem je raději zobrazit v epoše J2000, jak leží v databázi. Poslední sloupec „upravit“ slouží pro úpravu údajů o hvězdě. Spolu s možností „přidat hvězdu“ představují administrační rozhraní této části aplikace.

Po výběru objektů k zobrazení zaškrtnutím tlačítkem se zobrazí podobná tabulka jako u 50 nejjasnějších hvězd. Zde je navíc obohacena o možnost zobrazení podle jednotlivých dní v daném intervalu a ne pouze pro jeden.

3.5 *Proměnné hvězdy*

Některé hvězdy mění v určitých časových obdobích svou jasnost. Jde o poměrně častý jev, způsobovaný například rotací hvězdy s velkým počtem tmavých skvrn na jedné straně nebo jejím periodickým rozpínáním a zase smršťováním. Periodické proměnné hvězdy mívají stanovenou dobu, která uplyne mezi dvěma největšími poklesy jasnosti. Tyto nejhlubší poklesy na světelné křivce se nazývají primární minima. Hvězdy, jejichž důvod změn v jasnosti je díky dvojhvězdné soustavě, jejichž rovina oběhu je natočena směrem k nám, mívají i minima sekundární. Tato minima jsou způsobena střídavým překryvem jedné složky dvojhvězdy přes druhou.

Katalog proměnných hvězd v této aplikaci vznikl z katalogu na URL adrese <http://www.as.up.krakow.pl/ephem/> a doplněním údajů z GCVS katalogu, jako jsou rektascenze, deklinace nebo vlastní pohyby hvězd. Cílem této části aplikace je zobrazovat minima proměnných hvězd s přihlédnutím k pozorovacím podmínkám, jako je sluneční svit, výška nad obzorem nebo měsíční fáze.

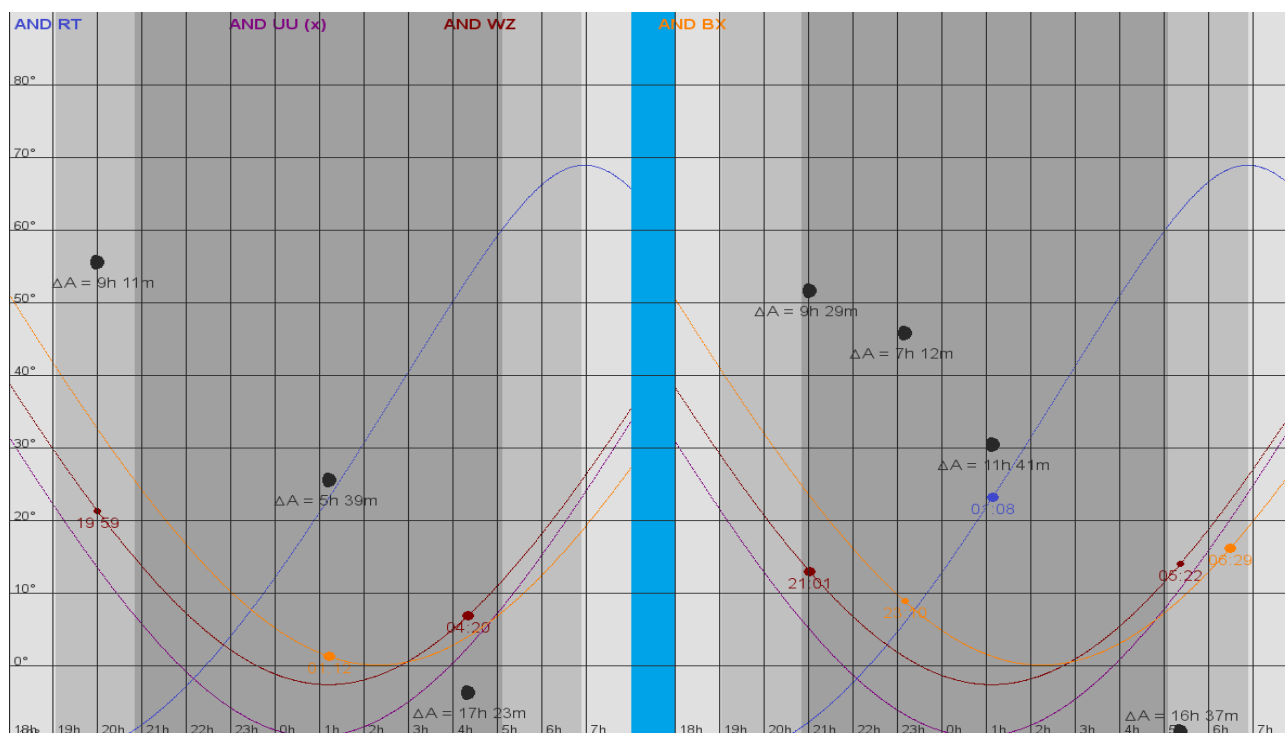
Po specifikaci názvu hvězdy se ukážou hvězdy obsahující hledaný řetězec. Vedle standardních hodnot, které jsem už zmínil v jiných částech, přibýly tři nové. Použitá minima nabývají hodnot PRI, pokud má hvězda v periodě pouze jedno minimum a ALL, pokud nastávají

