

MASARYKOVA UNIVERZITA
FAKULTA INFORMATIKY



**Využití strojového učení pro plánování
astronomických pozorování**

Bakalářská práce

Jakub Vonšovský

Brno, jaro 2012

Prohlášení

Prohlašuji, že tato bakalářská práce je mým původním autorským dílem, které jsem vypracoval samostatně. Všechny zdroje, prameny a literaturu, které jsem při vypracování používal nebo z nich čerpal, v práci řádně cituji s uvedením úplného odkazu na příslušný zdroj.

Jakub Vonšovský

Vedoucí práce: RNDr. Petr Švenda PhD.

Poděkování

Zde bych rád poděkoval Mgr. Štefanu Parimuchovi PhD. za návrh, testování a připomínky během práce, Mgr. Marku Skarkovi z ústavu Teoretické fyziky a astrofyziky za rady ohledně astronomických záležitostí a především svému vedoucímu práce RNDr. Petru Švendovi PhD., bez něhož bych na tomto zajímavém zadání nepracoval a který do úspěšného dokončení práce vložil nemalé úsilí.

Shrnutí

Cílem práce bylo vytvořit nástroj, který by pomohl rozvhnout astronomická pozorování hvězdárny v Košicích s primárním zaměřením na proměnné hvězdy. Práce nabízí přehled o viditelnosti planet, Měsíce, Slunce a hvězd. Metodou strojového učení byl vytvořen doporučovací systém pro pozorování proměnných hvězd.

Klíčová slova

Expertní systém, strojové učení, proměnné hvězdy, PHP, astronomická pozorování

Obsah

1	Úvod	1
2	Existující nástroje	2
2.1	Nástroje astronomických pozorování	2
2.2	Nástroje strojového učení	2
2.3	Použitý software	4
3	Systém doporučení	5
3.1	Popis	5
3.2	K-d strom	6
3.3	Algoritmus k-nejbližších sousedů	6
3.4	Neuronové sítě	8
3.5	Shlukování	9
4	Komponenty pozorovacího kalendáře	10
4.1	Místo a čas	10
4.2	Východ / západ Slunce	11
4.3	Nejjasnější hvězdy s časy	12
4.4	Bright Star Catalogue	12
4.5	Proměnné hvězdy	13
4.6	Planety a Měsíc	15
4.7	Nastavení	15
5	Aplikační výpočty	16
5.1	Juliánské datum	16
5.2	Hvězdný čas	16
5.3	Výpočet polohy objektu	17
5.4	Sklon osy	17
5.5	Východ a západ Slunce	17
5.6	Východ a západ objektu	19
5.7	Fáze Měsíce	19
6	Drobné astronomické korekce	20
6.1	Precese	20
6.2	Nutace	21
6.3	Vlastní pohyb hvězd	21

6.4	Aberace	22
6.5	Astronomická refrakce	23
7	Slovník pojmů	24
8	Závěr	26
A	Test k-nejbližších sousedů	27
B	Test neuronové sítě	28

1 Úvod

Informační technologie dnes zasahují snad do každé oblasti výzkumu. Nejinak je tomu u astronomie, kde objem informací roste rychleji než jsou astronomové vůbec schopni zpracovávat. Ale u naprosté většiny dalekohledů jsou zadavatelé stále lidé. Je tedy vhodné pozorovací čas nějak organizovat. Zvláště u těch největších dalekohledů, které vznikají ve spolupráci více států a kde pozorovací týmy dostávají pozorovací čas jen na pár dní v roce.

Tato práce si klade za cíl s touto organizací času pomoci. S primárním zaměřením na proměnné hvězdy dává s použitím metod strojového učení, které bere v potaz takové parametry jako například osvětlení oblohy Měsícem nebo délku periody a napomáhá pro dané místo vybrat objekty vhodné pro daný pozorovací čas. Výsledkem je přehledný výstup v tabulce nebo ve vygenerovaném obrázku. Práce vznikala ve spolupráci s Mgr. Štefanem Parimuchou PhD. z Katedry teoretické fyziky a astrofyziky PF UPJŠ v Košicích.

Při vývoji byly kladeny požadavky na výpočet východu a západu Slunce, Měsíce a jednotlivých planet, které jsou popisovány v kapitolách Východ / západ Slunce 4.2 a Planety a Měsíc 4.6. Dále na výpočet viditelnosti nejjasnějších hvězd a hvězd z Bright Star Catalogue. Ty jsou popsány v kapitolách Nejjasnější hvězdy s časy 4.3 a Bright Star Catalogue 4.4. Pro zadavatele je důležitá hlavně část s proměnnými hvězdami. Jejím popis se nachází v kapitole Proměnné hvězdy 4.5. Expertnímu systému v proměnných hvězdách, nabízející objekty podle aktuálních okolností a předešlého uživatelského výběru, je věnována kapitola 3.

Pro práci byl zvolen jazyk PHP jako primární programovací jazyk, především pro snadnou použitelnost, relativní přehlednost a přístupnost z webu. Pro uchování data jsem použil databázový systém SQLite kvůli snadné přenositelnosti mezi počítači, není tedy nutné aby v pozadí počítače, kde běží PHP server, musel běžet i server MySQL nebo jemu podobný. Pro analýzy strojového učení byly využity jazyky Java, C, a C#. Funkční doporučovací systém této práce používá jazyk C pro jeho velkou rychlost oproti jazyku PHP.

2 Existující nástroje

V této kapitole nejprve uvádím výčet tří nástrojů pro každou oblast, které se v nich používají. Při této práci jsem je buď přímo využíval, inspiroval se jimi nebo jen registroval jejich existenci jako možnou alternativu. Následuje přehled softwaru, který jsem při vývoji skutečně používal jako kontrolu správnosti.

2.1 Nástroje astronomických pozorování

Stellarium Open-source program simulující planetárium ke stažení na adrese www.stellarium.org vyvíjený Fabienem Chéreau od roku 2001 dodnes. Pomocí grafické knihovny OpenGL vykresluje na hvězdné obloze hvězdy, planety, souhvězdí, obrazy mlhovin a galaxií v realistické atmosféře. Aplikace se tedy snaží zobrazit přesně to, co lze v danou chvíli na daném místě na obloze spatřit. K vybranému objektu navíc přehledně zobrazí jeho parametry jako je jeho název, výška nad obzorem nebo jasnost. Ovládání je velmi jednoduché a intuitivní, postačí jen myš. Při jeho prvním použití se jen musí nastavit místo pozorování.

