

MASARYKOVA UNIVERZITA V BRNĚ
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

Bakalářská práce

Následná astrometrie blízkozemních planetek a její vliv
na přesnost určení dráhových elementů a efemerid

Vypracovala: Michaela Honková
Vedoucí: Ing. Jana Tichá
Konzultant: doc. RNDr. Zdeněk Mikulášek, CSc.

Brno 2006

Tímto prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a použila jen prameny uvedené v seznamu literatury. Souhlasím, aby práce byla uložena na Masarykově univerzitě v Brně v knihovně Pedagogické fakulty a zpřístupněna ke studijním účelům.

Brno, květen 2006

Michaela Honková

Ráda bych tímto poděkovala vedoucí práce Ing. Janě Tiché za věcné připomínky a umožnění návštěvy hvězdárny na Kleti a panu Miloši Tichému z observatoře na Kleti za cenné rady a konstruktivní poznámky, umožňující vypilovat tuto práci, jakož i za vstřícný přístup a konzultace.

Michaela Honková

Obsah

Úvod	7
1 Teorie	9
1.1 Parametry dráhy	9
1.2 Planetky	10
1.2.1 První planetky	10
1.2.2 Značení planetek	12
1.2.3 AAA planetky	13
1.2.4 Turínská stupnice	14
1.3 Úloha následné astrometrie	14
1.4 MPC formát zápisu efemerid	15
1.5 Metoda Väisälä	16
1.6 Převod geocentrických souřadnic na topocentrické	18
1.6.1 Výpočet LST	18
2 Vypracování	19
2.1 První noc	19
2.2 Druhá noc	21
2.3 Třetí noc	24
2.4 Identifikace	26
3 Aplikace	29
3.1 Zpracování snímků	29
3.2 První noc	29
3.3 Druhá noc	30
3.4 Třetí noc	30
3.5 Identifikace	32
4 Závěr	33
Literatura	33
Seznam příloh	37

Úvod

Tato práce se zabývá následnou astrometrií blízkozemních planetek, analyzuje vliv nových astrometrických měření na kvalitu určení dráhových elementů a přesnost efemerid planetek. Samotná práce je rozdělena do tří hlavních celků.

První kapitola je věnována teoretickým základům, na nichž práce stojí. Vysvětluje použité pojmy a postupy, počínaje parametry drah, pokračuje přes historické objevy prvních planetek a zabývá se jejich značením v minulosti i dnes, načež se zaměřuje na popis blízkozemních planetek a stupnici jejich nebezpečnosti pro Zemi. Následuje zdůvodnění důležitosti jejich pozorování, z něhož některé aspekty jsou nepřímo nastíněny na předcházejících stranách, a způsob, jakým se pozorování zapisují. Nakonec přichází popis použité metody výpočtu drah planetek a způsob korekce výpočtu na topocentrickou polohu.

Následující část simuluje skutečné pozorování. V průběhu zpracovávání dat dochází k zpřesňování metody na základě nově vyvozených fakt. Cílem je dobrat se k metodě vhodné k získání použitelných efemerid, analyzovat vliv dalších měření na přesnost efemerid a určení dráhy.

Třetí kapitola aplikuje postupy vyvinuté v předchozí části práce na polohy získané přímo ze snímků tělesa. Cílem je stanovení předpovědí, umožňující těleso znovu nalézt, a získat data potřebná pro výpočet elementů drah. Těleso bude také identifikováno a spočtené parametry dráhy budou porovnány s databází.

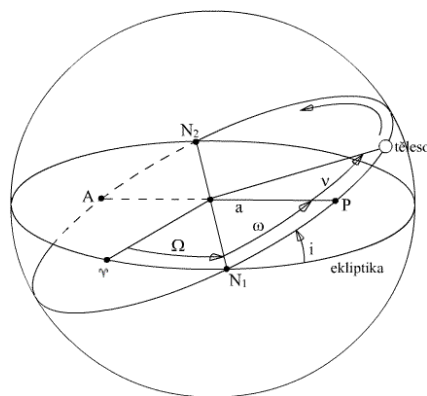
Kapitola 1

Teorie

1.1 Parametry dráhy

Abychom mohli matematicky popsat dráhu tělesa, potřebujeme šest údajů, takzvaných *elementů dráhy*. Dva z nich určují velikost a tvar dráhy tělesa. Prvním je *hlavní poloosa* (a) – střední vzdálenost tělesa od Slunce. Vzdálenost ohniska od středu dráhy dává *lineární excentricitu* (ϵ), jejímž poměrem s hlavní poloosou dráhy získáme druhý element, bezrozměrnou *numerickou excentricitu* (e). Pro kružnici je rovna nule, hodnota pro elipsu se nachází v intervalu mezi nulou a jedničkou.

Další dva elementy dráhy určují orientaci dráhy v prostoru vzhledem k dráze Země vůči Slunci, vyznačující *rovinu ekliptiky*. Dráha objektu protíná rovinu ekliptiky ve dvou bodech (pokud není rovina dráhy s rovinou ekliptiky shodná či rovnoběžná), nazývaných *uzly* (N_1 , N_2) a spojených *uzlovou přímkou*; *výstupný uzel* (N_1), kde těleso stoupá nad rovinu ekliptiky, a *sestupný uzel* na opačné straně. Rovinu ekliptiky protíná také *nebeská sféra*, tedy myšlená koule, na kterou se promítají tělesa pro pozemského pozorovatele, stojícího ve středu oné koule; tento průsečík pak vyznačuje *ekliptiku*. Úhel mezi výstupným uzlem a jarním bodem, ležícím na ekliptice, a měřen v matematicky kladném směru, nazývá *délka výstupného uzlu* (Ω).



Obrázek 1.1: Elementy dráhy

Dalším dráhovým elementem je *sklon dráhy* (i), zvaný také inklinace. Je to úhel měřený od roviny ekliptiky k rovině dráhy tělesa.

Následuje dráhový element orientující dráhu v její rovině pomocí *přímky apsid*, spojnice perihelia a afelia. Úhel mezi uzlovou přímkou a přímkou apsid je nazýván *argument šířky perihelia* (ω) a je elementem, určujícím pozici perihelia v rovině dráhy.

Poslední element dráhy definuje polohu tělesa na dráze v čase, konkrétně *moment průchodu periheliem* (T). V praxi se, zvláště u planetek, používá *anomálie*. *Pravá anomálie* (ν) reprezentuje úhlovou vzdálenost tělesa od perihelia v daném čase. Pokud by těleso rovnoměrně opisovalo kolem Slunce kružnici o poloměru dráhy rovném velké poloose dráhy tělesa, přičemž by obě tělesa zároveň procházela periheliem, pak je *střední anomálií* (M) úhel, který svírá přímka apsid se spojnicí Slunce a rovnoměrně obíhajícího tělesa. Vztah mezi pravou a střední anomálií je následující:

$$\nu = M + \frac{360}{\pi} e \sin M \quad (1.1)$$

Střední anomálie je určována pro daný čas, vyjádřený *epochou*. Epochu se často zapisuje v *Juliánském datu* (JD), což je počet dní uplynulých od poledne světového času 1. ledna 4713 před Kristem.

Je možné se setkat s alternativními elementy drah, jako jsou *doba oběhu* T a *střední denní pohyb* n . Oba lze snadno odvodit z předešlých dráhových elementů.

1.2 Planetky

1.2.1 První planetky

Roku 1772 uveřejnil profesor Titius zajímavou myšlenku, později označovanou Titius–Bodeova řada, nebo jednodušeji Bodeova řada. Napíšete-li si jména planet, pod každé jméno vepíšete číslici 4 a do dalšího řádku pod Merkur ještě 0, pod Venuši 3, Zemi 6, a u ostatních planet pokračujete dvojnásobky předchozích čísel, a nakonec čísla pod sebou sečtete, přičemž posunete desetinnou čárku o jedno desetinné místo doprava, získáte přibližně vzdálenosti planet od Slunce v AU. Matematicky zapsal tuto závislost jako $a = \frac{n+4}{10}$, kde $n = 0, 3, 6, 12, 24, 48$. V pozdější době se objevily jiné způsoby zápisu Titius-Bodeova zákona, například $r = (0,4 + 0,3 \times 2^N)$, kde $N = -\infty, 0, 1, 2 \dots$, jde však o stejnou posloupnost. Z posledních dvou řádků tabulky 1.1 můžeme srovnat hodnoty určené Titius-Bodeovým zákonem se skutečnými vzdálenostmi planet od Slunce.

Merkur	Venuše	Země	Mars	???	Jupiter	Saturn	(Uran ¹)
4	4	4	4	4	4	4	4
0	3	6	12	24	48	96	192
0,4	0,7	1,0	1,6	2,8	5,2	10,0	19,6 AU
0,4	0,7	1,0	1,5	2,8	5,2	9,6	19,3 AU

Tabulka 1.1: Titius–Bodeova řada

¹Planeta Uran nebyla v době publikování Titiovy práce známa.