minima primární i sekundární. Sloupec m_0 obsahuje juliánský čas prvního minima od $JD = 2452500$. Perioda je délka jednoho cyklu ve dnech.

Po kliknutí na jméno hvězdy se zobrazuje podobná tabulka jako v jiných částech aplikace. Hlavní rozdíl spočívá v tom, že řádky nejsou oddělené po dnech, ale po jednotlivých okamžicích minima. Zatímco sloupce východů a západů zůstaly, přibýly údaje o typu minima, výšce nad obzorem a azimutu pro daný okamžik. Nad tabulkou se zobrazuje i pořadové číslo cyklu od okamžiku m_0 a aktuální fáze na křivce podle jednoduchého vzorce

$$f = \text{frac}\left(\frac{JD - m_0}{P}\right), \text{ kde } P \text{ značí periodu a } \text{frac} \text{ funkci pro navrácení desetinné části.}$$

Časy minim lze zobrazit i do mapky a to zaškrtnutím vybraných hvězd a stiskem tlačítka „vykreslit“. Takto lze zobrazit až 5 hvězd naráz v časovém intervalu až 3 dní. Na mapě se zobrazí průběh výšky požadovaného objektu v čase. Primární minima se vyznačí kotoučky o průměru 10 pixelů, sekundární 6. V těchto časech se navíc zobrazí aktuální fáze Měsíce i s jeho výškou. Podmínkou pro vyznačení minima je i minimální výška dříve definovaná v aplikaci. K názvu hvězdy, které není vyznačeno žádné minimum, je připsáno „(x)“. Čas je vyznačen nespojitě tak, aby zobrazoval především noc. Nejtmavší částí je astronomická noc, kdy je Slunce více než 18° pod obzorem. Světlejší je čas mezi západem a astronomickým soumrakem a nejsvětlejší je den, jehož pás na jedné straně nepřesahuje více než hodinu a půl. Hranice mezi



jednotlivými dny je vyznačena modrým pruhem. Mapa je generována jako png obrázek a veškeré údaje se předávají přes url get metodou, lze ji tedy zobrazovat i externě. Navíc lze obrázek vygenerovat pro tisk, kde se podklad vykresluje jako čistě bílý.

3.6 Planety a Měsíc

Rektascenze a deklinace se u planet vzhledem k jejich blízkosti mění, podobně jako u Slunce, poměrně rychle. K jejich výpočtům jsem využil části PHP knihovny pro výpočet poloh od autora Jiřího Jozifa. Ta do výpočtů zahrnuje i korekce gravitačního působení hmotných objektů sluneční soustavy. Po získání rektascenze a deklinace se už spočítá východ a západ jednoduše. Odchylka nepřesahuje více než 2 minuty (případ Merkuru, který se každý den posune se Sluncem o 4 minuty).

Problém představuje Měsíc. Ten je natolik blízko, že se u něj každý den posune čas východu o zhruba 50 minut. Některé dny k východu nebo západu ani nedochází. Pokud jeden den zapadá např. ve 23:40, zapadne přibližně v 0:30 o dva dny později. Výpočet tedy provádím iterativně. V prvním kroku se standardně nastaví čas na 0:00 požadovaného dne. Po získání hodnoty času se tento čas nastaví a výpočet se opakuje. Takto se provedou 3 kroky postupně pro východ, průchod a západ, tedy dohromady 9 výpočtů polohy. Pokud některý z těchto časů vyskakuje z počítaného dne, místo času se napíše „***“. Tento formát jsem převzal z hvězdářské ročenky Hvězdárny a planetária hl. m. Prahy, podle které jsem prováděl i kontroly vypočtených časů.