AA+ C++ framework pro výpočetní astronomii k dispozici na adrese <http://www.naughtier.com/aa.html>. Výpočty zahrnují východy / západy objektů, jejich pozice a další užitečné prvky. Mezi objekty lze nalézt i některé komety, měsíce jiných planet nebo složky vícenásobných systémů. Implementace knihy „Astronomické algoritmy“ Jeana Meeuse.

DeepSky2000 Komerční plánovač astronomických pozorování. Trial verze je dostupná na adrese <http://www.deepsky2000.com>. Nabízí možnost filtrování podle aktuálně viditelných objektů na obloze podle jednotlivých souhvězdí a jejich samotných typů. Po zadání místa a času pozorování a specifikace rozsahu jasností vrací tabulku s rozpisem časů. V té má každý objekt vypsán podrobné informace včetně popisu od ostatních astronomů. K dispozici jsou i již sestavené pozorovací plány.

2.2 Nástroje strojového učení

Weka Open-source sada nástrojů pro strojové učení vyvíjená na univerzitě Waikato na Novém Zélandu ke stažení na adrese www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/. K jednotlivým algoritmům lze přistoupit kromě GUI i přes příkazovou řádku nebo Java knihovnou v developer verzi. Ve svém repertoáru má Weka nástroje

pro předzpracování, klasifikaci, regresi, shlukování, asociační pravidla a vizualizaci[8].

Weka používá k ukládání dat vlastní formát arff. Na začátku souboru je definován název datasetu klíčovým slovem @relation. Následují řádky začínající klíčovým slovem @attribute, definující jednotlivé atributy. Struktura takového řádku sleduje schéma @attribute 'Název' typ. Typ nabývá hodnot numeric pro čísla, string pro řetězce, nominal pro výčet a date pro datum. Posledním atributem bývá atribut Class, obsahující výčet, který je poté rozhodován. Poté následuje sekce uvozena slovem @data obsahující na každém dalším řádku hodnoty oddělené čárkou. Testovací arff soubor k doporučovacím systému se nachází ve složce test.

Po spuštění programu, výběru možnosti „Explorer“ a načtení souboru zpravidla přichází výběr atributů a fáze předzpracování. V testovacím souboru jsem pro předzpracování volil diskretizaci hodnot bez učitele. Nahoře následuje skupina záložek, každá pro různé typy operací, jako např. klasifikace nebo shlukování. Stačí si jen vybrat a spustit, algoritmy se už navolí s předdefinovanými hodnotami, které lze později měnit.

RapidMiner Sada nástrojů strojového učení, analýzy a dolování dat. Kromě výzkumu se používá i v průmyslových aplikacích a v letech 2009 a 2010 vyhrál 2. a 1. místo nástrojů dolování dat používaných ve skutečných projektech[12][13]. Podobně jako u Weky lze program používat přes GUI, příkazovou řádku nebo API ve zdrojovém kódu. Narozdíl od Weky dokáže data vizualizovat a aplikaci lze rozšiřovat o moduly. Jak Weku, tak R lze do RapidMineru integrovat. Ke stažení je na adrese <http://rapid-i.com/> (community edition).

R R je prostředí statistického softwaru a zároveň multiparadigmatický programovací jazyk. Podle výčtu na stránce <http://cran.r-project.org/web/views/> lze R použít v oblastech jako je strojové a statistické učení, zpracování přirozeného jazyka, analýza medicínského obrazu, analýza časových řad nebo třeba v genetice. Rozšíření je snadné přes rozsáhlý systém balíčků, umožňující prostředí zaměřit jen na určitou malou oblast zájmu. Spolu s RapidMinerem soutěží o přední příčky v oblíbenosti mezi nástroji dolování dat[12]. Ke stažení je na adrese <http://www.r-project.org/>.

2.3 Použitý software

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

Weka Většinu testů zmíněných v tomto textu jsem provedl na GUI verzi tohoto nástroje. Nicméně situaci poněkud komplikuje fakt, že po zadání vstupu se vrací již zformátovaný výstup s malou možností škálovatelnosti. Proto jsem její použití ve zdrojovém kódu nakonec zavrhl. Testovací arff, který slouží pro Weku jako vstup, lze vygenerovat přímo z SQLite databáze projektu programem arffoutput ve složce test, který jsem napsal v jazyce C, není tedy přímo součástí hlavní aplikace. Ve složce by měl být jeden arff soubor z průběhu testování přítomen.

Základní astronomické výpočty Pro ověřování juliánského a hvězdného času jsem využil jednoduchou javascriptovou aplikaci na 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.

Minima proměnných hvězd Kontrola výpočtů minim proměnných hvězd javascriptem a samotný formát výpisu časů byl převzat podle výpisu, ke kterému se dá dostat z URL adresy [http://www.as.up.krakow.pl/ephem/\[14\]](http://www.as.up.krakow.pl/ephem/[14]) po výběru souhvězdí a hvězdy samotné.

3 Systém doporučování

Cílem bylo vytvořit doporučování dalších hvězd podle vybraných již v minulosti na základě parametrů jako jsou jejich vlastnosti nebo prostředí. Nabídka má pomoci pozorování podobných objektů.

3.1 Popis

Doporučovací systémy jsou dnes ve velmi aktivním vývoji. Například společnost Netflix zabývající se streamováním video obsahu vypsala v roce 2006 odměnu 1 milión USD tomu, kdo jejich algoritmus nabízení obsahu vylepší o 10%. Výhra byla udělena po třech letech běhu soutěže. Pravidla i s výsledky jsou k vidění na adrese <http://www.netflixprize.com/>. S doporučováním obsahu se dále lze setkat například na známých serverech amazon.com v případě knih nebo na ebay.com v případě zboží. Tyto služby k problému přistupují zpravidla dvěma základními způsoby.

Prvním z nich je kolaborativní filtrování. Funguje na předpokladu, že jeden uživatel má podobné zájmy jako uživatel druhý. Pokud existuje uživatel X, který má rád objekty A a B a další uživatel Y, který má rád objekt A, je pravděpodobnější, že bude mít rád objekt B než náhodně vybraný jiný prvek z testované množiny. Příkladem budiž last.fm, který nabízí posluchačům hudby další skladby podle jiných uživatelů, kteří si již vyposlechli stejné. Tato metoda vyžaduje velké množství dat od velkého množství uživatelů, což její použití znesnadňuje na začínajících systémech.