Jakkoliv taková zvláštní posloupnost zněla ze začátku fantasticky, po objevu planety Uran roku 1781 tehdejší hvězdáři konstatovali, že platí i pro tuto novou planetu², a pustili se do hledání stále unikající planety mezi Marsem a Jupiterem. Za tímto účelem zformovali pravděpodobně první mezinárodní pozorovací akci - rozělili si oblohu na úseky, ve kterých planetu hledali.

Jedním z hvězdářů, účastnících se tohoto projektu, byl i Giuseppe Piazzi, ředitel hvězdárny v Palermu. Zároveň s hledáním neznámé planety sestavoval podrobný hvězdný katalog, když v lednu roku 1801 narazil na hvězdu "Mayer 87", která v původní verzi Mayerova katalogu chyběla. Prohledáním oblasti, kde se hvězda měla nacházet, skutečně našel objekt osmé hvězdné velikosti. Následující noci zjistil, že se objekt posunul, a považoval jej za kometu – i když těleso nemělo rozeznatelný kometární charakter. Pozoroval ji téměř měsíc, než napsal Bodemu o svém objevu, a ještě další dva týdny, než se ztratila v záři Slunce. Poté již svoji 'kometu' nenalezl. Piazzi pojmenoval svůj objev podle bohyně úrody a patronky Sicílie Ceres, s přídomkem Ferdinanda po králi obojí Sicílie, který však později nebyl za součást jména uznán. Bode, který dostal dopis až koncem března – v době, kdy byla Ceres už ztracena – se domníval, že jde právě o onu planetu, jejíž existenci dříve předpověděl.

Mohlo by se zdát, že tehdejší astronomové se Ceres příliš rychle vzdali. Jenže do začátku 19. století byly parametry drah odvozovány pouze pro planety a občasnou kometu, s podporou poloh nasbíraných za celá staletí. Perioody oběhu byly velmi dobře známy, takže hlavní poloosa a a střední denní pohyb n mohly být získány jednoduše z třetího Keplerova zákona. A pro komety byla dosazována excentricita $e = 1$, odpovídající parabole, a veká poloosa $a = \infty$, takže na určení zbývaly pouze čtyři dráhové parametry. Jiná metoda již čekala na Uran – u něj byla zikána střední vzdálenost od Slunce z Titius–Bodeova zákona, a byla spočtena předběžná kruhová dráha planety, která byla dalšími pozorováními opravena na eliptickou. Ačkoliv byl ze začátku považován – stejně jako Ceres – za kometu, jeho malá excentricita a inklinace nakonec prokázala jeho skutečný charakter. Po získání parametrů dráhy Uranu bylo dokázáno, že planeta byla již před svým objevem dvacetkrát zapsána do katalogů onoho století jako hvězda.

Naštěstí se o stanovení dráhy Ceres začal zajímat tehdy mladý matematik Gauss. Protože situaci ztěžoval krátký pozorovaný oblouk dráhy a nemožnost vybrat některou speciální metodu, vytvořil vlastní postup. Gaussova metoda poté skutečně ještě v prosinci roku 1801 umožnila znovunalezení Ceres, a používá se pro stanovení drah dodnes.

O pouhého čtvrt roku později objevil H. Wilhelm Olbers jinou 'planetu', když hledal v dalekohledu Bremenské hvězdárny Ceres. Byla pojmenována Pallas, a Juno s Vestou záhy následovaly v letech 1804 a 1807.

²Pro mnohem později objevené planety Neptun a Pluto Titius-Bodeův zákon neplatí

1.2.2 Značení planetek

V první polovině devatenáctého století byly planetky označovány pouze jejich jménem. Jenže jich rychle přibývalo, hlavně od doby zavedení fotografické metody pozorování, a *Astronomisches Nachrichten* (AN) začala planetkám přidělovat číslo, a to v pořadí, jak jim přicházely zprávy o objevech. V roce 1892 bylo zavedeno předběžné označení, přičemž definitivní číslo bylo přiřazeno pouze planetkám s rozumně přesně spočtenou drahou. Předběžné označení se skládalo pouze z roku a písmena abecedy, jdoucí od A do Z s vynecháním I, tedy 1892 A, 1892 B, atd. Písmena však nestačila pokrýt všechny objevy a bylo přidáno druhé písmeno, takže dočasná označení vypadala takhle: 1893 AA, 1893 AB, V roce 1916 byly vyčerpány kombinace dvou písmen a začaly se počítat odznova, od čísla planetky 1916 AA.

V předběžném označení planetek byly provedeny později ještě další změny, reflektující nároky na možnosti označení a stoupající počet planetek. Dnes přiděluje MPC předběžné označení planetce, která byla pozorována nejméně po dvě noci, a nelze ji prozatím identifikovat s některým ze známých těles. Předběžné označení se skládá z několika částí:

- 1) čtyřmístný rok pozorování
- 2) mezera
- 3) písmeno poloviny měsíce pozorování s vynecháním písmena I (1.–15.1. A, 16.–31.1. B, 1.–15.2. C, ..., 1.–15.11. X, 16.–31.12. Y)
- 4) písmeno, určující pořadí v dané polovině měsíce s vynecháním písmena I (1. A, 2. B, 3. C, ..., 24. Y, 25. Z)

Pokud je během jedné poloviny měsíce přiděleno předběžné označení více jak 25 tělesům, začíná index pořadí tělesa v dané polovině měsíce znovu od A, přičemž je přidán dolní index 1. Po vyčerpání písmen začíná označování odznova od A, s dolním indexem 2, a tak dále, takže 1. těleso v dané polovině měsíce má pořadí A₁, 26. těleso A₂, 51. bude mít A₃ a 52. C₃.

Pak kupříkladu blízkozemní planetka, objevená jako 113. v druhé polovině června 2004, bude mít rok pozorování 2004, polovinu měsíce M, pořadí v polovině měsíce 113 – 100 = 13 = N a u něj index³ 4, tedy bude mít předběžné označení 2004 MN₄.

Po vyčerpání všech 1925 možných kombinací tohoto systému zápisu je první cifra roku nahrazena písmenem A a pokračuje se v označování od začátku.

Je-li objekt pozorován alespoň během čtyř opozic, je jeho dráha dobře známa a obvykle obdrží trvalé očíslování a případně i jméno. Příkladem uvedené těleso 2004 MN₄ skutečně existuje, je jím planetka (99942) Apophis. Jméno navrhuje podle pravidel Mezinárodní astronomické unie (IAU) objevitel planetky, vstupuje v platnost po schválení Comitee for Small Body Nomenclature a je následně opublikováno v nejbližším vydání *Minor Planet Circular*.

³Možno spočíst jako $\frac{113-25}{25}$ se zaokrouhlením nahoru na celé číslo.

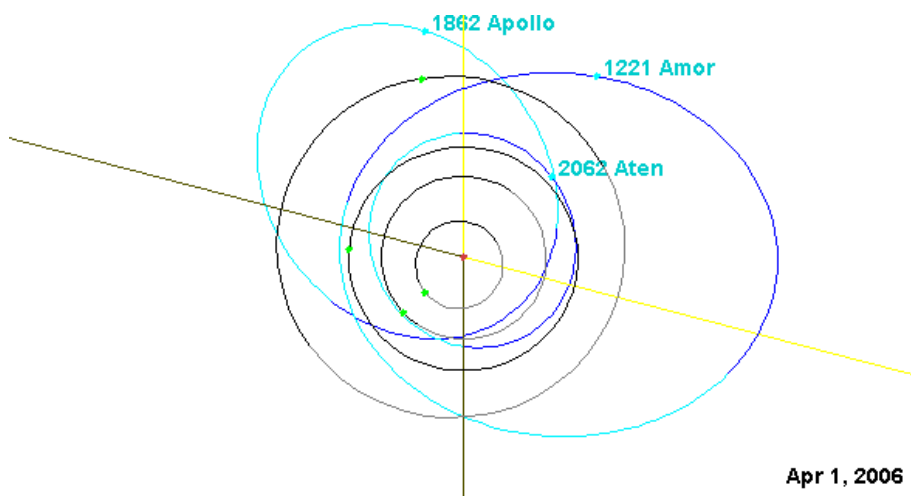
1.2.3 AAA planetky

Mezi objekty označované jako NEO (Near Earth Object) řadíme komety (NEC, Near Earth Comet) a planetky (NEA, Near Earth Asteroid) se vzdáleností perihelia méně než 1,3 AU od Slunce. Blízkozemní planetky dále dělíme do skupin podle vzdálenosti perihelia (q), vzdálenosti afelia (Q) a hlavní polohy (a). Skupiny jsou pojmenovány po planetkách, jejichž drahám jsou dráhy těchto těles podobné. Jsou to planetky Amor, Aten a Apollo, díky nimž se vžil označení blízkozemních planetek jako 'AAA planetky'. Jejich dráhy jsou vykresleny na obrázku 1.2.