3.7 Nastavení

Zde se nastavují parametry místa, případně času globálně pro celou aplikaci, které byly popsány už výše v kapitole 2.1. Ve formuláři je navíc jen minimální výška, která slouží jako spodní hodnota pro vykreslení kotoučků na mapce minim proměnných hvězd. Měsíc v této mapce touto hodnotou ovlivněn není, protože i když je kousek pod požadovaným obzorem, stále může svým svitem ovlivňovat blízké okolí.

Další částí je administrace předem definovaných lokací, která umožňuje jejich přidávání, úpravu a mazání. K místu se váže jen zeměpisná délka a zeměpisná šířka, čas je součástí stálého, globálního nastavení.

4 Aplikační výpočty

4.1 Juliánské datum

Pro astronomické výpočty je klasický kalendář, sestávající z nedesetinných dílů a výjimkami, jakou jsou přestupné roky, značně nepraktický. Proto je používáno takzvané „juliánské datum“, dále jen JD, počítající dny od pevně zvoleného data 1. 1. -4713 ve 12 hodin v juliánském kalendáři. V desetinné části JD je napočítán zlomek dne, ale je důležité mít na paměti, že datování počítá od poledne, ne půlnoci. Proto se například 18 hodin vyjádří jako $0,5 + 0,25 = 0,75$. JD bez zlomku s označuje jako JDN a používá se pokud stačí jen určit den, např. kvůli východu a západu objektu.

I přes důležitost správného výpočtu JD se ukázaly první dva algoritmy ze dvou různých zdrojů, které jsem se snažil použít, jako nesprávné a putovaly tedy do koše. Současná implementace výpočtu je tedy již třetí v pořadí. Algoritmus obsahuje větvení, proto ho zde neuvádím.

V aplikaci je juliánské datum nastavováno funkcí `setDateTime(...)` ve třídě `AstroCalc` zpravidla hned po její instanciaci.

4.2 Hvězdný čas

Protože se Země otáčí, vykonávají hvězdy po obloze zdánlivý pohyb. Proto podobně jako Slunce vycházejí, putují po obloze a zase zapadají. K určení aktuální polohy hvězdy se tedy užívá hvězdného času. Hvězdný čas vychází z délky trvání hvězdného dne o hodnotě 23h, 56 minut a 4,09 sekundy, za kterou Země vůči hvězdám vykoná jednu otočku. Tím, jak se Slunce zdánlivě posouvá pohybem Země kolem něj v prostoru, trvá jedno otočení vůči Slunci 24 hodin. S počátkem při podzimní rovnodennosti se tedy hvězdný a sluneční čas rozcházejí o 4 minuty za každý další den.

Hvězdný den je potřebný k výpočtu hodinového úhlu objektu. V aplikaci je vypočítáván ve funkci `siderealTime()`, která je volána z funkce `setDateTime(...)`, tedy při nastavování času pro výpočet, podle vzorce: $LST = \theta_0 + \theta_1 \cdot \Delta JD + 0.000387933 \cdot T^2 - T^3 / 38710000 - l$, kde ΔJD je počet dní od 1. ledna 2000 a T počet století. Pro Zemi platí, že $\theta_0 = 280.46061837$ a $\theta_1 = 360.98564736629$.

4.3 Výpočet polohy objektu

V některých částech aplikace je potřeba zjistit polohu objektu v daném časovém okamžiku –

např. při minimu proměnné hvězdy. Pokud hvězdnou oblohu přirovnáme k Zemi a souřadnicový systém k zeměpisnému, pak aktuální „hvězdnou délkou“ bude azimut a „hvězdnou šířkou“ bude obzorníková výška. Azimut udává orientaci od severu směrem k východu v intervalu $[0^\circ, 360^\circ)$ a výška výšku nad obzorem $[-90^\circ, 90^\circ]$. K jejich výpočtu je předtím ještě třeba zjistit hodinový úhel $H = \text{LST} - \alpha$. $H = 0$ odpovídá místnímu poledníku, což je místo, kde najdeme hvězdy jejichž rektascenze se rovná aktuálnímu hvězdnému času. V aplikaci se k výpočtu H přidává ještě místní čas a 180° kvůli posunutému JD. Po získání hodnoty H se počítá denní a roční aberace, která mírně upraví hodnotu deklinace, o kterých bude ještě řeč později. Výpočet azimutu a výšky už probíhá podle vzorců $A = \text{atan2}(\sin(H), \cos(H) \cdot \sin(\phi) - \tan(\delta) \cdot \cos(\phi))$ a $h = \text{asin}(\sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(H))$, kde ϕ značí zeměpisnou šířku a δ deklinaci objektu.

