

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Katedra geomatiky



**PROBLEMATIKA IDENTIFIKACE
MALÝCH TĚLES
VE SLUNEČNÍ SOUSTAVĚ**

The Issue of Identification of Small Solar System Bodies

Disertační práce

Ing. Bc. Miloš Tichý

Doktorský studijní program: GEODÉZIE A KARTOGRAFIE
Studijní obor: Geodézie a kartografie

2018

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího prof. Ing. Jana Kosteckého, DrSc.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

.....

podpis

Děkuji prof. Ing. Janu Kosteckému, DrSc, za podnětné připomínky a cenné rady, které vedly k vylepšení práce. Za cenné připomínky a rady, vedoucí ke zkvalitnění práce, děkuji též Ing. Ivanu Peškovi, CSc. Děkuji též svým kolegům z Observatoře Klet' za spolupráci při získávání dat, použitých při přípravě a tvorbě této práce. Rodině děkuji za podporu.

**PROBLEMATIKA IDENTIFIKACE
MALÝCH TĚLES
VE SLUNEČNÍ SOUSTAVĚ**

**THE ISSUE OF IDENTIFICATION OF
SMALL SOLAR SYSTEM BODIES**

Anotace:

V práci jsou presentovány metody identifikací malých těles sluneční soustavy, tj. planetek a komet. Je předložen stávající stav v dané problematice a jeho klíčové problémy a presentována základní metoda identifikací s užitím metod nebeské mechaniky na základě dráhových elementů těles. Je také navržen plán optimalizace pro identifikace objektů sluneční soustavy.

Jsou též presentovány astrometrické metody používané pro tělesa sluneční soustavy včetně analýzy chyb a analýzy používaných astrometrických katalogů a jejich vhodnosti či nevhodnosti včetně praktických ukázek a výsledků autora.

Klíčová slova: *astrometrie, dráhové elementy, identifikace, planetky, komety*

Abstract:

The work presents methods of identification of small Solar system bodies, in this case minor planets and comets, including basic information about this research and methods used in this research field including presentation of currently used systems (hardware and software work-flow) as well as basic methods of identification of minor planets based on their orbital elements.

Astrometric methods are also presented, including analysis of possible errors, comparison of used catalogs of reference stars for astrometry, and analysis and comparison of methods used at different observatories.

At this work selected examples of identifications of asteroids and comets calculated by the author are also displayed.

Keywords: *astrometry, orbital elements, identification, minor planets, comets*

Obsah

1	Úvod.....	4
2	Historický přehled astrometrické astronomie	6
2.1	Technologický zlom aneb od oka k fotografii a CCD	8
2.2	Současný stav a používané metody	11
3	Souřadnicové systémy	13
3.1	Pravoúhlá souřadnicová soustava.....	13
3.2	Sférická souřadnicová soustava.....	14
4	Astronomické souřadnice	16
4.1	Rovníkové souřadnice II. druhu	16
5	Gnómonická projekce	19
5.1	Vlastní projekce.....	19
5.2	Transformace souřadnic	21
6	Astrometrické katalogy.....	25
6.1	SAO (Smithsonian Astrophysical Observatory Star Catalog)	25
6.2	AGK3	25
6.3	PPM (Positions and Proper Motions Star Catalogue)	25
6.4	GSC	26
6.5	USNO A-2.0.....	26
6.6	Hipparcos	26
6.7	Tycho-2	27
6.8	USNO B-1.0	27
6.9	UCAC 4.....	27
7	Malá tělesa sluneční soustavy	31
7.1	Planetky a komety	31
7.2	Blízkozemní planetky.....	31
7.3	Výzkum planetek a komet.....	33
7.4	Parametry ovlivňující kvalitu astrometrie	34
8	Dráhové elementy malých těles sluneční soustavy	36
9	Výpočet dráhových elementů	43
10	Výpočet efemerid malých těles sluneční soustavy	48

11	Identifikace malých těles sluneční soustavy	52
11.1	Proč je potřeba identifikovat tělesa	53
11.2	Katalogy dráhových elementů.....	56
12	Metoda identifikace malých těles sluneční soustavy	58
13	Příklady identifikací.....	70
13.1	Identifikace planetek hlavního pásu	70
13.1.1	Identifikace 2000 QM ₁₆₆	70
13.1.2	Identifikace 1999 LX ₅	71
13.1.3	Identifikace 1997 AY ₁₄	72
13.2	Identifikace blízkozemních planetek.....	73
13.2.1	Amor 2003 HU ₄₂	73
13.2.2	Apollo 2001 YF ₁	74
13.2.3	Apollo 2002 SR ₄₁	75
13.2.4	PHA Apollo 1999 TF ₂₁₁	76
13.2.5	Aten 2002 FT ₆	77
13.3	Identifikace Kentaurů	78
13.3.1	Kentaur 1997 CU ₂₆	78
13.4	Identifikace komet.....	79
13.4.1	Kometa C/2002 A2 (LINEAR)	79
13.4.2	Kometa C/2002 A1 (LINEAR)	80
13.4.3	Kometa P/2000 U6 (Tichý)	81
13.5	Identifikace těles z The NEO Confirmation Page	84
14	Shrnutí.....	87
15	Přínos autora	88
16	Závěr.....	89
	Seznam vybraných publikací	90
	Literatura	91
	Seznam obrázků	93
	Seznam tabulek.....	94

Seznam použitých symbolů

A	$[\circ]$	<i>azimut</i>
h	$[\circ]$	<i>výška nad obzorem</i>
z	$[\circ]$	<i>zenitová vzdálenost</i>
δ či <i>Decl.</i>	$[\circ]$	<i>deklinace</i>
t	$[\circ$ nebo <i>hod.</i>]	<i>hodinový úhel</i>
α či <i>R.A.</i>	$[\circ$ nebo <i>hod.</i>]	<i>rektascenze</i>
λ	$[\circ]$	<i>ekliptikální délka</i>
β	$[\circ]$	<i>ekliptikální šířka</i>
l	$[\circ]$	<i>galaktická délka</i>
b	$[\circ]$	<i>galaktická šířka</i>
θ	$[\text{hod.}]$	<i>hvězdný čas</i>
φ	$[\circ]$	<i>zeměpisná šířka</i>
a	$[\text{AU}]$	<i>velká poloosa dráhy</i>
ε	$[\text{AU}]$	<i>lineární excentricita</i>
e	$[\]$	<i>numerická excentricita</i>
Ω či <i>Node.</i>	$[\circ]$	<i>délka vzestupného uzlu dráhy</i>
i	$[\circ]$	<i>sklon dráhy k ekliptice</i>
ω či <i>Peri.</i>	$[\circ]$	<i>argument šířky perihelu</i>
T	$[\text{datum}]$	<i>čas průchodu přísluním</i>
M	$[\circ]$	<i>střední anomálie</i>
<i>Epocha</i>	$[\text{JD}]$	<i>epocha dráhových elementů</i>
v	$[\circ]$	<i>pravá anomálie</i>
E	$[\circ]$	<i>excentrická anomálie</i>
P	$[\text{let}]$	<i>oběžná doba</i>
n	$[\circ/\text{den}]$	<i>střední denní pohyb</i>
q	$[\text{AU}]$	<i>vzdálenost přísluní</i>
Q	$[\text{AU}]$	<i>vzdálenost odsluní</i>
X, Y, Z	$[\text{AU}]$	<i>pravoúhlé souřadnice (heliocentrické)</i>
π	$[\text{"}]$	<i>paralaxa</i>
ρ	$[\text{AU}]$	<i>geocentrická vzdálenost</i>