Metodou druhou je filtrování na základě obsahu. Podle výběru položek s určitými vlastnostmi jsou metodami strojového učení jako např. Bayesovské klasifikátory, rozhodovací stromy nebo neuronové sítě odhadována pravděpodobnost, že se uživateli bude daná věc líbit. Nevýhodou je menší přesnost než u předešlé metody, na druhou stranu si lze vystačit už s malým množstvím dat. Jedním z příkladů z praxe je server filmové databáze imdb.com. V této práci jsem k doporučování využil algoritmu k-nejbližších sousedů spadající do této kategorie pro svou jednoduchost a přesnost. Nejdříve ale pár slov k pomocné datové struktuře k-d stromu.

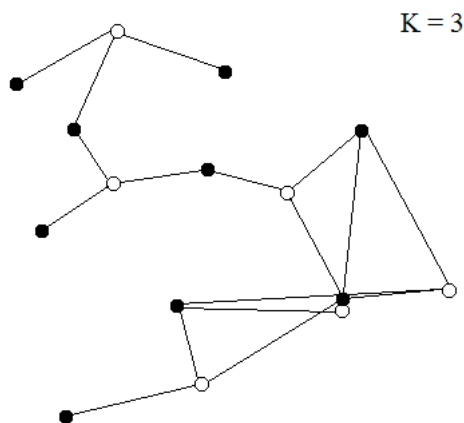
3.2 K-d strom

K-dimenzionální strom je datová struktura pro body v k-dimenzionálním prostoru. Jde o binární strom, kde dva nelistové uzly rozdělí nadrovinu svého rodiče na dva poloprostory. Body vlevo od nadroviny reprezentují levý podstrom a body vpravo pravý podstrom. Směr nadroviny je stanoven následujícím způsobem: každý uzel ve stromě je přiřazen k jedné z k-dimenzí s nadrovinou kolmou k ose dimenze.

Operace hledání, vložení a mazání v k-d stromu mají průměrnou složitost $O(\log n)$, v nejhorším případě $O(n)$. Tento nejhorší případ nastává pokud je k vysoké číslo, tedy čím vyšší dimenze, tím je tato struktura méně efektivní. K-d stromy se hodí v případech zahrnujících hledání ve vícerozměrných prostorech jako algoritmus k-nejbližších sousedů.

3.3 Algoritmus k-nejbližších sousedů

Algoritmus k-nejbližších sousedů je metodou strojového učení pro učení s učitelem. Každý objekt z trénovací množiny má svoji polohu v N-dimenzionálním prostoru, kde N je počet testovaných příznaků. Objekty z testovací množiny se snaží nalézt svých k nejbližších sousedů z trénovací množiny. Jako měřidlo stačí euklidovská vzdálenost $d(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \sqrt{(q_1 - p_1)^2 + (q_2 - p_2)^2 + \dots + (q_n - p_n)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - p_i)^2}$. Např. ve dvojrozměrném prostoru je euklidovská vzdálenost běžně známa jako Pythagorova věta. Při klasifikaci je třída testovaného zvolena na základě většiny hlasů sousedů. Pokud je $K = 5$ a z pěti nejbližších sousedů mají dva zelený trávník a tři trávník modrý, testovaný objekt má také modrý trávník. Při predikci, což je i případ této práce, je z K sousedů zvolen aritmetický průměr. Pokud má být výstupem predikce výšky a z našich 5 sousedů je každý další o 5 cm vyšší, kde nejmenší měří 160 cm, testovaný objekt bude mít výšku 170 cm.



V této práci jsou výběry proměnných hvězd zaznamenávány do databázové tabulky `log_star`. Tyto výběry poté slouží jako trénovací data, které se sbírají nejvýše 2 měsíce do minulosti, což by mělo minimalizovat počet hvězd, které už v daném období nevycházejí. Pokud se některý objekt vyskytuje vícekrát, je vícenásobný výskyt vyfiltrován, aby se sám nestal všemi sousedy blízkých bodů. Není důležité nabízet pořád stejné objekty, již vybrané v minulosti, ale spíše ty s podobnými vlastnostmi.

Výběr zahrnuje se rektascenzi, periodu proměnnosti, fázi křivky proměnnosti hvězdy o půlnoci, aktuální fázi Měsíce a výšku hvězdy o půlnoci. První tři parametry by měly zajistit výběr na základě vlastností objektu, další dva na základě pozorovacích podmínek. Po načtení vybraných parametrů trénovacích dat, přichází fáze předzpracování. V té se hodnoty upraví tak, aby střed ležel v nule a rozptyl byl 1. Po předzpracování jsou hodnoty vloženy do k-d stromu, s nímž bude výpočet algoritmu trvat průměrně $O(n \log n)$ operací. Porovnávání hrubou silou by jich zabralo $O(n^2)$.

V poslední fázi nastupuje samotný algoritmus k-nejbližších sousedů. Za volitelný parametr `k` jsem zvolil hodnotu 3 a za výstup samotnou predikci euklidovské vzdálenosti. Po doběhnutí algoritmu bude mít každá hvězda uloženou průměrnou vzdálenost ke svým sousedům, která poslouží jako „ohodnocení vhodnosti“. V posledním kroku jsou výsledky seřazeny vzestupně, z nichž si prvních 10 vyberu jako hlavní doporučení a dalších 90 jako rozšířené doporučení. Toto rozdělení jsem zvolil na základě faktu, že na výstupu jsou hvězdy jedné skupiny řazeny podle abecedy, ne podle skóre. Rozdíly mezi jednotlivými skóre bývají

tak malé, že jsem dal přednost přehlednosti před absolutní korektností. V aplikaci může dojít k situaci, kdy je v hlavním doporučení první 10. hvězda podle skóre a v rozšířeném je první hvězdou 100. podle skóre. Srovnání trénovacích dat, pěti nejlepších a několika dalších testovacích dat se nachází v příloze A, případně v souboru k-n.csv ve složce bak.