Amor : Blízkozemní planetky tohoto typu se k Zemi blíží, ale dráhu Země nekříží. Jejich dráha leží vně Zemské dráhy, ale uvnitř dráhy Marsu ($a > 1,0$ AU, $1,017 < q < 1,3$ AU).

Apollo : Dráha blízkozemních planetek typu Apollo leží z větší části vně dráhy Země a její dráhu kříží. ($a > 1,0$ AU, $q < 1,017$ AU)

Aten : Blízkozemní planetky typu Aten mají dráhu z většiny uvnitř dráhy Země, a dráhu Země kříží. ($a < 1,0$ AU, $q < 1,017$ AU)



Obrázek 1.2: Dráhy planetek Amor, Aten a Apollo ve Sluneční soustavě.

Pro vyjádření nebezpečnosti blízkozemní planetky pro Zemi byla dále zavedena kategorie PHA (Potentially Hazardous Object). Planetka patřící do této kategorie se jednak může přiblížit nebezpečně blízko k Zemi, a jednak má dost velký průměr, aby znamenala ohrožení. Potenciálně nebezpečné planetky se mohou přiblížit k Zemi na vzdálenost menší, než $0,05 \text{ AU}^4$ a mají průměr 150 m a více. Momentálně⁵ je známo 786 potenciálně nebezpečných planetek.

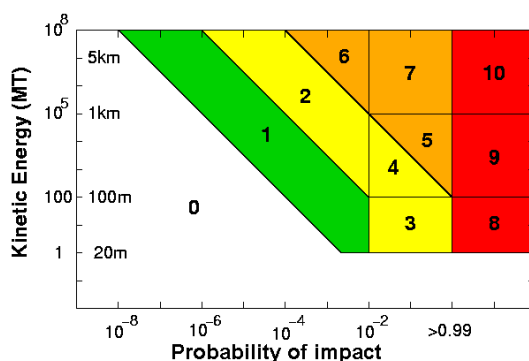
⁴Což je zhruba 7,5 mil. km, čili dvacetinásobek vzdálenosti Země-Měsíc

⁵K datu 14. května 2006

1.2.4 Turínská stupnice

Tato stupnice vyjadřuje míru ohrožení lidstva planetkou, k níž se stupeň váže, a byla vyvinuta jako způsob předávání informací o možných srážkách veřejnosti. Stupnice používá celá čísla od nuly do deseti. Nejnižší stupeň je přidělen tělesům se zanedbatelnou šancí srážky se Zemí a tělesům tak malým, že neproniknou zemskou atmosférou. Nejvyšší stupeň pak znamená jistou srážku s tělesem dost mohutným, aby způsobilo globální katastrofu. Stupnice je pro větší přehlednost barevně kódována, jak je zřejmé z obrázku 1.3.

Nejvyšší dosud použitý stupeň turínské škály byl 4, přidělen blízkozemní planetce (99942)Apophis (známa také pod předběžným označením 2004 MN₄) koncem roku 2004. Další pozorování však dráhu planetky upřesnily a srážku se Zemí v roce 2029 vyloučila. Těleso má nyní hodnotu 1 na Turínské škále.



Obrázek 1.3: Turínská stupnice

Pouze jedno další těleso kdy dosáhlo vyššího stupně než nula. Jde o blízkozemní planetku 2004 VD₁₇, která momentálně dosahuje stupně 2 turínské škály se šancí 0,056% srážky se Zemí v roce 2102.

Turínská stupnice není jedinou svého druhu. Později byla vyvinuta Palermská stupnice, upřednostňovaná odborníky pro svoji větší přesnost. Narozdíl od diskrétní Turínské stupnice je Palermská stupnice spojitá a zohledňuje navíc vliv času, tedy s přibližující se srážkou index Palermské stupnice roste.

1.3 Úloha následné astrometrie

Dnes již existují rozsáhlé programy na vyhledávání nových planetek, chrlící kvanta informací o nových tělesech. Ale – jak ukazuje i příklad první objevené planetky Ceres – pokud nebudou objev následovat další pozorování na zajištění dostatečně dlouhého oblouku dráhy, abychom těleso našli i při jeho příštím přiblížení, objekt ztratíme, a tímhle způsobem pak můžeme 'objevovat' stejná tělesa donekonečna.

Důležité je jak potvrdit objev tělesa, tak i jeho sledování po objevu a během první opozice ⁶, a úspěšně jej nalézt při opozici následující.

Potvrzení objevu tělesa se provádí nezávislým nalezením a přesným proměřením jeho polohy. V prvních dnech se typicky využívá väisälovská metoda, pomocí které je možné z dat pouze jedné noci určit dobře polohu tělesa na řádově několik dní dopředu. Pokud není objekt nalezen, je vhodné jej hledat převážně podél směru předpokládaného pohybu. Také je možné odhalit jeho případný kometární charakter, nebo se může stát, že objekt ani neexistuje, a výstup vznikl pouze chybnou analýzou snímku vyhledávacími programy. Odhalení této chyby zjištěním neexistence objektu při následné astrometrii tím umožňuje zkvalitnění automatických vyhledávacích programů.

Zároveň tyto toulavé kusy skal mohou ohrozit naši civilizaci tak, jak ji známe. Jsou pomyslným Damoklovým mečem nad našimi hlavami, a jak ukazuje příklad dinosaurů, mohou dopadnout skutečně tvrdě. PHA a NEO objekty bývají tedy sledovány po mnohem delší dobu, než typická planetka hlavního pásu, abysme znali dráhu dost přesně na vyloučení možnosti srážky se Zemí v blízké budoucnosti, a to jak pro tělesa nová s nepřesně určenými parametry drah, tak i pro často pozorované objekty, které se přibližují neobvykle blízko k Zemi.

Pokud získáme natolik přesné elementy drah, že jsme schopni těleso najít i v dalším přiblížení, jeho odpozorování po delším časovém úseku dále velmi zpřesní jeho dráhu.

1.4 MPC formát zápisu efemerid

Astrometrická pozorování komet a planetek jsou odesílána do Minor Planet Center (MPC) ve standartizovaném způsobu zápisu o osmdesáti znacích, lišícím se podle způsobu pozorování. Správný zápis polohy planetky může vypadat následovně, všimněte si hlavně počtu mezer:

obj01 C 2004 12 04.95580 03 57 24.86 +13 06 37.4 246
 1-5 6-12 13-15 16-32 33-44 45-56 57-65 66-71 72-77 78-80

Znak	Význam
1 – 5	Číslo planetky
6 – 12	Předběžné označení
13	Objevitelská hvězdička
14	Poznámka 1
15	Poznámka 2
16 – 32	Datum pozorování
33 – 44	Pozorovaná RA (J2000.0)
45 – 56	Pozorovaná Decl. (J2000.0)
57 – 65	– prázdné –
66 – 71	Pozorovaná jasnost a spektrální obor
72 – 77	– prázdné –
78 – 80	Kód hvězdárny

⁶Tedy opozici vůči Slunci při pohledu ze Země, kdy je těleso Zemi nejbližší a viditelné téměř po celou noc.

Číslo planetce přiřazuje Minor Planet Center; pokud není číslo dosud přiřazeno, zůstávají znaky prázdné. Předběžné označení přiřazuje sám pozorovatel novým či neidentifikovaným objektům, přičemž by mělo být nejvýše šest znaků dlouhé, bez mezer a začínající písmenem. Pokud Minor Planet Center odsouhlasí, že jde skutečně o nové těleso, přiřadí mu pak předběžné označení podle mezinárodně platného systému uvedeného v kapitole 1.2.2. Pozorování stejného tělesa by měla mít stejná označení. Objevitelská hvězdička – tedy znak ‘*’ – se zařazuje u nově objevených těles, a to pouze u jednoho pozorování. První poznámka obsahuje případnou poznámku k přesnosti či účelu pozorování, podmínkám, atp., druhá poznámka pak většinou metodu pozorování, přičemž prázdné pole značí metodu fotografickou. Datum pozorování je zapsáno ve formátu UTC typicky pro střed pozorování. Kód je každé hvězdárně přidělen podle zeměpisných souřadnic⁷ a všechny kódy jsou sepsány do seznamu volně přístupném na internetu.