1 Úvod

Astrometrie neboli určování přesných poloh objektů na nebeské sféře, patří mezi základní úlohy nebeské mechaniky. Pomocí astrometrie lze určovat nejen přesné topocentrické polohy objektů na obloze, ale v některých případech i, vlastně sekundárně, polohu pozorovatele na zemském povrchu. Prostřednictvím astrometrie tak byly svázány pozemské a nebeské souřadnicové systémy, neboli souřadnicové systémy užívané v geodézii a astronomii. Přesnost astrometrie ovlivňovala i vývoj astronomie, obzvláště vývoj názorů na pohyb těles ve sluneční soustavě, jednotlivé populace těles sluneční soustavy a strukturu rozložení těles ve sluneční soustavě.

Díky omezené a neměnní se přesnosti astrometrických přístrojů se až do konce 19. století zdálo, že astrometrie bude na okraji vědeckého zájmu. Se zlepšujícím se přístrojovým vybavením a nástupem fotografické a posléze CCD technologie a radarové astronomie se přesná astrometrie následně stala velice důležitou. Vlastně se stala základní součástí při výzkumu dynamiky těles nejen naší sluneční soustavy, ale i naší Galaxie, a celého pozorovatelného vesmíru.

V úvodu práce se seznámíme s historickým přehledem astronomie od nejstarších metod po metody nejmodernější. Nedílnou součástí astrometrie jsou i souřadnicové systémy, které úvodní část doplňují, a to včetně gnómonické projekce, která je nezbytná pro kvalitní a přesné astrometrické výpočty.

Každý astrometrista pro svou práci potřebuje referenční body, a proto je další kapitola věnována astrometrickým katalogům, které se v dané práci používají. Porovnáme zde jak plošnou hustotu hvězd daného katalogu, tak i jejich přesnost.

Dále se seznámíme s objekty našeho zájmu – planetkami a kometami. Představíme používané dráhové elementy a seznámíme se s výpočtem efemerid daných těles, s výpočty jejich dráhových elementů a i s katalogy dráhových elementů planetek.

Následuje základní pasáž o identifikacích těles ve sluneční soustavě a informace, proč je toto nutné počítat, včetně shrnutí používaných metod. Podrobně je analyzována zde

preferovaná a na základě předložených výsledků i rychlá a kvalitní metoda identifikací těles ve sluneční soustavě.

Následuje kapitola představující identifikace objektů popisovanou metodou, a to jak pro tělesa hlavního pásu planetek mezi Marsem a Jupiterem, tak příklady identifikací těles blízkozemních různého dráhového typu, identifikace Kentaurů a i komet. Důležitou součástí je přehled identifikace objektů z The NEO Confirmation Page, jejichž včasná identifikace značně zefektivňuje pozorovatelskou práci jednotlivých observatoří po celém světě a šetří i pozorovací čas, který je následně možné použít na sledování jiných důležitých objektů. Zhodnotíme též účinnost a kvalitu této presentované identifikační metody.

2 Historický přehled astrometrické astronomie

Technologie astrometrie i její přesnost byla vždy odvislá od technologického rozvoje. Podobně se měnily i veličiny, které se prostřednictvím astrometrie měří [3].

Do počátku 17. století byla prováděna astrometrie na obloze bez použití dalekohledu. Po vynalezení dalekohledu byl tento následně přidán k měřícím přístrojům pro dosažení větší přesnosti. Měřenou veličinou při této metodě astrometrie byl úhel, a to buď vzájemná úhlová vzdálenost dvou pozorovaných objektů, tak třeba azimut a výška tělesa nad obzorem. S vývojem techniky se používaly i různé přístroje, a to čím dál tím větší, protože čím byla větší přístrojová základna, tím byla přesnější i výsledná měření. [9].

Prvním doloženým měřícím astrometrickým přístrojem byla Jakubova hůl. Jakubova hůl je jednoduchý astronomický přístroj, vlastně úhloměr, sloužící buď k měření úhlové vzdálenosti dvou objektů, k měření výšky objektu nad obzorem či například jeho azimutu. Fungoval na principu průhledítka – oko se přiložilo ke konci pravítka a posuvným ramenem se posouvalo, až se docílilo stavu, aby měřené objekty byly viděny přesně na koncích posuvné části. Na pravítku se pak odečetl úhel mezi objekty. Jakubova hůl byla poměrně nepřesná, její přesnost byla na úrovni desítek úhlových minut až jednoho úhlového stupně. Přesnost závisela jak na kvalitě přístroje, tak i na kvalitě pozorovatele, na jeho schopnostech a zkušenostech.

Dalším používaným přístrojem bylo paralaktické pravítko, nebo též triquetrum, které sloužilo k měření zenitové vzdálenosti objektů. Měřenou jednotkou byl tedy opět úhel. Vyvinulo se z gnómonu přidáním dvou pohyblivých ramen. První rameno bylo připevněno na vrcholu a mělo průhledítka na zaměřování objektů. Druhé rameno pak sloužilo přímo k měření, kdy na něm byla upevněna stupnice zenitových vzdáleností, a vzájemná poloha obou ramen udávala měřený úhel. Z paralaktického pravítka se posléze vyvinuly přístroje jako kvadrant, sextant či oktant.

Poměrně málo přesná Jakubova hůl a paralaktické pravítko byly v průběhu let nahrazeny kvadrantem. Měřenou jednotkou i u tohoto přístroje byl úhel. Kvadrant byl zařízen na měření zenitových vzdáleností objektů. Měření se provádělo pomocí průzorů, průhledítek, a úhel se následně odečítal na stupnici o velikosti čtvrtiny kruhu (proto se přístroj též jmenuje kvadrant). Kvadranty byly jak malé, cestovní, tak i velké, nástěnné či stojací. Připevněním

kvadrantu na zeď či na podstavec se značně zvýšila jeho přesnost, a to nejen díky větším rozměrům, ale i díky stabilitě celého přístroje. Na konci éry kvadrantů v renesanci dosahoval známý dánský astronom Tycho Brahe s kvadrantem přesnosti měření až téměř 1 úhlovou minutu, neboli třicetinu průměru měsíčního úplňku. V samém závěru užívání kvadrantů v astronomii byl tento přístroj doplněn i dalekohledem, čímž došlo ke zpřesnění měření.