První implementace v jazyce PHP provedla výběr doporučení na 1000 trénovacích datech, 3000 testovacích a ve trojrozměrném prostoru za 86 sekund. Systém výběru trvající řádově desítky sekund je v praktickém případě nepoužitelný. Proto jsem tuto část přepsal do jazyka C a přidal optimalizaci k-d stromy. Provedení na stejných testovacích datech trvá průměrně 0,02 sekund. Doporučovací systém tedy není přímou součástí PHP skriptu, ale je jím spouštěn jako externí program vracející řetězec výsledků pro import zpět do PHP.

3.4 Neuronové sítě

Neuronové sítě jsou výpočetním modelem inspirovaný biologickými neurony, jde tedy o jakousi simulaci živočišného nervového systému. Základem jsou navzájem propojené neurony, které se společně snaží dojít k výslednému řešení. Systém využívá, podobně jako nervová soustava u živočichů, možnosti nelinearity, adaptace a paralelizace skrz vzájemnou komunikaci[22]. I dnes však přesná definice neuronové sítě neexistuje, neboť je mozek stále plný nevyřešených záhad. Proto se dnešní neuronové sítě od původní biologické definice odlišují a staly se čistě záležitostí statistického modelování. Velkou nevýhodou této formy strojového učení je její náročnost na výpočetní čas, protože je závislá na velikosti konvergence testovacích dat k trénovacím a může vyžadovat mnoho iterací než se dostane k žádanému limitu.

Neuronová síť se dá představit jako orientovaný graf skládající se z vrstvy neuronů na vstupu a výstupu, mezi něž se vkládá podle potřeby určitý počet vrstev, také nazývaných skryté vrstvy. Až do 80. let 20. století se vkládala skrytá vrstva pouze jedna. Tento systém se rychle ukázal pro některé složitější funkce jakou je např. XOR nedostatečný. Je jednoduché naučit síť konvergovat k 0 pro vstup 0,0 a k 1 pro vstup 0,1 a 1,0, ale s těmito pravidly jednovrstvá síť k 0 ze vstupu 1,1 nikdy nekonverguje[11]. Po postupném opouštění modelu neuronových sítí byl představen vícevrstvý model, který má plnou sílu univerzálního turingova stroje. Důkaz byl předveden v práci Hava Siegelmana a Eduardo D.

Sontaga[23].

Ke stavbě doporučovacího systému jsem se snažil využít vícevrstvou neuronovou síť pomocí knihovny Encog (k dispozici na adrese <http://www.heatonresearch.com/encog>) pro modelování neuronových sítí. Myšlenkou algoritmu bylo rychlejší přiblížení blízkých bodů pod určitou limitní mez v důsledku konvergence, což je základní vlastnost neuronových sítí. Hodnoty byly po načtení převedeny stejně jako u algoritmu k-nejbližších sousedů převedeny do intervalu $\langle -1, 1 \rangle$. Po naprogramování se ale ukázalo, že nejvyšší stupeň konvergence (více než 0,9985) k trénovacím datům vykazovaly nejdřívejší body testovaných dat. Možnost použití neuronové sítě v tomto projektu jsem tedy nakonec zavrhl. Zdrojový kód v jazyce C# je k dispozici ve složce test, výsledky testování v přílozeB nebo v souboru neural.csv ve složce bak.

3.5 Shlukování

Shlukování nebo-li clustering je typem strojového učení bez učitele za účelem klasifikace objektů rozbitím do určitých skupin na základě společných vlastností. Používá se i v doporučovacích systémech. Jako příklad může sloužit zařazení zákazníka do skupiny zákazníků nakupujících podobné zboží.

Po několika testech, které jsem provedl v systému Weka, se ale ukázalo, že jde o přístup vhodný spíš pro kolaborativní filtrování, protože shluky jsou předem definované. Původní myšlenka spočívala ve vytvoření shluku z trénovacích dat a následném získávání pravděpodobností, zda testovací objekt náleží do množiny.

Shlukovací algoritmy EM a Hierarchical clusterer se ukázaly jako nepoužitelné, protože první z nich vytvoří z 3000 objektů model za přibližně 3200 sekund, druhý havaruje na začátku provádění. Algoritmy FarthestFirst, FilteredCluster, MakeDensityBasedCluster a SimpleKMeans data rozdělí i po diskretizaci hodnot bez učitele na pouhé dvě množiny v poměru 80:20. Jako jediný vhodný algoritmus se ukázal Cobweb, který rozdělil testovací data na 204 shluků a učinil je tak potenciálně použitelnými např. pro nalezení shluků blízkých shluku trénovacích dat. Jeho běh ale trval 4 – 6 sekund, což by jeho reálné použití poněkud ztížilo. Nakonec implementovaný algoritmus k-nejbližších sousedů běžel na testovacích datech 0,02 sekund. Po těchto neúspěších jsem řešení doporučovacího systému pomocí shlukování zavrhl.

4 Komponenty pozorovacího kalendáře

V této části je popsáno s čím se lze v aplikaci při jejím používání setkat na výstupu z prohlížeče. Každá kapitola kromě první popisuje jednu stranu, ke které se dá přistoupit z horního menu webové aplikace. V první kapitole je popsáno nastavení místa a času, které je součástí každé další komponenty.

4.1 Místo a čas

Pro pozorovací výpočty je potřeba nejdříve nastavit některé údaje týkající se místa a času. Je rozdíl nejen mezi pozorovateli stojící u nás a na Novém Zélandu, ale i mezi dvěma, kteří stojí na západě Česka a východě Slovenska.

- 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 $47^\circ 44'$ v okolí obce Patince[7] po $51^\circ 03'$ v Lobendavě[29].
- 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. Později jsem to už nepřehazoval, abych snížil možnost chyby. U nás se zeměpisná délka pohybuje v rozmezí $12^\circ 06'$ východní délky v Krásné[29] a $22^\circ 34'$ východní délky v Nové Sedlici[7], což podle aplikace dává časový rozdíl asi 42 minut.
- Časové pásmo – u nás, včetně sousedního Slovenska, 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, 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 příčinu odhalil v posunutí časovým pásmem.

- Letní čas – pokud je zapnut letní čas, s GMT se nakládá jako by se rovnal +2. V případě, že není nalezena uložená hodnota v Cookies, 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.