1.5 Metoda Väisälä

Väisälövska metoda určuje dráhové elementy pro krátký oblouk pozorování pouze ze dvou serií dat. Každé z obou pozorování se skládá ze tří údajů – rektascenze (α), deklinace (δ), a času pozorování (t). Není jednoduché najít všechny parametry dráhy pouze ze dvou pozorování, proto předpokládáme, že v momentě druhého pozorování prochází těleso periheliem, takže pravá anomálie ν je zhruba nula. Většina planetek je objevena poblíž perihelia, takže toto předpokládat můžeme. Poté odhadneme vzdálenost tělesa od Země v čase druhého pozorování (R). Pro každé pozorování dále spočteme kartézské souřadnice Země v prostoru (X, Y, Z). Z pozorování máme tedy celkem dvanáct hodnot ($\alpha_1, \delta_1, t_1, X_1, Y_1, Z_1, \alpha_2, \delta_2, t_2, X_2, Y_2, Z_2$). Spočteme heliocentrické souřadnice objektu:

$$x_2 = \Delta_2 \cos \alpha_2 - X_2$$

$$y_2 = \Delta_2 \sin \alpha_2 - Y_2$$

$$z_2 = \Delta_2 \tan \delta_2 - Z_2$$

$$r_2^2 = x_2^2 + y_2^2 + z_2^2$$

kde $\Delta_2 = R_2 \cos \delta_2$, přičemž Δ_2 zvolíme libovolně mezi 1,0 a 2,0 AU, čímž získáme R_2 , vzdálenost tělesa od Země v čase druhého pozorování. Dále spočteme veličiny F_1 a G_1 představující první členy Taylorova rozvoje, kde τ je časový faktor popsáný Dubiagem (1961).

$$F_1 = 1 - \frac{\tau^2}{2r_2^3}$$

$$G_1 = \tau - \frac{\tau^3}{6r_2^3}$$

$$\tau = 0,017202(t_1 - t_2)$$

⁷S výjimkou Spitzer Space Telescope(245), SOHO (249), HST (250), a dále Roving Observers (247), tedy pohybující se pozorovateln, které dodávají zeměpisné souřadnice ke každému pozorování

Určíme vzdálenost tělesa během první noci a složky rychlosti tělesa x'_2, y'_2 a z'_2 .

$$\Delta_1 = \frac{F_1 r_2^2 + X_1 x_2 + Y_1 y_2 + Z_1 z_2}{x_2 \cos \alpha_1 + y_2 \sin \alpha_1} + z_2 \tan \delta_2$$

$$x'_2 = \frac{1}{G_1} \cdot \Delta_1 \cos \alpha_1 - F_1 x_2 - X_1$$

$$y'_2 = \frac{1}{G_1} \cdot \Delta_1 \sin \alpha_1 - F_1 y_2 - Y_1$$

$$z'_2 = \frac{1}{G_1} \cdot \Delta_1 \tan \delta_1 - F_1 z_2 - Z_1$$

Nyní máme dost informací pro spočtení dráhových elementů. Začneme *hlavní poloosou* (a) a *excentricitou* (e).

$$V^2 = x_2'^2 + y_2'^2 + z_2'^2$$

$$a = \frac{r_2}{2 - r_2 V^2}$$

$$e = r_2 V^2 - 1$$

Následuje kontrola správnosti metody. Velká poloosa a by měla být mírně větší než r_2 , vzdálenost tělesa v době t_2 od počátku kartézské soustavy souřadnic, tedy od Slunce. Pokud je $0 \leq a - r_2 \leq 0,5$, dráha je použitelná. V opačném případě zvolíme jinou hodnotu Δ_2 a zopakujeme výpočet.

Poté určíme složky vektoru P a Q , relativní pozice a relativní rychlosti tělesa.

$$\vec{P} = (P_x, P_y, P_z) = \frac{1}{r_2} (x_2, y_2, z_2)$$

$$\vec{Q} = (Q_x, Q_y, Q_z) = \frac{1}{V} (x'_2, y'_2, z'_2)$$

Nakonec pomocí těchto pěti rovnic určíme zbývající elementy dráhy: *sklon dráhy* (i), *argument perihelia* (ω), a *délku výstupného uzlu* (Ω).

$$\sin i \sin \omega = P_z \cos \epsilon - P_y \sin \epsilon \quad (1.2)$$

$$\sin i \cos \omega = Q_z \cos \epsilon - Q_y \sin \epsilon \quad (1.3)$$

$$\sin \Omega = (P_y \cos \omega - Q_y \sin \omega) \sec \epsilon \quad (1.4)$$

$$\cos \Omega = P_x \cos \omega - Q_x \sin \omega \quad (1.5)$$

$$\cos i = (P_x \sin \omega + Q_x \cos \omega) / \sec \Omega \quad (1.6)$$

Rovnice jsou závislé na *sklonu ekliptiky* (ϵ), protože souřadnice závisí na rovině paralelní se zemským rovníkem, nikoliv s ekliptikou. Podělením rovnice (1.2) rovnicí (1.3) získáme $\tan \omega$, načež podělením rovnice (1.4) rovnicí (1.5) dostaneme $\tan \Omega$. Použitím hodnoty pro Ω a ω v rovnici (1.2) nebo (1.3) podělené rovnicí (1.6) získáme $\tan i$.

1.6 Převod geocentrických souřadnic na topocentrické

Pozice spočtená väisälovsky je geocentrická, tedy viděná pozorovatelem v pomyslném středu Země; ve skutečnosti jsou však měření prováděna na jejím povrchu. Pokud se těleso nachází v blízkosti Země, není vzdálenost mezi středem Země a jejím povrchem vzhledem k vzdálenosti tělesa zanedbatelná a je třeba spočíst zdánlivou polohu na pozadí vzdálenějších hvězd, na kterou se těleso pro skutečného pozorovatele promítá – tedy topocentrické souřadnice.

Ke geocentrické pozici přičítáme opravu na pozici topocentrickou.

Nejprve spočteme paralaxu tělesa ze vzorce 1.7, kde r je vzdálenost tělesa od Země (v AU).

$$\text{ppar} = \frac{8,794 \text{ deg}}{3600} \cdot \frac{1}{r} \quad (1.7)$$

Vypočteme Místní siderický čas (LST).

Dále převedeme naši zeměpisnou šířku (lat) na geocentrickou (gclat) a určíme vzdálenost pozice pozorovatele od středu Země (ρ), v poloměrech Země.

Při předpokladu Země jako dokonalé koule pak můžeme psát $\text{gclat} = \text{lat}$, $\rho = 1,0$.

Při započítaném zploštění Země pak:

$$\text{gclat} = \text{lat} - 0,1924 \text{ deg} \cdot \sin 2\text{lat}$$

$$\rho = 0,99833 + 0,00167 \cdot \cos 2\text{lat}$$

Získáme geocentrický hodinový úhel (HA):

$$\text{HA} = \text{LST} - \text{RA}$$

A pomocný úhel g :

$$g = a \cdot \tan\left(\frac{\tan \text{gclat}}{\cos \text{HA}}\right)$$

Nyní můžeme převést geocentrickou rektascenzi a deklinaci (RA, Decl) na jejich topocentrické protějšky (topRA, topDecl):

$$\text{topRA} = \text{RA} - \frac{\text{mpar} \cdot \rho \cdot \cos \text{gclat} \cdot \sin \text{HA}}{\cos \text{Decl}}$$

$$\text{topDecl} = \text{Decl} - \frac{\text{mpar} \cdot \rho \cdot \sin \text{gclat} \cdot \sin (g - \text{Decl})}{\sin g}$$

1.6.1 Výpočet LST

Při výpočtu místního siderického času LST spočteme nejprve siderický čas na Greenwichi v 0:00 UT: $\text{GST} = L + 180 \text{ deg}$, kde L je střední sluneční délka a nachází se běžně v astronomické ročence. Čas je uveden ve stupních, tedy násoben patnácti oproti hodnotě v hodinách. Místní siderický čas pak je:

$$\text{LST} = \text{GST} + \text{UT} \cdot 15,0 + \text{long} \quad (1.8)$$

kde UT je světový čas v hodinách a long zeměpisná délka místa, pro které LST počítáme, přičemž východní délka je kladná a západní délka záporná.

Kapitola 2

Vypracování

2.1 První noc

Z první noci byly získány tyto pozice objektu:

obj01	C2004 12 04.95580 03 57 24.86 +13 06 37.4	246
obj01	C2004 12 04.95837 03 57 24.55 +13 06 36.9	246
obj01	C2004 12 04.96157 03 57 24.19 +13 06 36.5	246
obj01	C2004 12 04.96322 03 57 24.00 +13 06 36.2	246

Jde o velmi krátký oblouk dráhy, proto byla použita väisälovská metoda určení elementů dráhy. Pro ni však musíme znát vzdálenost tělesa od Země. Máme-li k dispozici více než dvě polohy objektu, můžeme zadat dvě polohy jako zdroj a navolit vzdálenost tak, aby se předpověď pro čas dalšího pozorování shodovala s napozorovanou polohou, čímž bychom získali vhodnou vzdálenost pro další výpočty, i parametry dráhy. Přičemž se čtyřmi polohami je možno vyzkoušet více kombinací pro výpočet a výsledek získat z váženého průměru. Ale už první z možných kombinací ukázaly, že pozorování jsou příliš blízko u sebe, takže dostaneme třetí polohu stejnou ve velkém oboru vzdáleností. Parametry dráhy se oproti tomu velmi silně mění i při nepatrné změně vzdálenosti tělesa. Jediný způsob, kterým můžeme nyní pokračovat, je znovu těleso odpozorovat a získat tak polohy vzdálenější od první noci.