Oktant je dalším přístrojem, který byl vyvinut z paralaktického pravítka. Měřenou veličinou je, jak jinak, opět úhel. Je velmi podobný sextantu, jen výsek je osminový, neboli místo šestiny kruhu se používá osmina kruhu. Mírnou výhodou bylo, že byl oproti sextantu menší a tudíž skladnější a vhodnější na cestování. První oktant byl zkonstruován v první polovině osmnáctého století v Anglii.

Posledním zmíněným přístrojem je sextant. Sextant pro měření využívá překrytí obrazu v polopropustném zrcátku. Úhel se měří pomocí otočného zrcátka, které je spojeno s měřicí stupnicí. Tento přístroj byl základním pozemským navigačním měřicím přístrojem až do nástupu družicové navigace GPS a dodnes slouží jako záložní navigační přístroj. Užívá překryvu obrazů pozorovaného objektu, a úhel se měří pomocí pohyblivého zrcátka a kalibrované stupnice. Pomocí sextantu se dá přímo měřit výška těles nad obzorem, s užitím stativu i úhlová vzdálenost dvou objektů na obloze.

Astrometrie s přímým použitím dalekohledu vedla k výraznému zpřesnění měření. Sice se pořád k pozorování používalo jako „záznamové zařízení“ oko, ale dalekohled díky zvětšení a dosahu na slabší objekty zpřesnil měření, což výsledně vedlo k dalším objevům pohybů těles na nebeské sféře. V astronomii se zpočátku používala astrometrie zakreslovací, kdy byly pomocí dalekohledu kresleny polohy těles v zorném poli v několika časech, posléze se používal pro přesnější měření souřadnic pasážníků.

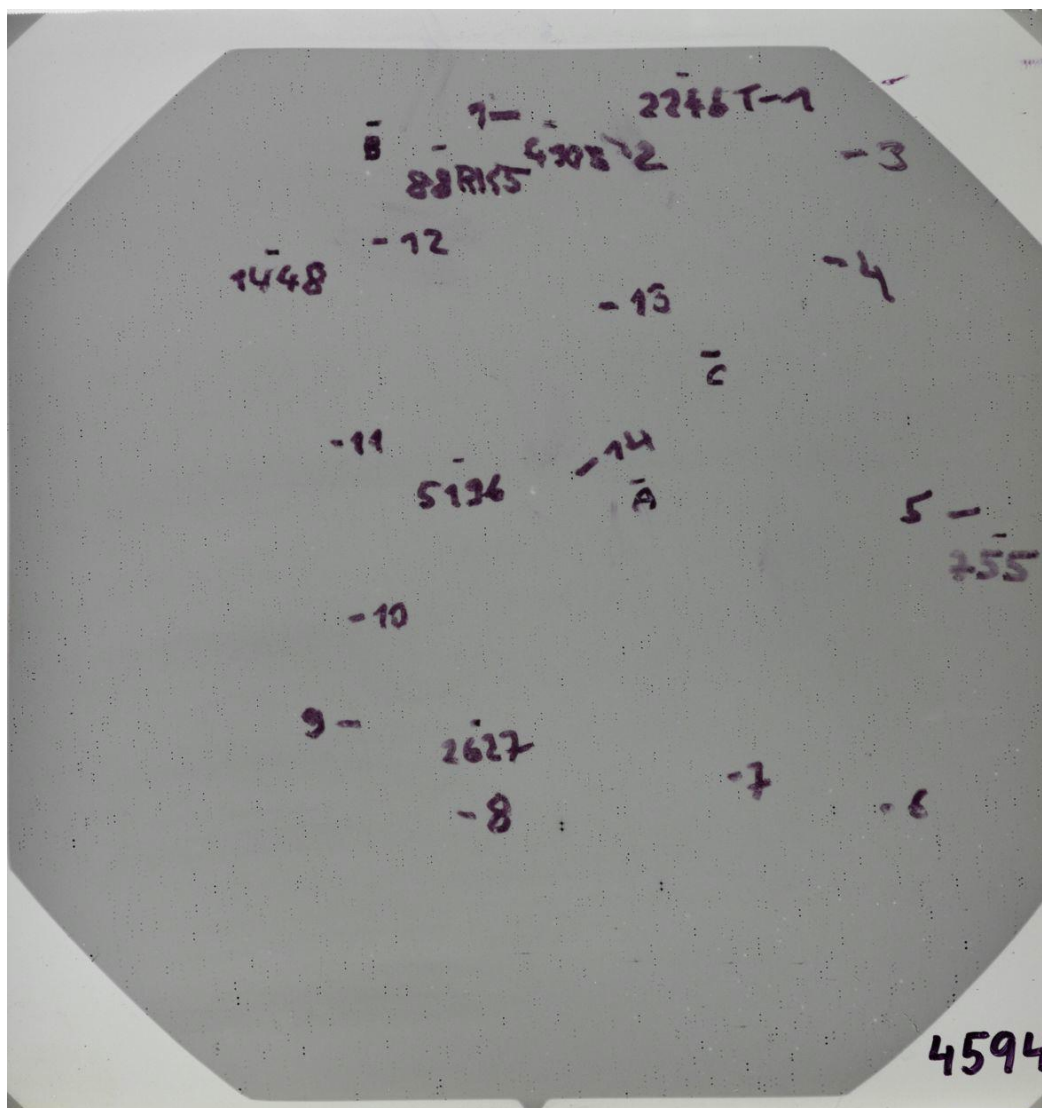
Při prvním použití dalekohledu pro astrometrické účely byl dalekohled pomocným prostředkem u již dříve používané „zakreslovací“ technologii. Polohy objektů pozorované dalekohledem se zakreslovaly do mapy či jiné pomůcky, aby byly následně změřeny a převedeny na astronomické souřadnice. Podobnou technologií byla objevena v roce 1801 i první planetka Ceres, kdy při mapování oblohy byl zjištěn pohyb jednoho ze sledovaných objektů, ze kterého se následně vyklubal objekt dosud neznámého typu – planetka.

Nevýhodou byla možnost kombinace chyb – prvním zdrojem chyb bylo vlastní zobrazení a zakreslení, a druhým zdrojem chyb byla následná analýza a vlastní měření.

Pasážník je vlastně „průhledový dalekohled“, který se otáčí obvykle pouze v jedné rovině, a to v rovině poledníku. Oproti předchozím metodám jsou zde dvě měřené veličiny – úhel a čas. Jako základ slouží měření přesného času průchodu objektu místním poledníkem. Z této veličiny při znalosti hvězdného času určíme přesnou rektascenzi objektu. Druhou měřenou veličinou je úhel, kterým je v tomto případě výška objektu nad obzorem, která nám při znalosti zeměpisné šířky poskytne druhý potřebný údaj, deklinaci objektu. Upravený pasážník, otáčející se ve dvou rovinách, výškové a azimutální, nám může poskytnout informaci nejen o výšce objektu nad obzorem, ale i o jeho azimutu. Oproti klasickému „průchodnímu“ pasážníku může takto upravený přístroj pozorovat po celé obloze, a nejen přesně nad jihem. Je tudíž z praktického hlediska výhodnější, než pravý pasážník.