4.2 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. Ještě lze rozeznávat objekty a je možno provádět běžnou denní činnost bez nutnosti umělého osvětlení. Nautický soumrak končí, když je kotouč 12° pod obzorem. V té době už není mořský horizont 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. Odtud pochází i název tohoto časového úseku. Po skončení astronomického soumraku, kdy je kotouč více než 18° pod obzorem, rozptýlené sluneční světlo již vůbec neruší pozorování. [1][2]

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 v daný vůbec nevyjde nebo naopak nezapadne. Tyto situace jsou označeny jako NR (never rises) a NS (never sets). Několik dalších webových stránek práce zobrazuje barvy v závislosti na platnosti dvou

hraničních bodů — oficiálního západu (východu) a astronomického soumraku (úsvitu).

4.3 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 uveden pouze pro jeden den kvůli zjednodušení.

Pozadí řádku v tabulce je obarveno podle možnosti pozorování. Pokud nám naše zeměpisná šířka pozorování vůbec neumožňuje, protože hvězda 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 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 prostřednictvím Měsíce i za astronomické noci. Proto aplikace vypočítává aktuální fázi Měsíce, kterou zobrazuje nad tabulkou jako png obrázek.

4.4 Bright Star Catalogue

Všechny hvězdy vizuální magnitudy (hvězdné velikosti) 6,5 a jasnější jsou zaevídovány v Bright Star Catalogue, také známém i jako Yale Catalogue of Bright Stars. Objekty zhruba do 6. 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 z nich jsou hvězdy, 10 z nich jsou 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.

4.5 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[15]. 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.

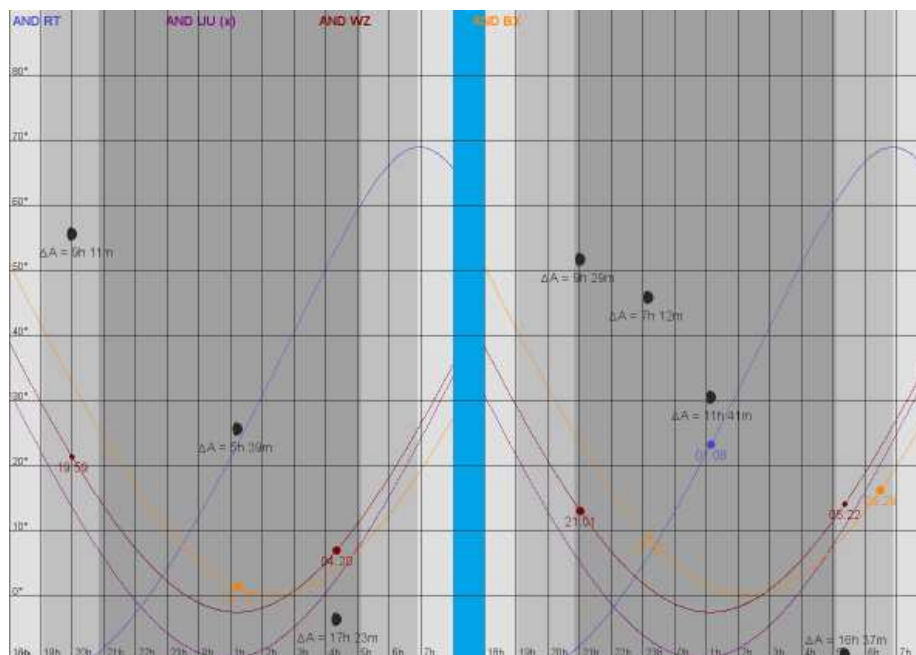
Katalog proměnných hvězd v této aplikaci vznikl z katalogu na URL adrese <http://www.as.up.krakow.pl/ephem/> a doplněním údaji z GCVS katalogu[18], jako jsou rektascenze, deklinace nebo vlastní pohyby hvězd. Cílem této části aplikace je zobrazovat minima proměnných hvězd s přihlédnutím k pozorovacím 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 $f = \text{frac}(\frac{JD-m_0}{P})$, kde P značí periodu a frac 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 dny. Na mapě se zobrazí průběh výšky požadovaného objektu v čase. Primární minima se vyznačí kotoučky o průměru 10 pixelů, sekundární 6 pixelů. 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.



4.6 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 je prováděn 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.

4.7 Nastavení

Zde se nastavují parametry místa, případně času globálně pro celou aplikaci, které byly popsány už výše v sekci Místo a čas. 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.

5 Aplikační výpočty

5.1 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 počítání nového dne začíná v poledne. 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[3].

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

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

5.2 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 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 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: $LST = \theta_0 + \theta_1 \cdot \Delta JD + 0,000387933 \cdot T^2 - \frac{T^3}{38710000} - l$, kde ΔJD je počet dní od 1. ledna 2000 a T počet století. Pro Zemi platí, že $\theta_0 = 280,46061837$ a $\theta_1 = 360,98564736629$ [9].

5.3 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 $\langle 0^\circ, 360^\circ \rangle$ a výška výšku nad obzorem $\langle -90^\circ, 90^\circ \rangle$ [21]. 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 $A = \text{atan2}(\sin H, \cos H \cdot \sin \phi - \tan \delta \cdot \phi)$ 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.

5.4 Sklon osy

Úhel, který spolu svírají rovina oběhu a osa otáčení rotujícího objektu, se nazývá sklon osy. U Země dnes činí přibližně $23,44^\circ$, ale v průběhu času se mění a to v rozmezí od $22,1^\circ$ do $24,5^\circ$ s periodou 41000 let. Nižší sklon osy v minulosti byl například hlavním spouštěčem dob ledových, protože v polárních krajinách, kde ledové doby začínají, jsou roční období pak ještě kontrastnější a led získává na mocnosti [4].

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 [16]. 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.

5.5 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 po-

zorování 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 $\cos \omega_0 = -\tan \phi \cdot \tan \delta$ [24], 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 $0,6^\circ$. Proto je ve většině zemí ustanoven oficiální východ a západ jako hodnota $90,833^\circ$ od zenitu [20]. Pokud se rozloží tg jako podíl $\frac{\sin}{\cos}$, půjde cos z do čitatele. Pokud je ω menší než -1, Slunce na daném místě nezapadá, pokud je ω větší než 1, nevychází.