4.4 Sklon osy

Úhel, který spolu svírají rovina oběhu a osa otáčení rotujícího objektu, se nazývá sklon osy. U Země dnes činí přibližně 23.44° , ale v průběhu času se mění a to v rozmezí od 22.1° do 24.5° s periodou 41000 let. Stojí za zmínku, že nižší sklon osy je hlavním spouštěčem dob ledových, protože v polárních krajinách, kde ledové doby začínají, jsou roční období ještě kontrastnější.

V programu je znalost sklonu osy je potřebná k převodu z ekliptikálních na rovníkové souřadnice. Na výpočet se využívá funkce `epsilon_mean(JD)`, kterou napsal Jay Tanner v roce 2010 na základě práce Jacquese Laskara z roku 1986. Ten stanovil střední hodnotu jako rozvoj

$$\epsilon_m = 84381.448 - 4680.93t - 1.55t^2 + 1999.25t^3 - 51.38t^4 - 249.67t^5 - 39.05t^6 + 7.12t^7 + 27.87t^8 + 5.79t^9 + 2.45t^{10},$$

kde 84381.448 je sklon zemské osy v arkus sekundách od J2000.0, tedy $23^\circ 26' 21.448''$. Hodnota t je rovna desetitisícům let od J2000.0.

4.5 Východ a západ Slunce

Aplikace vypočítává východy a západy Slunce, které poté na některých místech v různé podobě zobrazuje. U nebeských těles je barvou naznačena možnost pozorování v daném dni, u mapky minim proměnných hvězd jsou minima zasazena do barevného podkladu, který se liší podle soumraku nebo úsvitu, případně noci.

Stejně jako u hvězd, ke zjištění polohy objektu na obzoru se zjistí hodinový úhel podle vzorce $\cos \omega_0 = -\tan \phi \cdot \tan \delta$, kde ϕ značí zeměpisnou šířku a δ deklinaci objektu. Jeden z problémů spočívá v tom, že vlivem atmosférické refrakce, která je na obzoru nejvyšší, je

Slunce v této oblasti vyzdvihováno asi o 0.6° . Proto je ve většině zemí ustanoven oficiální východ a západ jako hodnota 90.833° od zenitu. Pokud se rozloží tg jako podíl $\sin / \cos$, půjde $\cos z$ do čitatele $\cos \omega_0 = \frac{\cos z - \tan \phi \cdot \tan \delta}{\cos \phi \cdot \cos \delta}$. Pokud je ω menší než -1 , Slunce na daném místě nezapadá, pokud větší, nevychází.

Jak už bylo řečeno dříve, existuje vícero druhů soumraků a úsvitů, pro oficiální se použije zenitová vzdálenost $z = 90.833$, $z = 96^\circ$ pro občanský, $z = 102^\circ$ pro nautický a $z = 108^\circ$ pro astronomický. Aplikace označí zeleně ty objekty, které lze vidět za astronomické noci. Oranžově pokud jdou vidět alespoň mezi občanským a astronomickým soumrakem nebo astronomickým a občanským úsvitem. U mapky minim proměnných hvězd jsou tato dvě údobí odlišena stupni šedi.