Následující pozorování bude provedeno za dva dny, takže vzdálenost stačí znát řádově, očekávaná chyba ve vzdálenosti tělesa od Země se na tak krátký časový úsek nestihne příliš projevit. Objekt jeví poměrně značný pohyb, je tedy v blízkosti Země. Vzdálenost planety byla zvolena na 0,7 AU a z kombinací jednotlivých pozorování byly spočteny väisälovské dráhy, určující předpovědi pro zvolený čas budoucího pozorování 2004 12 06.89552 UT. Čím dále jsou od sebe na onom krátkém oblouku každá dvě pozorování, ze kterých předpověď vychází, tím přesnějších dat se nám dostane. Nepřesnost spočtené polohy závisí i na čase, který uplynul od měřených poloh k počítané poloze, ale v našem případě je těch pár minut, během kterých byla pozorování provedena, ke dvěma dnům, po kterých chceme objekt znovu nalézt, docela dobře zanedbatelných.

Proto byla každé předpovědi přisouzena váha, odpovídající rozdílu času obou zdrojových poloh, a výsledná předpověď je váženým průměrem předpovědí z jednotlivých dvojic pozorování:

```
obj01 C2004 12 06.89552 03 53 44.50 +13 01 51.3
```

Ze značného zdánlivého pohybu objektu víme, že je v blízkosti Země, nemůžeme tedy zanedbat posunutí způsobené paralaxou tělesa. Je potřeba přepočítat geocentrické polohy na topocentrické. Pro $R = 0,7$ AU je velká poloosa dráhy tělesa, kterou do výpočtu potřebujeme, z váženého průměru elementů drah pro kombinace pozorování první noci $a = (1,315 \pm 0,011)$ AU.

Objekt byl odpozorován na Kletě, čemuž odpovídá zeměpisná délka 14,2881 stupně západně a zeměpisná šířka 48,863 stupně severně. Pak je topocentrická efemerida pro Kletě:

```
obj01 C2004 12 06.89552 03 53 44.55 +13 01 34.1 246
```

Pokud objekt nenalezneme v onom zvoleném čase, naše odchylka od skutečné dráhy se bude silně zvyšovat a šance na znovunalezení objektu rapidně klesat. Proto bylo využito služby pro generaci efemerid nových těles NewObjEphems¹, aby hodnoty mohly být porovnány s vlastním výpočtem. Stránka vypisuje topocentrické efemeridy pro zadanou observatoř (Kletě) s nejmenšími kroky jedna hodina, takže efemeridu pro žádaný čas získáme zhruba uprostřed mezi hodinou 21 a 22. S daným počtem platných míst se chyba v určení času neprojeví. Efemerida byla získána vynesáním generovaných hodnot do grafu, proložením vhodné závislosti a odečtením hodnot pro 21,5 hodinu:

```
obj01 C2004 12 06.89583 03 53.72 +13 01.4
```

Byly srovnány efemeridy z NewObjEphems a vlastního výpočtu:

```
obj01 C2004 12 06.89552 03 53 44.55 +13 01 34.1 (vlastní)
obj01 C2004 12 06.89583 03 53 43.2 +13 01 24 (NewObjEphems)
```

Vidíme, že obě hodnoty se docela dobře shodují, rozdíl leží v řádu úhlových vteřin, a je způsoben převážně tím, že NewObjEphems nezahrnuje do výpočtu váhy. Nyní se můžeme pokusit objekt s klidným svědomím znovu zachytit.

¹<http://cfa-www.harvard.edu/iau/MPEph/NewObjEphems.html>

2.2 Druhá noc

Z druhé noci byly získány následující pozice objektu:

obj01	C2004 12 06.89552 03 54 09.37 +13 01 13.5	246
obj01	C2004 12 06.89624 03 54 09.29 +13 01 13.7	246

Nejprve byla porovnána napozorovaná data s předpověďmi, sestupně se blížíící skutečnosti:

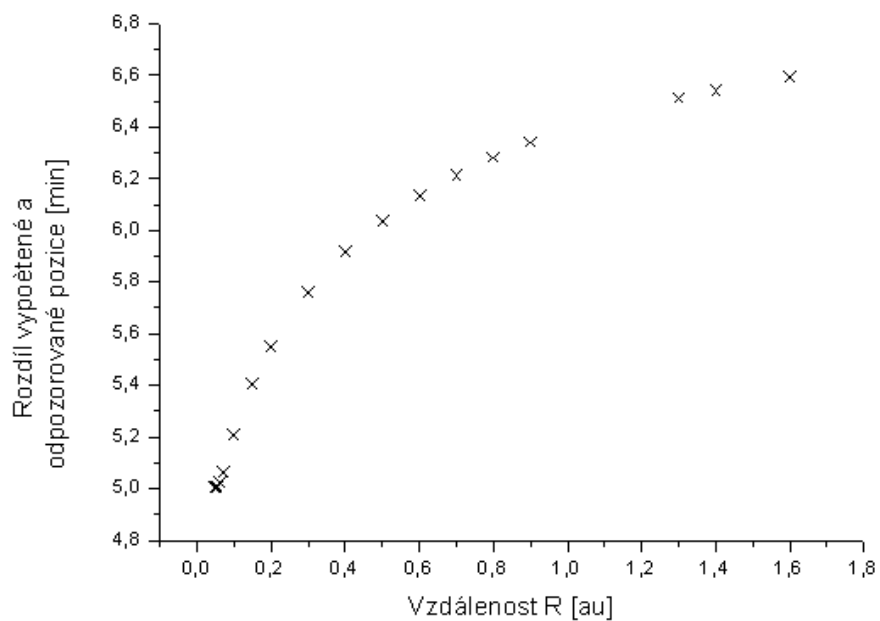
obj01	C2004 12 06.89552 03 53 44.50 +13 01 51.3	(vlastní, geocentrická)
obj01	C2004 12 06.89583 03 53 43.2 +13 01 24	(NewObjEphems)
obj01	C2004 12 06.89552 03 53 44.55 +13 01 34.1	(vlastní, topocentrická)
obj01	C2004 12 06.89552 03 54 09.37 +13 01 13.5	(pozorování)

Je vidět, že přepočítávat geocentrické souřadnice na topocentrické se skutečně oplatí, výpočet je podstatně přesnější. Na první pohled by se mohlo zdát, že NewObjEphems dodal lepší efemeridu, než je naše topocentrická; je však třeba si uvědomit, že rozdíl v rektascenzi v tabulce uvedené výše musíme násobit patnácti, abychom dostali z hodin hodnotu ve stupních, chceme-li ji porovnávat s chybou deklinace. Vzdálenost vypočtené polohy od napozorované pak bude pro NewObjEphems 6,54 úhlové minuty, kdežto pro náš topocentrický výpočet 6,21 úhlové minuty. Naprostá většina chyby (99,9%) leží v obou případech v rektascenzi. Při rozdílu necelých sedmi úhlových minut by se nám skutečně objekt podařilo nalézt. Můžeme tedy pokračovat ve výpočtech.

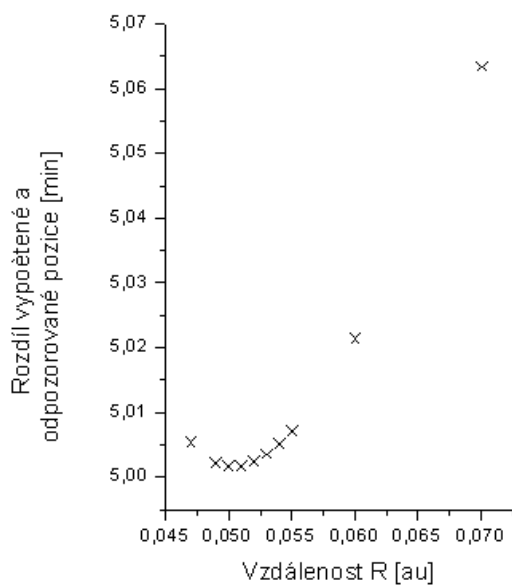
Nyní, když máme k dispozici další noc, se můžeme pokusit znovu přepočítat to, co nebylo možno s jednou nocí – kvůli příliš krátkému oblouku dráhy. Tedy parametry dráhy, pro které nejprve potřebujeme zpřesnit vzdálenost tělesa od Země.

Do výpočtu dráhy z první noci byly dosazovány různé vzdálenosti tělesa a vypočtená předpověď pro čas 2004 12 06.89552 UT byla srovnávána s odpozorovanými souřadnicemi tělesa. Do grafu 2.1 byly vyneseny hodnoty odmocnin součtu čtverců odchylky spočtené a napozorované souřadnice, čili vzdálenost spočtené a napozorované polohy. Z křivky vhodně proložené grafem 2.2 pak byla odečtena hodnota vzdálenosti tělesa od Země v místě extrému křivky, pro kterou je rozdíl spočtené a odpozorované souřadnice minimální.