Jak už bylo řečeno dříve, existuje vícero druhů soumraků a úsvitů, pro oficiální se použije zenitová vzdálenost $z = 90,833^\circ$, $z = 96^\circ$ 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 potřeba nejdříve spočítat několik dalších veličin. Aproximace slunečního poledne se spočítá vzorcem $J' = 2451545,009 + \frac{l_w}{360^\circ} + n$, kde n značí juliánský cyklus od J2000,0 a l_w zeměpisnou délku s pozitivní hodnotou zeměpisného západu. $n = \lfloor JD - 2451545,009 - \frac{l_w}{360^\circ} + \frac{1}{2} \rfloor$. Dále pak střední odchylka Slunce $M = [357,5291 + 0,98560028 \cdot (J' - 2451545)] \bmod 360$. Rovnice centra $C = 1,9148 \sin(M) + 0,02 \sin(2M) + 0,0003 \sin(3M)$. 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 $23,45^\circ$, 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 $J_{set} = 2451545,009 + \frac{\omega_0 + l_w}{360^\circ} + n + 0,0053 \cdot \sin(M) - 0,0069 \sin(2\lambda)$, východ bude od poledníku stejně vzdálen jako západ, lze ho tedy už jednoduše dopočítat [24].

5.6 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 je tomu u Slunce, proto není třeba složitě vypočítávat neustále se měnící deklinaci objektu. Hodinový úhel lze vypočítat ze vzorce $\cos\omega_0 = \frac{\cos z - \tan\phi \cdot \tan\delta}{\cos\phi \cdot \cos\delta}$, kde by ω_0 mělo nabývat hodnot v intervalu $\langle -1, 1 \rangle$ pokud má zapadat, respektive vycházet. I průchod se počítá jednodušším způsobem než ten sluneční podle vzorce $J_{transit} = \Delta JD + \frac{H}{24}$. V aplikaci se dále přidává nebo ubírá den podle toho, jak je potřeba sloučit buňky tabulky ve výpisu BSC katalogu. Čas východu a západu se spočítá $J_{rise} = J_{transit} - LHA$ a $J_{set} = J_{transit} + LHA$, kde $LHA = \frac{\cos^{-1}\omega_0}{24 \cdot 15,04107}$.

5.7 Fáze Měsíce

Jak Měsíc obíhá kolem Země, vzhledem k tomu, že ho vidíme díky odraženému světlu slunečnímu, se jeho vzhled periodicky proměňuje. Pokud je zrovna nov, Měsíc je mezi Zemí a Sluncem, jeho plně osvětlená polovina je ta odvrácená. V případě úplňku je na přímce Slunce – Země – Měsíc plně osvětlená strana přivrácená. Speciálním případem na této přímce je zatmění, kdy se Měsíc dostane do stínu vrhaného Zemí, ale ty tato práce neřeší. Tento jev sice nastává alespoň dvakrát do roka, nicméně úplných zatmění je méně a jsou už předem nějakou dobu očekávané.

V aplikaci se využívají vzorce Z. Pokorného[19], uložené ve třídě Objects pro planetárních výpočty. Podle autora by měly aplikovat i librační a nutační pohyby Měsíce ve výsledku s přesností na dvě minuty. Výstupem je číslo v intervalu $\langle 0, 1 \rangle$, které se v mapce minim proměnných hvězd vykresluje jako vyplněné černé kotoučky nebo jako maska průhlednosti v černé vrstvě přes fotografii Měsíce v úplňku dávající tak dojem fáze.

6 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. Tato část je koncipována jako doplňková a lze ji tedy s klidným svědomím přeskočit. Hlavním cílem je poukázat na problematiku přesného pozorování na Zemi, jakožto nesnadnou záležitost.

6.1 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 nejrozličnější 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[26].

V aplikaci se pro získání precese nejdříve spočítají precesní úhly podle vzorců $\zeta = \frac{2306,2181 \cdot t + 0,30188 \cdot t^2 + 0,017998 \cdot t^3}{3600}$, $\eta = \frac{2306,2181 \cdot t + 1,09468 \cdot t^2 + 0,018203 \cdot t^3}{3600}$ a $\theta = \frac{2004,3109 \cdot t + 0,42665 \cdot t^2 + 0,041833 \cdot t^3}{3600}$, kde t 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: $a = \cos\delta \cdot \sin(\alpha + \zeta)$, $b = \cos\theta \cdot \cos\delta \cdot \cos(\alpha + \zeta) - \sin\theta \cdot \sin\delta$ a $c = \sin\theta \cdot \cos\delta \cdot (\alpha + \zeta) + \cos\theta \cdot \sin\delta$. 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 $\alpha' = \eta + \text{atan2}(a, b)$ a $\delta' = \sin^{-1}c$ [10].

6.2 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[5].

V programu jsem na výpočet nutace opět převzal vzorce Jaye Tannera, které sepsal v roce 2012[25]. 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 $0,0046^\circ$ ve sklonu a $-0,000764^\circ$ v délce.

6.3 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 došlo k případu, kdy se hvězda přesunula z jednoho souhvězdí do druhého.

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 $\mu = \mu_\delta$ [17]. 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 . Avšak Bright Star Catalogue vzdálenost 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 `pmra` a `pmde` v tabulce `bsc` pro Brightest Star Catalogue a sloupce `mv1` a `mv2` v tabulce `ephem` pro proměnné hvězdy. V náležitých 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[18], který poskytl údaje o poloze a vlastním pohybu hvězd.

6.4 Aberace

Aberace je jev vznikající díky konečnosti rychlosti světla. Následkem se hvězdy mohou posunout ve zdánlivé poloze až o $20''$. Aberaci si lze představit jako déšť za oknem vlaku, který padá svisle, pokud venku nefouká žádný vítr. Jak se vlak rozjíždí, kapky se začínají mírně naklánět. Cestující v TGV vidí kapky padat již 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 $\Delta\alpha = \frac{(-20,496''(\cos\alpha \cdot \cos\lambda_s \cdot \cos\epsilon + \sin\alpha \cdot \sin\lambda_s))}{\cos\delta}$ a $\Delta\delta = -20,496''(\cos\lambda_s \cdot \cos\epsilon(\tan\epsilon \cdot \cos\delta - \sin\alpha \cdot \sin\delta) + \cos\alpha \cdot \sin\delta \cdot \sin\lambda_s)$ [19], 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 $\Delta\alpha = \frac{k \cdot o \cdot \cos\phi \cdot \cos t}{\cos\delta}$ a rozdíl deklinace $\Delta\delta = k \cdot o \cdot \sin\phi \cdot \sin\delta \cdot \sin t$, kde k je konstanta denní aberace $k = 0,3198''$, o je vzdálenost od středu Země, ϕ značí zeměpisnou šířku a t hodinový úhel objektu[28].