Dalším problémem je získání deklinace Slunce, která se rychle mění. K jeho výpočtu je nejdříve spočítat několik dalších veličin. Aproximace slunečního poledne

$$J' = 2451545.009 + \frac{l_w}{360^\circ} + n, \text{ kde } n \text{ značí juliánský cyklus od } J2000.0 \text{ a } l_w \text{ zeměpisnou}$$

délku s pozitivní hodnotou zeměpisného západu. $n = \left\lfloor JD - 2451545.009 - \frac{l_w}{360^\circ} + \frac{1}{2} \right\rfloor$. Dále

pak střední odchylka Slunce $M = [357.5291 + 0.98560028 \cdot (J' - 2451545)] \bmod 360$. Rovnice centra $C = 1.9148 \sin(M) + 0.0200 \sin(2M) + 0.0003 \sin(3M)$. Ekliptikální délka

$\lambda = (M + 102.9372 + C + 180) \bmod 360$, z níž se konečně vypočítá deklinace $\sin \delta = \sin \lambda \cdot \sin \epsilon$. Sklon osy ϵ je roven přibližně 23.45° , přesnější výpočet je vysvětlen později. Ze znalosti J' se vypočítá průchod Slunce nebeským poledníkem, tedy kdy bude „uprostřed“ mezi západem a východem $J_{transit} = J' + 0.0053 \cdot \sin M - 0.0069 \cdot \sin(2\lambda)$. Nakonec ze znalosti času přechodu přes nebeský poledník a hodinového úhlu vypočítá západ Slunce

vzorcem $J_{set} = 2451545.0009 + \frac{\omega_0 + l_w}{360^\circ} + n + 0.0053 \cdot \sin M - 0.0069 \sin(2\lambda)$, východ bude od poledníku stejně vzdálen jako západ, lze ho tedy už jednoduše dopočítat.

4.6 Východ a západ objektu

K výpočtu východu a západu objektu lze s úspěchem využít již popsané vzorce jen s drobnými rozdíly. Poloha hvězd se nemění tak rychle jako Slunce, proto není třeba složitě vypočítávat neustále se měnící deklinaci objektu. Hodinový úhel lze tedy přímo vypočítat ze vzorce

$\cos \omega_0 = \frac{\cos z - \sin \phi \cdot \sin \delta}{\cos \phi \cdot \cos \delta}$, kde by ω mělo nabývat hodnot v intervalu $[-1, 1]$ pokud má zapadat,

respektive vycházet. I průchod se počítá jednodušším způsobem podle vzorce

$J_{transit} = \Delta JD + H/24$. V aplikaci se ještě přidává +1 nebo -1 podle toho, jak je např. potřeba sloučit buňky tabulky ve výpisu BSC katalogu. Čas východu a západu se spočítá

$$J_{rise} = J_{transit} - LHA \quad \text{a} \quad J_{set} = J_{transit} + LHA \quad , \text{ kde } LHA = \frac{\arccos(\omega_0)}{24 \cdot 15.04107} \quad .$$

4.7 Fáze Měsíce

XXX

5 Drobné astronomické korekce

Následující sekce se zabývá drobnými astronomickými korekcemi. Jejich hodnoty dosahují nanejvýš několika úhlových minut, nicméně se kumulují a časem se jejich účinek postupně projevuje.

5.1 Precese

Precesí se rozumí největší z druhotných pohybů rotujícího hmotného tělesa způsobený gravitací. Orientace zemské osy se v tomto důsledku pohybuje po kružnici, kterou opisuje jednou za 25800 let. Existují i další pohyby jako jsou nejruznější nutace (viz níže) nebo polární pohyb, který je však o několik řádů menší než precese, proto se spolu s dalšími menšími pohyby v aplikaci už vůbec neuvažuje.

Precesní pohyb způsobený Měsícem, který se snaží Zemi narovnat do své roviny, takže se o ni „tahá“ se Sluncem v poměru sil 3:2, se nazývá lunisolární precese zemské osy, díky němuž se jarní bod posouvá o zhruba 50,4" za rok. Touto silou by Země vykonala plný okruh za 25725 let. Vedle něj existuje ještě planetární precese, posouvající zemský rovník v rovině ekliptiky o 0,46" za rok, což způsobuje posuv jarního bodu o -0,12" za rok. Dále nastává posun o 0,02" za rok vlivem geodetické precese v souladu s obecnou teorií relativity. Koncový složený precesní pohyb se nazývá „všeobecná precese zemské osy“, dávající již dříve zmiňovanou periodu oběhu 25800 let.