Dalo by se jistě namítnout, že ona hvězdná sféra, na kterou souřadnice promítáme, je kulová a nikoliv plochá, a mělo by být tedy pro výpočet rozdílu poloh využito raději sférického trojúhelníku, avšak pro naše malé úhly v řádu jednotek minut je něco takového zanedbatelné.



Obrázek 2.1: Vývoj rozdílu naměřené a spočtené polohy v závislosti na volbě vzdálenosti tělesa od Země v testovaném intervalu



Obrázek 2.2: Klíčová část vývoje rozdílu naměřené a spočtené polohy v závislosti na volbě vzdálenosti tělesa od Země

Podívejme se nyní, jak nám zpřesněná vzdálenost ovlivnila vypočtené souřadnice.

obj01	C2004 12 06.89552 03 53 44.55 +13 01 34.1	(vlastní, R=0,7 AU)
obj01	C2004 12 06.89583 03 53 43.2 +13 01 24.0	(NewObjEphems)
obj01	C2004 12 06.89552 03 53 50.11 +12 59 52.1	(vlastní, R=0,05 AU)
obj01	C2004 12 06.89552 03 54 09.37 +13 01 13.5	(pozorování)

Odpovídající rozdíl napozorované a spočtené polohy bude, jak už bylo uvedeno výše, pro NewObjEphems 6,54 úhlové minuty, a pro náš výpočet při vzdálenosti tělesa $R = 0,7$ AU 6,21 úhlové minuty, kdežto při $R = 0,05$ AU² získáme rozdíl podstatně nižší, a to 5,00 úhlových minut.

Spočtenou vzdálenost dosadíme a z väisälovské dráhy získáme dráhové elementy, kromě střední anomálie M . Tu určuje worksheet za pomoci času předpovědi, a proto si nějaký zvolme. Druhá noc byla odpozorována dva dny po první, je tedy rozumné s nyní přesnější dráhou vybrat noc několik dní daleko. Byl zvolen čas 2004 12 14.85524 UT, noc osm dní po druhé pozorovací noci.

Pro výpočet z obou nocí byly použity pouze kombinace pozorování první a druhé noci, protože pozorování ze stejné noci mají o tři řády nižší váhu, takže je můžeme s klidem zanedbat. Váženým průměrem potom získáme následující parametry dráhy, s chybou váženého průměru, pro epochu času předpovědi, tedy 2004 12 14.85524 UT:

$\omega = 86,0 \pm 1,4$ deg
 $e = 0,0043 \pm 0,0007$
 $a = 1,0388 \pm 0,0008$ AU
 $i = 0,3513 \pm 0,0006$ deg
 $\Omega = 346,1 \pm 1,1$ deg
 $M = 1,800 \pm 0,003$ deg
 $\mu = 0,931 \pm 0,001$ deg/day

Skutečná chyba určení těchto parametrů dráhy je podstatně vyšší díky nepřesnosti měření a krátkému oblouku dráhy. Pojd'me se podívat, jak se nám změní parametry dráhy s třetí odpozorovanou nocí. Nejprve získáme z vážených kombinací prvních dvou nocí předpovědi pro výše vybraný čas třetího pozorování, načež z jejich váženého průměru obdržíme efemeridu. Pro srovnání také určíme efemeridu pro stejný čas z NewObjEphems.

obj01	C2004 12 14.85524 03 44 01.36 +12 55 36.9	(vlastní)
obj01	C2004 12 14.85417 03 42 10.2 +12 46 60.0	(NewObjEphems)

Je vidět, že odchylka našeho výpočtu od NewObjEphems je nyní podstatně větší. Protože jsme zahrnuli úpravy oproti NewObjEphems, o kterých jsme se přesvědčili, že jsou oprávněné, budeme se při třetí noci řídit vlastní efemeridou.

²Ve skutečnosti byla použita hodnota 0,0505 AU, což dělá oproti 0,05 AU rozdíl pouhých 1,5 úhlových vteřin; 1 pixel CCD KLENOTu přitom zabírá 1,9 úhlových vteřin.

2.3 Třetí noc

Z třetí noci byly získány následující pozice objektu:

obj01	C2004 12 14.85524 03 45 16.97 +12 54 03.8	246
obj01	C2004 12 14.85615 03 45 16.90 +12 54 03.6	246
obj01	C2004 12 14.85725 03 45 16.85 +12 54 03.9	246
obj01	C2004 12 14.85826 03 45 16.79 +12 54 03.9	246
obj01	C2004 12 14.85918 03 45 16.76 +12 54 03.7	246
obj01	C2004 12 14.86192 03 45 16.62 +12 54 03.7	246

Porovnejme spočtenou a odpozorovanou pozici, pro čas 2004 12 14.85524 UT:

obj01	C2004 12 14.85417 03 42 10.2 +12 46 60.0	(NewObjEphems)
obj01	C2004 12 14.85524 03 44 01.36 +12 55 36.9	(vlastní)
obj01	C2004 12 14.85524 03 45 16.97 +12 54 03.8	(pozorování)

Vidíme, že náš výpočet byl skutečně mnohem přesnější, než efemerida z NewObjEphems, rozdíl oproti napozorované poloze je 20 úhlových minut, kdežto u NewObjEphems 47 úhlových minut. Zorné pole dalekohledu KLENOT je 33 úhlových minut, objekt tedy bude až na druhé serii snímků, pokud dalekohled zaměříme na střed vypočtené polohy. Pokud bysme těleso chtěli zachytit hned na prvním snímku, museli bysme jej odpozorovat o něco dříve, místo po osmi nocích raději již po šesti.

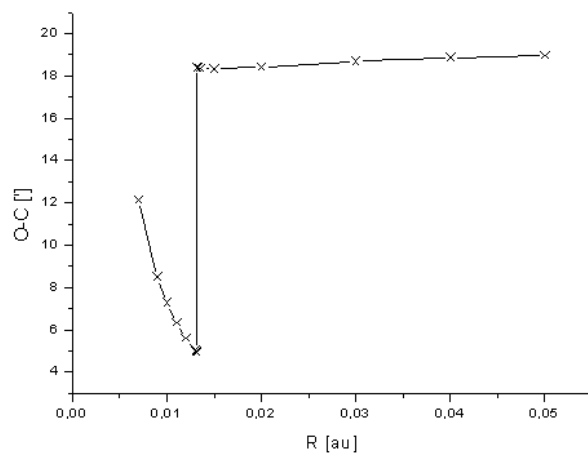
Objekt odpozorujeme a spočteme parametry dráhy. Kvůli střední anomálii potřebujeme zadat čas předpovědi, byl zvolen poblíž času druhého pozorování, 2004 12 14.87500 UT.

Dále byla zpřesněna vzdálenost tělesa od Země. Do grafu na obrázku 2.3 byl vynesena rozdíl spočtené a odpozorované polohy třetí noci. Vzdálenost byla určena tak, aby součet rozdílů pozorovaných a spočtených poloh z obou nocí byl minimální (viz graf 2.3), což je téměř shodná hodnota, jako pro vzdálenost pouze z třetí noci, protože chyba třetí noci – vzhledem k většímu časovému odstupu od nocí předcházejících – podstatně jemněji závisí na vstupní vzdálenosti tělesa od Země ve výpočtu.

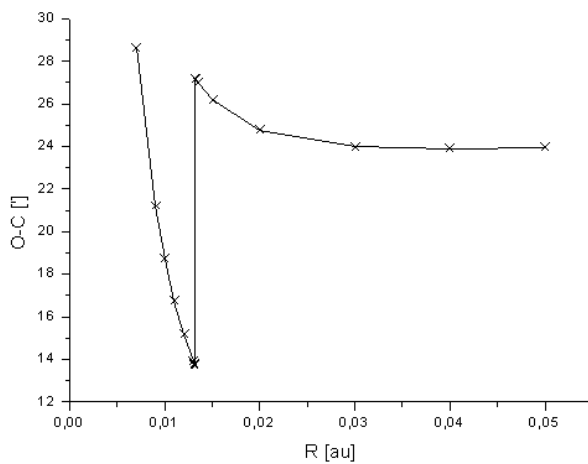
Odečtená vzdálenost je $R = 0,013 \text{ AU}^3$.

Odchylka spočtené a pozorované polohy, tedy odmocnina ze součtu čtverců rozdílů napozorovaných a spočtených souřadnic, je pak při zopakování výpočtu s upřesněnou vzdáleností pro druhou noc 8,8 obloukových minut a pro třetí noc 13,8 obloukových minut.

³Použitá vzdálenost ve výpočtech je 0,0131648 AU, oproti vzdálenosti 0,13 AU je součet rozdílů předpovědí a pozorování z obou nocí o 0,2 úhlové minuty nižší.