6.5 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[27]. Protože se poloha mění vzhledem k aktuální výšce, vzhledem ke složitosti výpočtů jsem astronomickou refrakci ve svých výpočtech vynechal.

7 Slovník pojmů

V této kapitole jsou popsány pojmy, pomáhající v orientaci popsánymi problémy, které nedostaly prostor na vlastní sekci.

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 směřující 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[21].

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[21].

Ekvinokcium Epoque, 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 korekcích6.

J2000 Současně používané ekvinokcium, v němž je uložena naprostá většina záznamů v aplikaci. Jako standard vydrží až do roku 2025.

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].

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[15].

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

OpenGL Standard pro tvorbu grafických, nejčastěji trojrozměrných aplikací.

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

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[21].

Soumrak

- Astronomický soumrak – Období, kdy se Slunce nachází mezi 12° a 18° stupni pod obzorem. Postupně se objevují objekty od 1. až po 6. magnitudu.
- 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.
- 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[21].

Souřadnice

- Ekliptikální – Sférický souřadnicový systém, u něhož je základní rovinou rovina ekliptiky. Počátkem souřadnic je jarní bod.
- Pravoúhlé – Souřadnicový systém se sestává z os X, Y, Z, které jsou na sebe navzájem kolmé.
- Rovníkové – Sférický souřadnicový systém, u něhož je základní rovinou nebeský rovník[21].

8 Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit funkční systém napomáhající ve výběru pozorovaných objektů pro daný den a dané místo, pokud možno s jednoduchým přístupem z internetu. Výsledkem je webová aplikace běžící na fakultním serveru¹, která byla od listopadu postupně budována až do finální podoby, jak ji popisuje kapitola 4. Později byl přidán doporučovací systém, který se snaží nabídnout pozorování podle hvězd zvolených už v minulosti. Přínos tohoto kroku se ukáže až časem, až se podaří sesbírat větší množství dat.

Aplikaci by se dalo rozšířit o větší databáze objektů, proměnných hvězd je zhruba 3000, hvězd obecně kolem 10000. Nalezením detailnějšího katalogu by se objekty daly rozšířit o takové vlastnosti jako je vzdálenost nebo chemické složení, které by kromě možnosti jejich čtení uživatelem poskytly zpřesnění strojového učení pro doporučovací katalog.

Z projektu jsem si odnesl cenné zkušenosti z oblasti astronomie a strojového učení, kde jsem se poprvé pokusil sám implementovat jejich algoritmy. Do té doby se všechny pokusy soustřeďovaly okolo nástroje Weka a programu Stellarium. Spojení astronomie a informatiky bych se rád věnoval i nadále, protože věřím, že zvláště metody dolování dat v tomto sektoru přinesou v blízké budoucnosti mnohá zajímavá překvapení, kterých bych se rád zúčastnil.

¹<http://www.fi.muni.cz/~xvonsovs/astro/>

A Test k-nejbližších sousedů

Následuje tabulka trénovacích dat, 5 nejlepších testovacích dat, která vyšla z externí aplikace a několik náhodně vybraných. Podle hodnot vzdáleností jde vidět, že výstup „sedí“ a nevrací odlehlé body.

Rektascenze	Perioda	Fáze Měsíce	Fáze hvězdy	Výška	Vzdálenost
23,47941	0,4892247	-0,928680	0,308090	-16,316646	
1,96279	1,0105195	-0,928680	0,894564	-29,496192	
23,66443	1,6324979	-0,928680	0,886103	3,991221	
1,39481	0,8996676	-0,928680	0,867343	-28,812031	
0,50163	0,14635278	-0,928680	0,274121	-39,222520	
1,96605	0,412172	-0,928680	0,785517	-22,118504	
13,79079	0,33313921	-1,000000	0,117610	48,709355	
13,80286	0,34487642	-0,720773	0,975486	41,722882	
14,24764	0,6595091	-0,581160	0,582094	26,444150	
12,98412	0,3618827	-0,928680	0,284000	52,640268	
16,11408	0,58887564	-0,928640	0,023850	55,748296	
8,45109	0,3278277	-0,928680	0,766213	29,197299	
9,99536	0,4695566	-0,928680	0,533362	38,762508	
11,07217	0,4061333	-0,928680	0,188997	46,398691	
9,7293	0,33363499	-0,934660	0,373121	45,152407	
13,67931	2,16669	-0,934660	0,098985	53,330866	
10,75569	3,063274	-0,934660	0,014954	47,040923	
19,81586	0,77423	-0,928640	0,962983	20,641692	
19,92627	0,3573251	-0,928640	0,696095	-19,637361	
19,57722	0,3707657	-0,928640	0,323515	-20,208493	
15,01621	2,327336	0,400000	0,775390	29,078934	1,226670
12,4795	0,2692084	0,400000	0,646255	37,198092	1,235316
13,33772	0,4079758	0,400000	0,502599	42,031863	1,237575
14,75563	0,3469782	0,400000	0,511730	29,754892	1,246957
12,82752	0,4128221	0,400000	0,657717	38,192511	1,251663
19,09273	11,25802	0,400000	0,327207	58,943108	1,732149
6,67826	7,021212	0,400000	0,955524	-32,551172	2,610547
18,33829	0,6014615	0,400000	0,377025	36,887683	2,534998
19,81003	0,3936716	0,400000	0,645409	-36,664618	2,680795

B Test neuronové sítě

Následuje tabulka trénovacích dat a 5 testovacích dat s nejvyšší hodnotou konvergence a 5 testovacích dat s hodnotou nejnižší. Hodnoty parametrů jsou pro lepší čtení před předzpracováním. Z nich lze vyčíst, že algoritmus vrací poměrně dost odlehlé body na jedné straně a nesmyslná data, v katalogu často následující po sobě na straně druhé. To algoritmus činí pro doporučování nepoužitelným. Test je prováděn na starých parametrech, na nichž jsem algoritmy strojového učení teprve zkoušel.