2.1 Technologický zlom aneb od oka k fotografii a CCD

Všechny doposud zmíněné technologie astrometrie měly jednu podstatnou nevýhodu. Pozorování byla závislá na kvalitě pozorovatele a získaná data se nedala obvykle opakovaně ověřit při stávajících možnostech ani při objevu nových technologií. To se změnilo koncem 19. století, kdy do astronomie nastoupila fotografie. Objekty byly zaznamenány na fotografické desce a mohlo tak být prováděno i několik astrometrických měření s použitím různých přístrojů či měření opakovaná. Takto se dají zpětně na nové objekty zpracovávat i v minulosti nasnímané archivované desky. Jejich obrovskou výhodou byl, s ohledem na možnost delších expozic, dosah na okem nepozorovatelné objekty a zároveň možnost napozorovaná data archivovat a zpracovávat následně. Zároveň byly vyvinuty přesnější matematické metody na výpočet astronomických souřadnic na nebeské sféře z kartézských souřadnic měřených na fotografických filmech či skleněných deskách [6].



Obr. 1: Fotografická deska (Zdroj: Observatoř Klet')

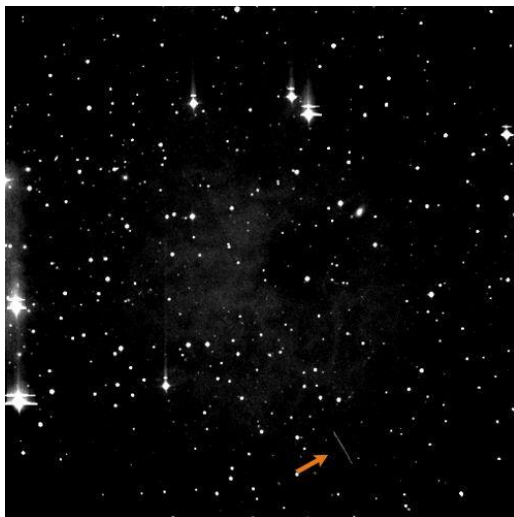
V polovině osmdesátých let dvacátého století byla postupně fotografická technologie nahrazena elektronickým záznamem obrazu – CCD čipy (CCD = Charge-Coupled Device neboli zařízení s vázanými náboji). Principy a technologie zpracování i archivace obrazu zůstaly prakticky nezměněné.

Při záznamu obrazu je zde využito fotoefektu, kdy dochází v polovodičovém materiálu vlivem absorpce fotonu k vyražení elektronu a tím pádem změně vodivosti daného pixelu, čili prvku matice polovodičového prvku.



Obr. 2: Moderní CCD kamera (Zdroj:Finger Lake Instruments)

Výsledně je pomocí AD převodníku počet zachycených fotonů skrze elektrony převeden na ADU jednotky a z hodnot na jednotlivých pixelech je sestaven celý snímek. Nové materiály umožňují kvantovou účinnost CCD čipů přesahující 90 procent (pro porovnání, fotografická deska má kvantovou účinnost cca 1 procento, neozbrojené lidské oko cca 0,1 procenta) [7, 3]. Menší nevýhodou oproti fotografii je horší jemnost obrazu, která je dána rozměry jednotlivých pixelů. Ale tato nevýhoda je kompenzována metodami digitálního zpracování obrazu.



Obr. 3: CCD snímek (s označeným rychle se pohybujícím objektem)(Zdroj:Observatoř Klet)

Otázkou ale zůstává archivovatelnost dat. U fotografických desek je způsob archivace ověřen více než stopadesátiletou praxí. U počítačových CCD snímků je otázka kompatibility – čili, zda nyní pořízené snímky budeme schopni počítačově přečíst za deset, dvacet let, protože kvalitní elektronické ukládání dat je v plenkách (za posledních patnáct let se přešlo od archivace na disketách, přes magnetické pásky, k CCD a DVD, a nyní k velkým datovým polím, tvořených speciálními pevnými disky).

Tab. 1: Astrometrická přesnost (Zdroj: Minor Planet Center, IAU)

Pozorovatel	Technika	datum	Přesnost
Hipparchos	Sextant (vizuálně)	150 př.n.l.	5'
Tycho Brahe	Kvadrant (vizuálně)	1600	1'
Flamsteed	Zední kvadrant (dalekohled)	1700	10"
Bradley	Upravený kvadrant (dalekohled)	1750	0,5"
Bessel	Optický heliometr (dalekohled)	1835	0,1"
Schlesinger et al.	Fotografie	1920	0,05"
USNO et al.	Fotografie	1970	5 mas
USNO et al.	CCD astrometrie	2000	1 mas
Hipparcos	Družicová astrometrie	1990	1 mas
HST	FGS	2000	0,5 mas
interferometrie	LBI	2000	100 μ as
GAIA	Družicová astrometrie	2013	10 μ as
SIM	Vesmírná interferometrie	2009	1 μ as

2.2 Současný stav a používané metody

Pokud jde o astrometrii těles ve sluneční soustavě, používají se standardně pro určování astronomických souřadnic rovníkové souřadnice druhého druhu (viz. Kapitola Souřadnicové systémy), tj. rektascenze a deklinace, a to obvykle pro ekvinokcium J2000.0.

Jde-li o vlastní astrometrii těles na snímcích, pro transformaci rovinných souřadnic na snímku na kulové souřadnice na obloze, neboli v tomto případě rovníkové druhého druhu, se

používá buď lineární transformace, to v případě malých zorných polí a dostatečného počtu a kvalitního rozložení referenčních hvězd, tak i kvadratická transformace, která je vhodnější pro nepříznivé podmínky, čili hlavně horší rozložení referenčních hvězd vůči astrometrovanému objektu případně pro větší zorná pole nad cca 15 x 15 úhlových minut.

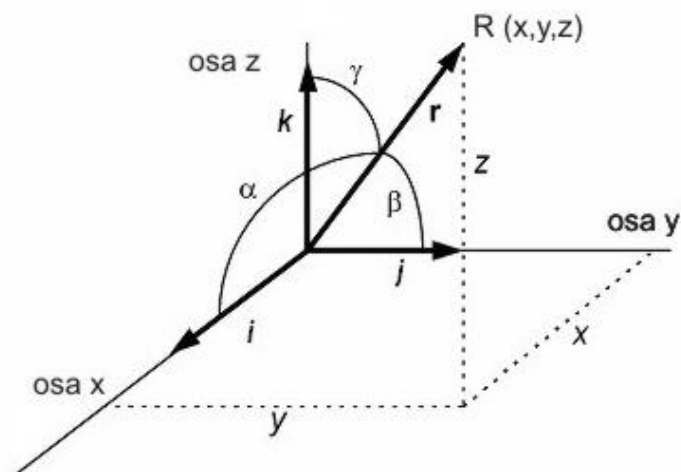
Výhodou současné poziční astrometrie je skutečnost, že již existuje dostatečné množství kvalitních katalogů referenčních hvězd, nadto i s velice vhodným rozložením hvězd po obloze, čímž je umožněna celooblohová kvalitní a velice přesná a rychlá astrometrie.