Obrázek 2.3: Rozdíl odpozorované a spočtené polohy třetí noci v závislosti na zvolené vzdálenosti tělesa od Země



Obrázek 2.4: Součet rozdílů odpozorovaných a spočtených poloh obou nocí v závislosti na zvolené vzdálenosti tělesa od Země

Parametry dráhy tělesa a chyba váženého průměru byly určeny z kombinací první a třetí, druhé a třetí noci pro epochu 2453354,375 JD odpovídající času předpovědi 2004 12 14.8750 UT.

$$\begin{aligned}\omega &= 61,4 \pm 0,3 \text{ deg} \\ e &= 0,01062 \pm 0,00004 \\ a &= 1,00670 \pm 0,00004 \text{ AU} \\ i &= 0,1017 \pm 0,0003 \text{ deg} \\ \Omega &= 21,3 \pm 0,3 \text{ deg} \\ M &= 0,016 \pm 0,002 \text{ deg} \\ \mu &= 0,97578 \pm 0,00006 \text{ deg/day}\end{aligned}$$

Srovnáme-li chyby aritmetického průměru s předchozím výpočtem, vidíme, že máme elementy dráhy určeny podstatně přesněji. Velká chyba aritmetického průměru v našem případě znamená, že se elementy dráhy výrazněji liší, a tedy pouhá malá změna času vstupních výpočtů mezi jednotlivými pozorováními způsobí znatelnou změnu proložené dráhy tělesa. Dráha je počítána pro průchod periheliem v čase druhého pozorování a pro epochu v čase předpovědi. Střední anomálie M nám tedy ukazuje, o kolik by se těleso vzdálilo za čas mezi druhým pozorováním a předpovědí od svého perihelia, pokud by se pohybovalo rovnoměrně po kružnici o poloměru velké poloosy a ; oba časy jsou si sobě blízké, půjde tedy skutečně o malé kladné číslo.

2.4 Identifikace

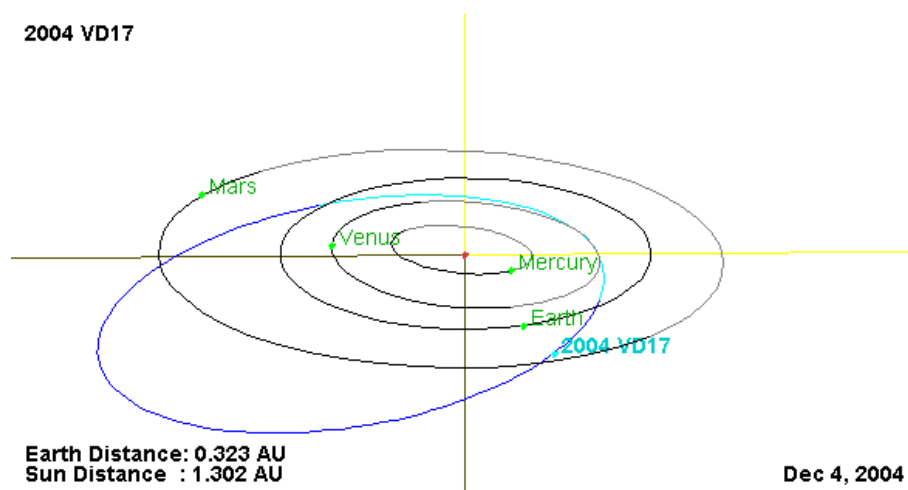
Bylo zjišťováno, nejde-li náhodou o známé těleso. Efemeridy byly zadány automatické službě MPCcheck, která v jejich blízkosti našla planetku 2004 VD₁₇. Její elementy dráhy⁴ pro epochu 2453800,5 JD jsou následující:

$$\begin{aligned}\omega &= 90,691 \text{ deg} \\ e &= 0,588676 \\ a &= 1,50811 \text{ AU} \\ i &= 4,223 \text{ deg} \\ \Omega &= 224,243 \text{ deg} \\ M &= 286,993 \text{ deg}\end{aligned}$$

Tyto elementy dráhy se dost liší od našich spočtených. Spočtená střední anomálie tělesa M pro epochu 2453800,5 JD by byla $M = (75,34 \pm 0,03)\text{deg}$. Väisälövska dráha je pouze velmi přibližná, i když velmi dobře použitelná na předpovědi v blízkém čase; ani jsme nemohli očekávat, že se elementy dráhy budou shodovat. Kromě toho elementy dráhy získané z internetu jsou výsledkem více jak 900 pozorování objektu provedených během víc jak čtyř let, a zpracovaných podstatně dokonalejšími metodami.

⁴Uvedené na <http://newton.dm.unipi.it/cgi-bin/neodys/neoibo?objects:2004VD17;main>

Dále bylo zjištěno, že planetka náleží k typu Apollo, má 0,5—1,2 km v průměru, a byla namodelována její dráha. Není vyloučeno, že se planetka srazí 4. května 2102 se Zemí. Odhadovaná pravděpodobnost srážky je z nynějších pozorování asi 1:1400, odpovídající stupni 2 na Turínské škále nebezpečnosti planetek v rozmezí 0–10.



Obrázek 2.5: Namodelovaná dráha tělesa 2004 VD₁₇

Kapitola 3

Aplikace

3.1 Zpracování snímků

Snímky byly získány pomocí teleskopu KLENOT s průměrem zrcadla 1,06 m a zorným polem o velikosti 33×33 úhlových minut, snímaným CCD čipem o rozměrech 1024×1024 pixelů, chlazeným tekutým dusíkem. Pro získání poloh tělesa ze snímků byly použity programy vyvinuté na Kleti. Vždy dva po sobě jdoucí snímky byly načteny do programu *Blink*, kde byly nejprve srovnány přes sebe tak, aby se hvězdy překrývaly, a pak bylo problikáváním obou snímků nalezeno pohybující se těleso. Většinou se v zorném poli nalézalo takových těles více, pak bylo za hledané těleso označeno takové, které se nacházelo poblíž předpokládané pozice a zároveň jeho směr pohybu souhlasil s očekáváním. Snímek byl pak načten do programu *Astrometry*, který identifikoval okolní hvězdy podle katalogu USNO-A2.0 a spočetl pozici neznámého objektu.

3.2 První noc

Ze snímků první noci byly získány tyto pozice.

K06A03R	C2006	01	24.01275	10	32	08.61	+28	57	20.1	246
K06A03R	C2006	01	24.01353	10	32	08.43	+28	57	20.8	246
K06A03R	C2006	01	24.01433	10	32	08.20	+28	57	19.6	246
K06A03R	C2006	01	24.01637	10	32	07.82	+28	57	19.1	246
K06A03R	C2006	01	24.01793	10	32	07.46	+28	57	18.8	246
K06A03R	C2006	01	24.01852	10	32	07.38	+28	57	18.0	246

Byla spočtena väisälovská dráha a z váženého průměru byla pro další plánované pozorování v 2006 01 25. 03348 UT určena topocentrická efemerida pro Klet a vzdálenost tělesa od Země $R = 0,7$ AU.

K06A03R	C2006	01	25.03348	10	28	26.94	+28	50	12.7	246
---------	-------	----	----------	----	----	-------	-----	----	------	-----

Pro tuto vzdálenost neleží $a - r_2$ v doporučeném intervalu $\langle 0; 0,5 \rangle$.
 Vzdálenost byla změněna na nejvyšší možnou ležící ještě v intervalu, a to 0,0062 AU, a pro tuto vzdálenost byla také spočtena efemerida.

K06A03R C2006 01 25.03348 10 28 26.90 +28 28 41.4 246

3.3 Druhá noc

Těleso bylo úspěšně nalezeno na snímcích druhé noci.
 Byly získány následující pozice tělesa:

K06A03R C2006 01 25.03348 10 28 50.22 +28 50 30.7 246
 K06A03R C2006 01 25.03571 10 28 49.78 +28 50 29.6 246
 K06A03R C2006 01 25.03787 10 28 49.33 +28 50 28.4 246
 K06A03R C2006 01 25.04020 10 28 48.93 +28 50 27.9 246

Rozdíl odpozorované a spočtené polohy je 5,8 úhlových minut pro vzdálenost 0,7 AU, 22,9 úhlových minut pro vzdálenost 0,0062 AU. Vidíme tedy, že pro určení efemerid není vůbec důležité volit vzdálenost tělesa od Země tak, aby ležela v žádaném intervalu. Zorné pole dalekohledu KLENOT má 33 úhlových minut, těleso bylo snadno nalezeno. Vzdálenost tělesa, pro kterou je rozdíl pozorované a vypočtené souřadnice minimální, byla určena na 30 AU. Těleso vykazuje rychlý pohyb, tato vzdálenost je tedy určena špatně i přesto, že nejlépe sedí na pozorování. Tato chyba souvisí hlavně s krátkým obloukem dráhy a hrubým přepočtem na topocentrické souřadnice.

Byla spočtena topocentrická efemerida pro třetí pozorovací noc, pro vzdálenost tělesa 30 AU.