Rektascenze	Deklinace	Perioda	Míra konvergence
23,47941	50,57478	0,4892247	
1,96279	38,07456	1,0105195	
23,66443	47,75061	1,6324979	
1,39481	36,48253	0,8996676	
0,50163	26,29081	0,14635278	
1,96605	37,80625	0,412172	
8,45109	3,51453	0,3278277	
9,99536	-19,13225	0,4695566	
11,07217	-33,44631	0,4061333	
9,7293	55,95253	0,33363499	
13,67931	59,43322	2,16669	
10,75569	45,56633	3,063274	
19,81586	26,38969	0,77423	
19,92627	27,70569	0,3573251	
19,57722	20,62064	0,3707657	
5,0413	41,07583	972,13	0,9986651554
12,19977	-58,78353	198,55	0,9985518191
23,95598	-64,24322	0,37711015	0,9985313588
21,51258	-79,06569	3,708965	0,9985171549
23,32843	-55,61153	2,123604	0,9985150343
0,39429	78,78211	1,833627	0,9973981842
0,48836	82,16917	0,4812314	0,9973758652
0,84733	85,27025	0,34244754	0,9973703048
0,84104	85,25253	0,28573657	0,9973700334
0,79276	85,27356	0,306907	0,9973675839

Literatura

- [1] Hvězdárna a planetárium České Budějovice s pobočkou na Kleti. Kar - vysvetlivky. [online], 2011, [citováno 30. 03. 2012]. <http://www.hvezdarnacb.cz/cgi-bin/kar.cgi?legend=2>.
- [2] Irv Bromberg. The duration of twilight. [online], 04. 04. 2011, [citováno 30. 03. 2012]. <http://individual.utoronto.ca/kalendis/twilight/>.
- [3] Wikipedia contributors. Julian day. [online], 14. 03. 2012, [citováno 30. 03. 2012]. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Julian_day&oldid=481832618.
- [4] Wikipedia contributors. Axial tilt. [online], 26. 03. 2012, [citováno 30. 03. 2012]. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Axial_tilt&oldid=484034767.
- [5] Richard Fitzpatrick. Precession and forced nutation of the earth. [online], 31. 03. 2011, [citováno 07. 05. 2012]. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/336k/newton/node113.html>.
- [6] Aldebaran Group for Astrophysics. Hvězdy: základní vlastnosti. [online]. http://www.aldebaran.cz/astrofyzika/hvezdy/stars_1.html.
- [7] Katedra geografie Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci. Regionální geografie slovenska - elektronická učebnice. [online], 2008, [citováno 30. 03. 2012]. <http://geography.upol.cz/soubory/lide/smolova/RGSR/ucebnice/portrety/poloha.html>.
- [8] Machine Learning Group. Weka 3: Data mining software in java. [online], 2012, [citováno 17. 05. 2012]. <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>.
- [9] Jason Harris. Sidereal time. [online], 10. 08. 2011, [citováno 30. 03. 2012]. <http://docs.kde.org/development/en/kdeedu/kstars/ai-sidereal.html>.
- [10] Jiří Jozif. celestialsphere. [počítačový soubor], Ver. 6.2.2010, 2010, [citováno 30. 03. 2012]. <http://www.beda.cz/~jirkaj/celestialSphere/index.php>.
- [11] Kiyoshi Kawaguchi. Linear separability and the xor problem. [online], Jun.

- [12] KDnuggets. Data mining tools used poll. [online], 2009, [citováno 17. 05. 2012]. <http://www.kdnuggets.com/polls/2009/data-mining-tools-used.htm>.
- [13] KDnuggets. Data mining / analytic tools used poll. [online], 2010, [citováno 17. 05. 2012]. <http://www.kdnuggets.com/polls/2010/data-mining-analytics-tools.html>.
- [14] Jerzy M. Kreiner. Up-to-date linear elements of close binaries. *Acta Astronomica*, 54:207–210, 2004.
- [15] Zdeněk Mikulášek; Jiří Krtička. Základy fyziky hvězd. [online], 2005, [citováno 07. 05. 2012]. <http://astro.physics.muni.cz/download/documents/skripta/F3080.pdf>.
- [16] Jacques Laskar. New formulas for the precession, valid over 10000 years. *Astronomy and Astrophysics*, 157:68, 1986.
- [17] Steven R. Majewski. Stellar motions. [online], 2006, [citováno 30. 03. 2012]. <http://www.astro.virginia.edu/class/majewski/astr551/lectures/VELOCITIES/velocities.html>.
- [18] Samus N.N., Durlevich O.V., Kazarovets E V., Kireeva N.N., Pastukhova E.N., and Zharova A.V. et al. General catalog of variable stars. [online], Jan 2012, [citováno 09. 05. 2012]. <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?cat=B%2Fgcvs&>.
- [19] Zdeněk Pokorný. *Astronomické algoritmy pro kalkulátory*. Praha: Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy, 1988.
- [20] Paul Schlyter. How to compute rise/set times and altitude above horizon. [online], 2012, [citováno 30. 03. 2012]. <http://www.stjarnhimlen.se/comp/riset.html>.
- [21] James Schombert. Earth coordinate system. [online], 2001, [citováno 30. 03. 2012]. <http://abyss.uoregon.edu/~js/ast121/lectures/lec03.html>.
- [22] Christos Stergiou; Dimitrios Siganos. Neural networks. [online], 1996, [citováno 16. 05. 2012]. http://www.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise_96/journal/vol4/cs11/report.html.

- [23] Hava T. Siegelmann; Eduardo D. Sontag. Turing computability with neural nets. *Appl. Math. Lett*, 4:77–80, 1991, [citováno 16. 05. 2012].
- [24] Louis Strous. Astronomieantwoorden: Zonnepositie. [online], 13. 01. 2012, [citováno 30. 03. 2012]. <http://aa.quae.nl/nl/reken/zonpositie.html>.
- [25] Jay Tanner. Php science labs - obliquity of the ecliptic and nutation in obliquity. [online], 2011, [citováno 30. 03. 2012]. http://www.neoprogrammics.com/obliquity_of_the_ecliptic/.
- [26] Vladimír Vanýsek. *Základy astronomie a astrofyziky*. Praha : Academia, 1980.
- [27] Fiona Vincent. Positional astronomy: Refraction. [online], listopad 2003, [citováno 30. 03. 2012]. <http://star-www.st-and.ac.uk/~fv/webnotes/chapt11.htm>.
- [28] John Walker. C-ship: The aberration of light. [online], 2012, [citováno 30. 03. 2012]. <http://www.fourmilab.ch/cship/aberration.html>.
- [29] Zeměpis.com. Geografická poloha ČR. [online], 2002 - 2012, [citováno 30. 03. 2012]. <http://www.zemepis.com/gpcr.php>.