3 Souřadnicové systémy

Polohu libovolného bodu v trojrozměrném prostoru je možné popsat pomocí různých typů souřadnic. V astronomii se nejčastěji používají dva systémy souřadnic – pravoúhlá souřadnicová soustava a souřadnicová soustava sférická [1,2,9]. Jiné druhy souřadnic se ukázaly jako méně praktické. V počítačové éře lze ale používat prakticky libovolné systémy.

3.1 Pravoúhlá souřadnicová soustava

Tři navzájem kolmé vektory i, j, k s počátkem v jediném bodě tvoří pravoúhlu neboli ortogonální souřadnicovou soustavu. Dané vektory, které určují tento souřadnicový systém, jsou na sobě nezávislé. Přímkami, které jsou nositelkami vektorů i, j, k se nazývají souřadnicové osy. Obvykle je označujeme jako osy x, y a z .



Obr. 4: Pravoúhlý souřadnicový systém

Polohu libovolného bodu R můžeme jednoznačně vyjádřit jako lineární kombinaci jednotkových vektorů i, j, k . Pokud máme bod R jako koncový bod vektoru r s začátkem v počátku souřadnicového systému, dostaneme

$$r = x \cdot i + y \cdot j + z \cdot k \quad (3.1)$$

Veličiny x, y, z označujeme jako souřadnice bodu R , neboli $R(x,y,z)$. Úhly α, β, γ jsou úhly, které svírá vektor r s jednotlivými souřadnicovými osami. Souřadnice jednotkového

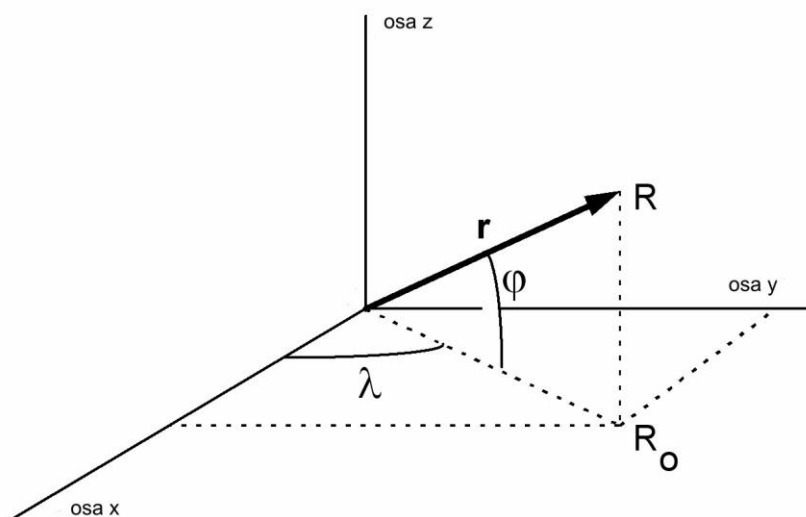
vektoru nazýváme směrové kosíny. Je zřejmé, že jednotkový vektor splňuje následující podmínku:

$$x^2 + y^2 + z^2 = 1 \quad (3.2)$$

Souřadnicová soustava může mít dvojí orientaci. Pravotočivá, kdy při pohledu od konce osy z se dostaneme od osy x k ose y pootočením o 90° v matematicky kladném směru, čili proti směru otáčení hodinových ručiček. Druhou orientací je levotočivá soustava, která má orientaci os přesně obráceně.

3.2 Sférická souřadnicová soustava

Sférická souřadnicová soustava je tvořena základní rovinou a základním směrem, jehož počátek leží v základní rovině soustavy. Za základní rovinu se obvykle používá rovina xy , za základní směr se používá směr osy x . Poloha bodu R v trojrozměrném prostoru je pak určena trojicí souřadnic, kde r představuje délku průvodiče \mathbf{r} , úhel λ představuje úhel mezi osou x a průmětem průvodiče \mathbf{r} do roviny xy , a konečně úhel φ , který představuje úhel mezi průvodičem \mathbf{r} a rovinou xy . Veličiny r , φ a λ se označují jako sférické souřadnice bodu R neboli $R(r, \varphi, \lambda)$.



Obr. 5: Sférická souřadnicová soustava

V případě, že má vektor R počátek v počátku souřadného systému, dostaneme následující:

$$\begin{aligned}R_0 &= r \cos \varphi \\x &= R_0 \cos \lambda \\y &= R_0 \sin \lambda \\z &= r \sin \varphi\end{aligned}\tag{3.3}$$

A dále pak pro x, y, z dostaneme následující vztah:

$$\begin{aligned}x &= r \cos \varphi \cos \lambda \\y &= r \cos \varphi \sin \lambda \\z &= r \sin \varphi\end{aligned}\tag{3.4}$$

Inverzní převodní vztahy mají následující tvar:

$$\begin{aligned}r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \lambda &= \arctan \frac{x}{y} \\ \varphi &= \operatorname{arc cot} \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \arcsin \frac{z}{r}\end{aligned}\tag{3.5}$$

Souřadnicové soustavy můžeme umístit a orientovat v prostoru prakticky libovolným způsobem. Obvykle se jako počátek souřadnicového systému používá například střed Země či střed Slunce, případně hmotný střed sluneční soustavy.

4 Astronomické souřadnice

Nejen pro orientaci na obloze, ale hlavně z důvodu schopnosti vzájemně komunikovat mezi sebou, používají astronomové jednotný systém astronomických souřadnic [2,9].

Pomocí astronomických souřadnic definujeme či určujeme polohu těles na obloze, polohu na nebeské sféře. A to pro jakékoliv těleso ať již umělé, vytvořené lidmi, nebo těleso sluneční soustavy či naší Galaxie, nebo objekt na okraji pozorovatelného vesmíru. Abychom mohli zavést souřadnicovou soustavu, v tomto případě s ohledem na myšlenou nebeskou klenbu nad našimi hlavami sférickou, musíme zvolit tuto sféru (vlastně by se dalo říci povrch koule) s určitým rozměrem a základními směry jednotlivých rovin, které lze matematicky a případně fyzikálně definovat. Pokud jde o rozměr sféry, je vhodné ji zvolit jednotkovou, ušetříme si tím řadu problémů s následnými přepočty.