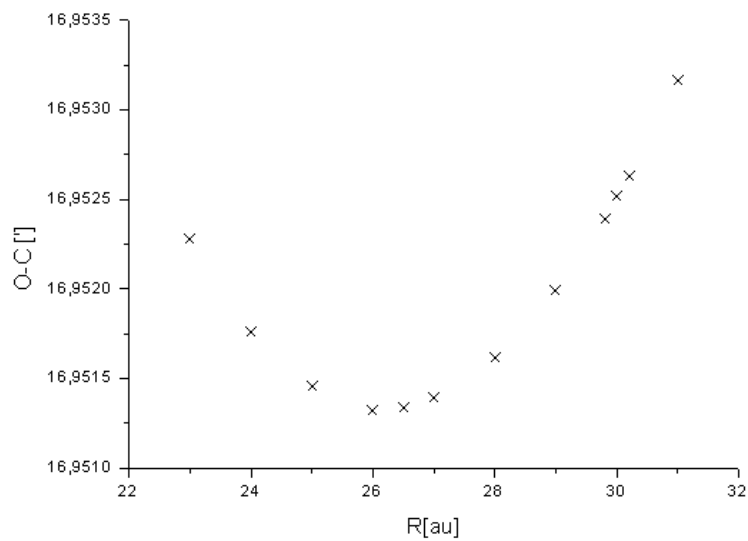
K06A03R C2006 01 27.96435 10 19 00.01 +28 28 55.3 246

3.4 Třetí noc

Těleso bylo úspěšně odpozorováno a byly získány následující pozice tělesa:

K06A03R C2006 01 27.96435 10 19 47.55 +28 29 48.2 246
 K06A03R C2006 01 27.96564 10 19 47.38 +28 29 47.4 246
 K06A03R C2006 01 27.96631 10 19 47.14 +28 29 46.9 246
 K06A03R C2006 01 27.96683 10 19 47.05 +28 29 45.8 246
 K06A03R C2006 01 27.96819 10 19 46.80 +28 29 46.1 246
 K06A03R C2006 01 27.96885 10 19 46.71 +28 29 45.6 246

Rozdíl mezi odpozorovanou a předpovězenou polohou je 11,9 úhlových minut, těleso bylo snadno nalezeno.



Obrázek 3.1: Součet rozdílů odpozorovaných a spočtených poloh z druhé a třetí noci v závislosti na zvolené vzdálenosti tělesa od Země

Vzdálenost tělesa od Země, pro kterou je rozdíl pozorovaných a předpovězených poloh minimální, byla zpřesněna na 26 AU. Výpočet parametrů dráhy není možno provést, $a - r_2$ neleží v intervalu $< 0; 0,5 >$ AU. Jak jsme se přesvědčili o noc dříve, změnou vzdálenosti natolik, aby v doporučeném intervalu ležela, si velmi rozhodíme přesnost. Byla dosazena vzdálenost 0,0062 AU. Parametry dráhy byly spočteny pro od sebe vzdálenější časy (první čtyři pozorování první noci, první dvě druhé noci a všechny třetí noci), což nám dává dost kombinací, aby se vliv dalších kombinací nijak podstatně neprojevil.

Pak jsou parametry dráhy pro epochu 2453763,5 JD, odpovídající času předpovědi 2006 01 28.0000 UT, a odpovídající chyba váženého průměru:

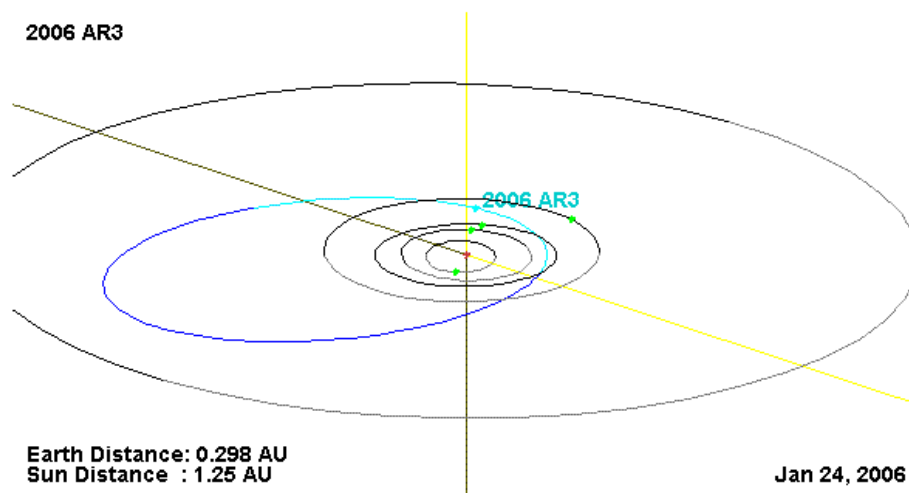
$$\begin{aligned} \omega &= 343,61 \pm 0,19 \text{ deg} \\ e &= 0,0048 \pm 0,0002 \\ a &= 0,9952 \pm 0,0002 \text{ AU} \\ i &= 0,368 \pm 0,004 \text{ deg} \\ \Omega &= 324,14 \pm 0,19 \text{ deg} \\ M &= 0,0331 \pm 0,0013 \text{ deg} \\ \mu &= 0,9927 \pm 0,0003 \text{ deg/day} \end{aligned}$$

3.5 Identifikace

Pomocí služby MPCcheck bylo těleso identifikováno jako planetka 2006 AR₃ s elementy dráhy¹ pro epochu 2453800,5 JD, tedy pro půlnoc 6. března 2006:

$$\begin{aligned}\omega &= 39,912 \text{ deg} \\ e &= 0,64264 \\ a &= 2,4580 \text{ AU} \\ i &= 4,777 \text{ deg} \\ \Omega &= 13,167 \text{ deg} \\ M &= 26,88 \text{ deg}\end{aligned}$$

Jde o blízkozemní planetku typu Apollo o průměru 230 – 530 m, která se v roce 2036 ocitne zhruba 0,10 AU daleko od Země, nejblíže v rámci stanovené chyby 0,02 AU od Země.



Obrázek 3.2: Namodelovaná dráha tělesa 2006 AR₃

¹Uvedené na <http://unicorn.eis.uva.es/cgi-bin/neoibn/neoibo?objects:2006AR3;main>

Kapitola 4

Závěr

Tato práce se zabývala následnou astrometrií dvou vybraných blízkozemních planetek, při třech pozorovacích nocích na každou. Bylo prokázáno, že väisälövská metoda ve spojení se statistikou je jednoduchým a účinným nástrojem k předpovězení polohy planetky v blízkém čase a svou přesností podstatně přesahuje kombinaci väisälövské metody s aritmetickým průměrem, používanou službou NewObjEphems. Použitá metoda hrubě nedostačuje k určení parametrů drah, ale umožňuje sledovat dostatečně dlouhý oblouk dráhy, aby bylo možno nasbírat dostatek poloh pro jiné, přesnější metody, které by si ale zase nevěděly rady s krátkým obloukem dráhy, který metoda Väisälä elegantně řeší.

Literatura

- [1] Tichá, J., Tichý, M., Kočer, M. KLENOT – Klet' Observatory Near Earth and Other Unusual Objects Observations Team and Telescope. ACM 2002, Berlin, (ESA-SP-500), November 2002, pp.793–796
- [2] Tichá, J., Tichý, M., Moravec, Z. Klet' Observatory NEO follow-up programme. Planetary And Space Science Vol.48, no.9 (2000) pp. 787-792.
- [3] Baker, R. L. M. Jr., Makemson, M. W. An Introduction to Astrodynamics. New York and London: Academic Press, 1960.
- [4] Tichý, M., Objev planety Ceres Ferdinandea, nepublikováno
- [5] <http://www.physics.sfasu.edu/astro/asteroids/vaisala3.xls>
- [6] <http://cfa-www.harvard.edu/iau/MPEph/NewObjEphems.html>
- [7] <http://www.oarval.org/SidTimeen.xls>
- [8] <http://scully.harvard.edu/cgi/MPCheck.COM>
- [9] <http://unicorn.eis.uva.es/cgi-bin/neodys/neoibo?objects:2004VD17;main>
- [10] <http://newton.dm.unipi.it/cgi-bin/neodys/neoibo?objects:2006AR3;main>
- [11] <http://www.planetky.cz/>
- [12] <http://earn.dlr.de/nea/K04V17D.htm>
- [13] <http://observe.phy.sfasu.edu/Misc/stewart/>
- [14] <http://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html>
- [15] <http://stjarnhimlen.se/comp/riset.html>
- [16] <http://neo.jpl.nasa.gov/>
- [17] <http://en.wikipedia.org/>
- [18] <http://cfa-www.harvard.edu/iau/info/OldDesDoc.html>
- [19] <http://cfa-www.harvard.edu/iau/info/HowNamed.html>

Seznam příloh

Příloha 1: Dva ze snímků použitých ve zpracování. Šipka označuje planetku 2006 AR₃, ze snímků je patrný pohyb tělesa, podle kterého bylo problikáváním obou snímků těleso nalezeno.

Příloha 2: CD s elektronickou verzí bakalářské práce, odečtenými polohami obou planetek a výpočtovými worksheetsy.