V aplikaci se pro získání precese nejdříve spočítají precesní úhly podle vzorců

$$\zeta = \frac{2306.2181 \cdot t^1 + 0.30188 \cdot t^2 + 0.017998 \cdot t^3}{3600} \quad \eta = \frac{2306.2181 \cdot t^1 + 1.09468 \cdot t^2 + 0.018203 \cdot t^3}{3600}$$

$$\theta = \frac{2004.3109 \cdot t^1 + 0.42665 \cdot t^2 + 0.041833 \cdot t^3}{3600} \quad , \text{ kde } t \text{ udává počet století od roku 1. ledna 2000,}$$

tedy rozvoj převedený do úhlových vteřin (pro účely programu poté i do radiánů). Z těchto úhlů

a ze znalosti α a δ se vypočítají pravoúhlé souřadnice: $a = \cos(\delta) \cdot \sin(\alpha + \zeta)$,

$$b = \cos(\theta) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\alpha + \zeta) - \sin(\theta) \cdot \sin(\delta) \quad , \quad c = \sin(\theta) \cdot \cos(\delta) \cdot (\alpha + \zeta) + \cos(\theta) \cdot \sin(\delta) \quad .$$

Zádrhel zde představují hodnoty deklinace blízko pólů, kde místo úhlových vteřin, maximálně minut, jsem naměřil nárůst hodnot až o stupně. Hodnoty, které pozvolna rostly do 80° až k hodnotě něco přes jednu minutu, byly už zhruba 7 minut u 85° a 7° u 89.9°. Proto jsem se rozhodl u deklinací nad 80° od rovníku použít precesní pohyb z hodnoty 80°. Konečný posun hodnoty v rektascenzi a deklinaci jsem získal převodem pravoúhlých souřadnic na sférické

$$\alpha' = \eta + \operatorname{atan2}(a, b) \quad \text{a} \quad \delta' = \operatorname{asin}(c) \quad .$$

5.2 Nutace

Nutace je malý vlnivý pohyb v ose otáčení převážně osově symetrického objektu, jako je planeta nebo letící kulka. Není tak velká jako precese zemské osy, ale stále má v rotaci svůj význam. V případě Země je způsobena slapovými silami, kdy je planeta nucena se střídavě dostat do roviny Měsíce a do roviny Slunce. Největší z nutací dosahuje 17" v délce a 9" ve sklonu, které probíhají v periodě 18,6 let, ostatní jsou o dost menší. Výpočty počítající tyto výchylky jsou poměrně složité a musí se brát v potaz i takové záležitosti jako je deformace sféricity Země.

V programu jsem na výpočet nutace opět převzal vzorce Jaye Tannera, které sepsal v roce 2012. Funkce getNutation(JD) provádí na zhruba dvou stech řádcích v samostatném souboru nejprve výpočet nutace ve sklonu a poté nutace v délce, na konci je vrátí v poli o dvou prvcích. Existují i další nutace, ale ty jsem už nebral v potaz, protože bývají až o několik řádů menší. Vzorce sem pro svou složitost přepisovat nebudu, pouze bych zmínil, že v roce 2012 dosahují hodnoty 0.0046° ve sklonu a -0.000764° v délce.

5.3 Vlastní pohyb hvězd

Hvězdy v naší Galaxii obíhají kolem jejího centra různou rychlostí. Jak plují prostorem, jejich vzájemné polohy se vůči sobě mění, což nazýváme vlastním pohybem hvězdy. Naše Slunce, pro příklad, se pohybuje kolem centra rychlostí 220 km/s. Veličina je měřena v arkus sekundách za rok a vzhledem ke konečnosti rychlosti světla pochází z doby, kdy světlo opustilo hvězdu. Pro nás je nejrychleji se pohybující hvězdou Barnardova šipka se svými 10,3 as/rok, což činí asi čtvrtinu stupně za jeden lidský život, tedy polovinu Měsíčního průměru. V roce 1992 se dokonce hvězda Rho Aquilae přesunula ze souhvězdí Orla do souhvězdí Delfína.