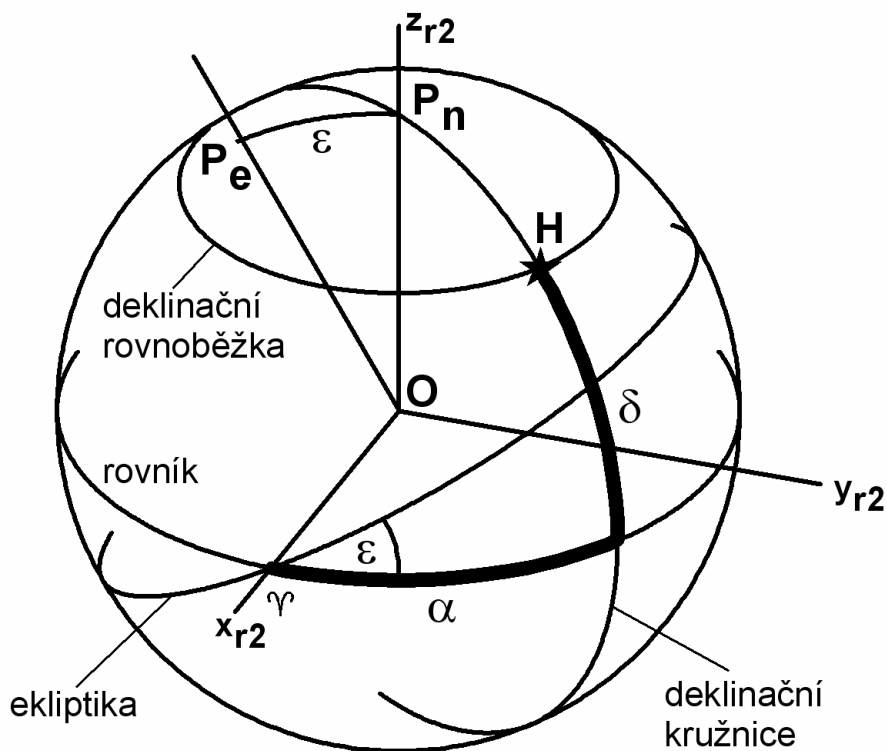
Používané souřadné systémy jsou obzorníkové, rovníkové I. druhu, rovníkové II. druhu, ekliptikální a galaktické, Jelikož se v daném oboru prakticky výhradně používají rovníkové souřadnice II. druhu, popíšeme si jen je.

4.1 Rovníkové souřadnice II. druhu

Rovníkové souřadnice II. druhu je již souřadnicový systém nezávislý na poloze pozorovatele na Zemi a času pozorování (samozřejmě pomineme-li topocentricko-geocentrické přepočty a precesní a nutační pohyby).

Základním směrem je směr rotační osy Země, která protíná jednotkovou kouli přesně v bodech - severním a jižním světovém pólu. Základní rovinou je rovina světového rovníku, čili průmět zemského rovníku na nebeskou sféru. Polohu objektu vůči světovému rovníku určuje souřadnice, která se nazývá deklinace a značí se δ . Deklinace je úhlová vzdálenost objektu od světového rovníku měřena podél deklinační kružnice. Deklinace se uvádí v úhlových stupních a nabývá hodnot od -90° do $+90^\circ$. Pro severní polokouli platí kladné hodnoty, pro jižní polokouli se deklinace udává v záporných hodnotách. Roviny rovnoběžné s rovinou rovníku protínají jednotkovou kouli v kružnicích, která nazýváme deklinační

rovnoběžky. Po těchto rovnoběžkách vykonávají objekty svůj zdánlivý denní pohyb jako obraz skutečné rotace Země.



Obr. 6: Rovníkové souřadnice II. druhu

Druhá rovina je následující. Prvně si musíme nadefinovat pomocnou kružnici. Země obíhá kolem Slunce v rovině, která svírá s rovinou světového rovníku úhel přibližně $23,5^\circ$. Tato rovina se nazývá rovinou ekliptiky, a daný úhel svírá ekliptika se světovým rovníkem. Pozorovateli na zemském povrchu se skutečný pohyb Země kolem Slunce jeví jako zdánlivý roční pohyb Slunce po obloze, a to právě po této kružnici, kterou nazýváme ekliptika.

Ekliptika protíná světový rovník ve dvou bodech. Průsečík, kterým prochází Slunce v den jarní rovnodennosti se nazývá jarní bod. Tento bod se obvykle označuje astrologicko-astronomickým symbolem znamení Berana. Druhý průsečík, kde se nalézá Slunce v den podzimní rovnodennosti, se logicky nazývá podzimní bod a značí se astrologicko-astronomickým symbolem Vah.

Pomocnou základní rovinou rovníkových souřadnic II. druhu je deklinační rovina procházející právě jarním bodem. Takto vytvořenou deklinační kružnici zvolíme jako základní, nulovou (podobně jako v zeměpisných souřadnicích souřadnice nultého poledníku v Greenwichi). Polohu objektů v této souřadné soustavě určujeme pomocí již předem definované deklinace δ a rektascenze α . Rektascenze představuje úhel mezi deklinační rovinou procházející měřeným objektem a deklinační rovinou procházející jarním bodem. Měří se v matematicky kladném směru, čili proti směru otáčení hodinových ručiček. Dalo by se i říci, že roste od jihu směrem k východu. Rektascenze je měřena v úhlových jednotkách a může tak nabývat hodnot od 0° do 360° . Obvykle se udává v hodinové míře, čili nabývá hodnot od 0 hodin po 24 hodin.

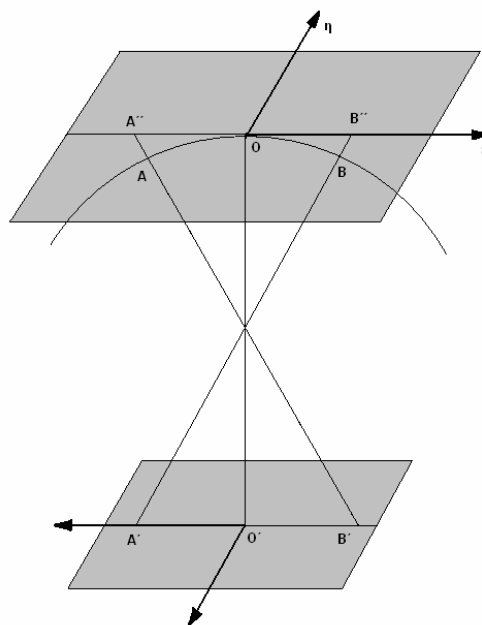
Rovníkové souřadnice II. druhu jsou obecně nezávislé na místě pozorování a i na čase pozorování. Ale pro přesnost musíme uvést, že tato nezávislost není úplná. V případě těles sluneční soustavy má na výslednou polohu na obloze vliv přepočít geocentrických poloh na topocentrické, čili na poloze pozorovatele na Zemi je v tomto případě tato souřadná soustava závislá. A je zde i určitá závislost na čase, protože na přesné souřadnice má vliv nutace a precese, neboli pohyby souřadné soustavy způsobené změnami polohy rotační osy Země. Naštěstí, obojí jsme schopni vyjádřit matematicky a tudíž poměrně snadno transformovat polohu objektu na obloze v jednom místě na místo jiné.