K měření se užívají dvě veličiny – poziční úhel vyjadřující směr pohybu na nebeské sféře a samotný vlastní pohyb hvězdy v úhlových vteřinách za rok. Druhá možnost je zadání změny přímo v rektascenzi a deklinaci za rok. Tento způsob používá i tato aplikace. Pro výpočet se tedy

užívá vzorců $\Delta \alpha = \frac{\mu_\alpha \cdot \cos \delta}{15} \cdot t$ a $\Delta \delta = \mu_\delta \cdot t$, kde t je počet let od ekvinokcia. Z uvedeného

vzorce například vyplývá, že na pólech platí vztah $\mu = \mu_\delta$. Pro přesnější výpočet by byla potřeba znát i vzdálenost objektu, neboť díky prostorovému posuvu se postupem času mění i hodnoty μ_α a μ_δ . Vzdálenost bohužel Bright Star Catalogue neviduje. Například u hvězdy Arcturus, která je známá svým velkým pohybem mezi jasnými hvězdami, jsem takto naměřil odchylku zhruba 1 úhlovou minutu za 300 let.

V aplikaci jsou μ_α a μ_δ uloženy jako sloupce μ_{α^*} , respektive μ_δ u Brightest Star Catalogu a μ_{α^*1} , respektive μ_{α^*2} u proměnných hvězd. V náležejících oblastech aplikace jsou vlastní pohyby hvězd také vypočítávány. K tomuto účelu byla data z katalogu <http://www.as.up.krakow.pl/ephem/> spárována s daty z katalogu GCVS, který poskytl údaje o poloze a vlastním pohybu hvězd.

5.4 Aberace

Aberace je jev vznikající díky konečnosti rychlosti světla. Následkem se hvězdy mohou posunout ve zdánlivé poloze až o 20". Představme si déšť za oknem vlaku, který padá svisle, pokud venku nefouká žádný vítr. Jak se vlak rozjíždí, kapky se začínají mírně naklánět. Pokud sedíme v TGV, kapky již padají téměř v horizontálním směru, protože vlak jede asi 4x rychleji, než padá déšť k zemi. Podobně se paprsek světla mírně zakřivuje při pohybu Země kolem Slunce a všechny hvězdy tak opisují elipsu s poloosou o poloměru 20", tento jev se nazývá hvězdná nebo roční aberace. Rozdíly rektascenze a deklinace se vypočítají podle vzorců

$$\Delta \alpha = \frac{(-20,496'' (\cos \alpha \cdot \cos \lambda_s \cdot \cos \epsilon + \sin \alpha \cdot \sin \lambda_s))}{\cos \delta} \quad \text{a}$$

$\Delta \delta = -20,496'' (\cos \lambda_s \cdot \cos \epsilon (\tan \epsilon \cdot \cos \delta - \sin \alpha \cdot \sin \delta) + \cos \alpha \cdot \sin \delta \cdot \sin \lambda_s)$, kde λ_s značí geocentrickou ekliptikální délku Slunce (je vypočítávána ve funkci `posSunMoon()`) a ϵ sklon zemské osy. Program vypočítává navíc denní aberaci, která vzniká otáčením kolem osy. Její nejvyšší hodnota, která vzniká na rovníku však dosahuje pouze 0.32". Rozdíl rektascenze

denní aberace se počítá $\Delta \alpha = \frac{k \cdot \varrho \cdot \cos \phi \cdot \cos t}{\cos \delta}$ a rozdíl deklinace $\Delta \delta = k \cdot \varrho \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta \cdot \sin t$,

kde k je konstanta denní aberace $k = 0,3198''$, ϱ je vzdálenost od středu Země, ϕ značí zeměpisnou šířku a t hodinový úhel objektu.

5.5 Astronomická refrakce

Vlivem ohybu přicházejícího paprsku v atmosféře dochází k mírnému posunutí zdroje. Tento jev má na svědomí index lomu, kde se atmosféra projevuje jako nekonečně vrstvé optické prostředí. Zhruba do výšky 45° se zdroj posunuje o 1' a dosahuje až ke 34" za normálního tlaku a teploty na horizontu. Hodnoty blízko horizontu už nelze vypočítat, proto se používají empirické hodnoty. Protože se poloha mění vzhledem k aktuální výšce, vzhledem ke složitosti výpočtů jsem astronomickou refrakci ve svých výpočtech vynechal.

6 Slovník pojmů

V této kapitole jsou popsány pojmy, které neměly vlastní kapitolu nebo nebyly dokonce vůbec vysvětleny.

6.1 Azimut

Úhel ve sférickém souřadnicovém systému počítající se od vektoru roviny kolmé k referenční rovině směřující na sever, a vektorem roviny také kolmé k referenční rovině směřujícím k severu. Jednoduše, sever má azimut 0° , východ 90° , jih 180° a západ 270° . Od rektascenze se liší tím, že se v průběhu dne mění podle aktuální polohy objektu.

6.2 Deklinace

Souřadnice v rovníkovém souřadnicovém systému udávající úhlovou vzdálenost od světového rovníku. Dosahuje hodnot od -90° na pólu jižním, 0 na rovníku až po $+90^\circ$ na pólu severním. Udávaná poloha hvězdy se v průběhu času mění jen málo.

6.3 Ekvinokcium

Epocha, k níž jsou evidovány údaje o nebeských objektech. Běžně se ekvinokcia vztahují k datům dělitelným 50, používající se 25 let před a po daném datu. J2000 se tedy většinou používá pro měření z let 1975 po rok 2025. Aktualizace se provádějí z důvodů změn v poloze hvězd v čase, čímž se podrobněji zabývá kapitola o astronomických korekcích.

6.3 J2000

Současné používané ekvinokcium, v němž je uložena naprostá většina záznamů v aplikaci. Jako standard vydrží až do roku 2025.

6.4 Magnituda

V češtině také jasnost nebo hvězdná velikost udávající jasnost nebeského objektu. Stupnice je převrácená a logaritmická. Pro příklad, pokud je jedna hvězda magnitudy 1 a druhá magnitudy 6, je ta první 100x jasnější oproti druhé. V astronomii existují dva druhy jasnosti. Zdánlivá popisuje objekt tak, jak ho vidíme na pozemské obloze bez ohledu na vzdálenost. Zdravé lidské oko běžně zaznamenává na tmavé obloze bez znečištění zdroje až do 6. hvězdné velikosti. Absolutní jasnost měří skutečný tok hvězdy do prostoru. Její hodnota se rovná zdánlivé jasnosti, pokud by se od nás hvězda nacházela přesně stanovených 10 parseků (32,6 světelných let).

6.5 Minimum

Myšleno minimum vznikající při pravidelných zákrytech dvou objektů, díky čemuž dochází k poklesům jasnosti. Nejhlubší periodicky se opakující poklesy se nazývají minima. Pokud je druhá složka dostatečná, dochází v jednom cyklu k minimům dvěma, primárnímu a sekundárnímu.

6.6 OpenGL

Standard pro tvorbu grafických aplikací. Nejčastější se OpenGL používá pro tvorbu trojrozměrných aplikací.

6.7 PHP

Skriptovací jazyk pro převážně webové prostředí. Jazyk této aplikace včetně všech použitých přidružených knihoven.

6.8 Soumrak

6.8.1 Astronomický soumrak

Období, kdy se Slunce nachází mezi 12° a 18° stupni pod obzorem. Postupně se objevují objekty od 1. až po 6. magnitudu.

6.8.2 Nautický soumrak

Období, kdy se Slunce nachází mezi 6° a 12° stupni pod obzorem. Název podle toho, že v tomto období je optimální provádět námořní navigaci.

6.8.3 Občanský soumrak

Období od západu až do doby, kdy se Slunce nachází 6° pod obzorem. Stále je možné provádět běžné činnosti a rozeznávat obrysy objektů.

6.9 Souřadnice

6.9.1 Ekliptikální

Sférický souřadnicový systém, u něhož je základní rovinou rovina ekliptiky. Počátkem souřadnic je jarní bod.

6.9.2 Pravoúhlé

Souřadnicový systém se sestává z os X, Y, Z, které jsou na sebe navzájem kolmé.

6.9.3 Rovníkové

Sférický souřadnicový systém, u něhož je základní rovinou nebeský rovník.

6.10 Rektascenze

Souřadnice v rovníkovém souřadnicovém systému udávající úhlovou vzdálenost od severu. Měření se provádí v hodinách, kde $1\text{ h} = 15^\circ$. Dosahuje hodnot od 0 h na severu, 6 h na východě, 12 h na jihu a 18 h na západě. Od azimutu se liší tím, že se u hvězd mění jen málo, přičemž azimut udává aktuální polohu.

6.11 Obzorníková výška

Udává aktuální výšku hvězdy nad obzorem od -90° po $+90^\circ$. Od deklinace se liší tím, že závisí na aktuálním čase.

7 Zdroje

Předělám později, předešlou verzi jsem raději zatím stáhl.