5 Gnómonická projekce

Abychom mohli spočítat sférické souřadnice nasnímaných objektů, v našem případě rovníkové souřadnice druhého druhu - rektascenzi α a deklinaci δ , ať už na fotografických nebo CCD snímcích, musíme nejdříve zjistit, jakým způsobem se zobrazí do roviny snímku. Průmět kulové sféry, která představuje hvězdnou oblohu, na tečnou rovinu, představující buď fotografickou desku či CCD čip, se nazývá gnómonická projekce [1,9].

5.1 Vlastní projekce

Pro vztah mezi sférickými souřadnicemi objektů α a δ na nebeské sféře a pravouhlými kartézskými souřadnicemi x , y obrazu těchto objektů na snímku zavedeme tzv. ideální či standardní souřadnice ζ a η . Ideální souřadnice určují tečnou rovinu snímku σ , která je rovnoběžná s rovinou záznamového zařízení, tj. fotografické desky nebo CCD čipu. Tečná rovina se dotýká nebeské sféry v bodě O , který má souřadnice α_0 a δ_0 . Do tohoto bodu směřuje optická osa záznamového zařízení, přesně z bodu O' . Body A a B na nebeské sféře představují objekty o souřadnicích α a δ , jejich projekce do roviny je A' a B' a projekce do tečné roviny představují body A'' a B'' .



Obr. 7: Gnómonická projekce

Transformační rovnice rovníkových souřadnic druhého druhu a ideálních souřadnic tedy vycházejí z rovnic sférické trigonometrie.

Transformační rovnice pro ξ :

$$\xi = \frac{\cot \delta \sin(\alpha - \alpha_0)}{\sin \alpha_0 + \cot \delta \cos \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)} = \frac{\cos \delta \sin(\alpha - \alpha_0)}{\sin \alpha_0 \sin \delta + \cos \delta \cos \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)}. \quad (5.1)$$

Transformační rovnice pro η :

$$\eta = \frac{\cos \delta_0 - \cot \delta \sin \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)}{\sin \alpha_0 + \cot \delta \cos \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)} = \frac{\cos \delta_0 \sin \delta - \cos \delta \sin \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)}{\sin \alpha_0 \sin \delta + \cos \delta \cos \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)}. \quad (5.2)$$

Souřadnice α_0 a δ_0 jsou souřadnice bodu O , ve kterém se tečná rovina dotýká nebeské sféry, ale jsou to zároveň i souřadnice geometrického středu snímku.

Sférické souřadnice z gnómonických souřadnic vypočítáme použitím inverzních transformačních vztahů:

$$\cot \delta \sin(\alpha - \alpha_0) = \frac{\xi \sec \delta_0}{\eta + \tan \delta_0} = \frac{\xi}{\eta \cos \delta_0 + \tan \delta_0 \cos \delta_0}, \quad (5.3)$$

$$\cot \delta \cos(\alpha - \alpha_0) = \frac{1 - \eta \tan \delta_0}{\eta + \tan \delta_0}. \quad (5.4)$$

Úpravou dostaneme:

$$\tan(\alpha - \alpha_0) = \frac{\eta \cos \delta_0 + \tan \delta_0 \cos \delta_0}{\xi}, \quad (5.5)$$

$$\tan \delta = \frac{\eta + \tan \delta_0}{1 + \eta \tan \delta_0} \cos(\alpha - \alpha_0). \quad (5.6)$$

V případě malého zorného pole, pro které platí $[\alpha - \alpha_0] \ll 0,1 \text{ rad}$ a $[\delta - \delta_0] \ll 0,1 \text{ rad}$ (jak je vidět, toto lze použít pouze pro maloplošná CCD zobrazení) můžeme použít následující zjednodušených vztahů. Rovnice (3.1) a (3.2) aproximujeme do tvaru:

$$\xi \approx (\alpha - \alpha_0) \cos \delta_0, \quad (5.7)$$

$$\eta \approx (\delta - \delta_0). \quad (5.8)$$

Pro inverzní transformaci dostaneme aproximaci:

$$(\alpha - \alpha_0) \approx \xi \sec \delta_0 \rightarrow \alpha \approx \alpha_0 + \frac{\xi}{\cos \delta_0} \quad (5.9)$$

$$\delta \approx \delta_0 + \eta \quad (5.10)$$

5.2 Transformace souřadnic

Měřené kartézské standardní souřadnice x a y se od ideálních gnómonických souřadnic ξ , η poměrně liší. Souřadnice jsou vůči sobě posunuty a pootočený. Ideální souřadnice jsou v jiných jednotkách než měřené souřadnice a mají i jiné měřítko. Abychom získali stejné jednotky u ideálních souřadnic i u měřených souřadnic, musíme ideální souřadnice opravit o měřítko. Toto měřítko určíme podílem vzdáleností mezi n -tým a m -tým měřeným objektem. Vzdálenosti objektů dosazujeme v ideálních a naměřených souřadnicích. Pro následný výpočet měřítka platí vztah:

$$c = \sqrt{\frac{(\xi_n - \xi_m)^2 + (\eta_n - \eta_m)^2}{(x_n - x_m)^2 + (y_n - y_m)^2}}, \quad n, m = 1, \dots, N \quad (5.11)$$

Po dosazení několika vzdáleností referenčních objektů získáme aritmetickým průměrem měřítko v jednotkách pixel na úhlové vteřiny nebo v jednotkách úhlová vteřina na pixely. Pokud jde o měření na fotografických deskách, je to ekvivalent měření CCD snímků (metoda měření CCD snímků je odvozena od metod fotografických), jedinou změnou je měřítko, které se udává v úhlových vteřinách na milimetr, čili "/mm. Lepší metodou je užití metody nejmenších čtverců, která dává přesnější výsledky pro celé zobrazené pole.

Po spočtení měřítka máme obojí souřadnice již ve stejném měřítku, ale stále jsou vůči sobě posunuté a pootočené. Jako další krok uijeme dvourozměrnou lineární transformaci.

Máme-li ideální souřadnice ξ, η oproti měřeným souřadnicím x, y pootočený o úhel α a jsou-li vzájemně posunuty o hodnoty x_0, y_0 , platí pro ně vztahy:

$$\xi = c(x_0 + Bx - Ay), \quad (5.12)$$

$$\eta = c(y_0 + Ax + By), \quad (5.13)$$

kde c je měřítko, $A = \sin \alpha$ a $B = \cos \alpha$.

Použijeme-li maticový zápis, dostaneme:

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} = c \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} + c \begin{pmatrix} B & -A \\ A & B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (5.14)$$

Ve vektorové formě dostaneme následující:

$$\vec{r}_{(\xi, \eta)} = c(\vec{r}_0 + M\vec{r}_{(x, y)}), \quad (5.15)$$

kde $\vec{r}_{(\xi, \eta)}$ je polohový vektor ideálních souřadnic, \vec{r}_0 je polohový vektor vzájemného posunutí souřadnic, $\vec{r}_{(x, y)}$ je polohový vektor změřených souřadnic a M představuje matici otočení:

$$M = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (5.16)$$

V transformaci se objevují čtyři neznámé x_0, y_0, A a B , které představují tzv. deskové konstanty. Je potřeba najít co nejpřesnější hodnoty těchto konstant, abychom docílili toho, že se budou ideální souřadnice překrývat s naměřenými souřadnicemi, nebo alespoň budou ležet v jejich těsné blízkosti. K minimalizování vzdálenosti mezi jednotlivými souřadnicemi, tedy k nalezení deskových konstant, uijeme metodu nejmenších čtverců.

Chceme docílit, aby součet čtverců odchylek byl pro všechny body měření minimální, neboli aby výsledné měření bylo co nejméně zatíženo chybou metody. Jestliže budeme vycházet z transformačních rovnic, které jsou vynásobené měřítkem:

$$\xi = c(x_0 + Bx - Ay) = C + Bx' - Ay' \quad (5.17)$$

$$\eta = c(y_0 + Ax + By) = D + Ax' + By', \quad (5.18)$$

potom pro N hvězd bude součet čtverců odchylek ve tvaru:

$$S = \sum_{i=1}^N \left\{ \left[(C + Bx'_i - Ay'_i) - \xi_i \right]^2 + \left[(D + Ax'_i + By'_i) - \eta_i \right]^2 \right\} \quad (5.19)$$

Funkci $S(ABCD)$ minimalizujeme tak, aby parciální derivace funkce podle proměnných A, B, C, D byly rovny nule. Minimum se tudíž bude nacházet v bodě, pro nějž platí:

$$\frac{\partial S}{\partial A} = 0 \quad \frac{\partial S}{\partial B} = 0 \quad \frac{\partial S}{\partial C} = 0 \quad \frac{\partial S}{\partial D} = 0, \quad (5.20)$$

Po dosazení do parciálních derivací dostaneme následující rovnice:

$$\frac{\partial S}{\partial A} = \sum_{i=1}^N 2 \left[(C + Bx'_i - Ay'_i - \xi_i)(-y'_i) + (D + Ax'_i + By'_i - \eta_i)(x'_i) \right] = 0 \quad (5.21)$$

$$\frac{\partial S}{\partial B} = \sum_{i=1}^N 2 \left[(C + Bx'_i - Ay'_i - \xi_i)(x'_i) + (D + Ax'_i + By'_i - \eta_i)(y'_i) \right] = 0 \quad (5.22)$$

$$\frac{\partial S}{\partial C} = \sum_{i=1}^N 2(C + Bx'_i - Ay'_i - \xi_i) = 0 \quad (5.23)$$

$$\frac{\partial S}{\partial D} = \sum_{i=1}^N 2(D + Ax'_i + By'_i - \eta_i) = 0 \quad (5.24)$$

Pomocí úprav dostaneme:

$$-C \sum_{i=1}^N y_i' + A \sum_{i=1}^N (y_i')^2 + (x_i')^2 + D \sum_{i=1}^N x_i' = \sum_{i=1}^N \eta_i x_i' - \xi_i y_i' \quad (5.25)$$

$$C \sum_{i=1}^N x_i' + B \sum_{i=1}^N (x_i')^2 + (y_i')^2 + D \sum_{i=1}^N y_i' = \sum_{i=1}^N \xi_i x_i' + \eta_i y_i' \quad (5.26)$$

$$NC + B \sum_{i=1}^N x_i' - A \sum_{i=1}^N y_i' = \sum_{i=1}^N \xi_i \quad (5.27)$$

$$ND + A \sum_{i=1}^N x_i' + B \sum_{i=1}^N y_i' = \sum_{i=1}^N \eta_i \quad (5.28)$$

Soustavu lineárních rovnic můžeme přepsat do maticového tvaru:

$$HI = V, \quad (5.29)$$

kde

$$H = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N (x_i')^2 + (y_i')^2 & 0 & -\sum_{i=1}^N y_i' & \sum_{i=1}^N x_i' \\ 0 & \sum_{i=1}^N (x_i')^2 + (y_i')^2 & -\sum_{i=1}^N x_i' & \sum_{i=1}^N y_i' \\ -\sum_{i=1}^N y_i' & \sum_{i=1}^N x_i' & N & 0 \\ \sum_{i=1}^N x_i' & \sum_{i=1}^N y_i' & 0 & N \end{pmatrix}, \quad (5.30)$$

$$I = \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix}, \quad (5.31)$$

$$V = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N \eta_i x_i' - \xi_i y_i' \\ \sum_{i=1}^N \xi_i x_i' + \eta_i y_i' \\ \sum_{i=1}^N \xi_i \\ \sum_{i=1}^N \eta_i \end{pmatrix}. \quad (5.32)$$

Po dosazení do předchozích rovnic dostaneme hledané koeficienty, neboli deskové konstanty, které poslouží k výpočtu rovníkových souřadnic II . druhu čili rektascenze α a deklinace δ měřeného objektu.

6 Astrometrické katalogy

Pro potřeby přesné astrometrie objektů na obloze byly postupně vytvořeny astrometrické katalogy, a to včetně zdánlivých pohybů referenčních objektů – hvězd či vzdálených galaxií. Následuje přehled astrometricky nejpoužívanějších katalogů, včetně jejich stručného popisu. Představuji zde pouze celoplošné katalogy, nikoliv specializované přesnější katalogy určené pro speciální účely [10].

6.1 SAO (Smithsonian Astrophysical Observatory Star Catalog)

SAO katalog – The Smithsonian Astrophysical Observatory Star Catalog – byl poprvé publikován v roce 1966 a obsahuje celkem 258 997 referenčních hvězd. Byl vhodný pro fotografickou technologii, protože obsahoval hvězdy do cca 10. magnitudy a to včetně jejich relativních pohybů, a informaci o jasnosti objektu a jeho spektrální třídě.

6.2 AGK3

AGK3 katalog neboli Astronomische Gesellschaft Katalog No.3 pokrývá celou severní oblohu až po deklinaci $-2,5^\circ$. Celkem obsahuje 183 145 objektů se standardní chybou určení polohy $0,021''$ a chybou v určení relativního pohybu $0,010''/\text{rok}$. Používal se obvykle jako doplněk k SAO katalogu pro zajištění lepšího pokrytí hvězdami zobrazovaného pole.

6.3 PPM (Positions and Proper Motions Star Catalogue)

Katalog PPM nahradil v devadesátých letech dvacátého století SAO katalog a katalog AGK3. Byl vytvořen v Astronomisches Rechen Institut v Německu. Katalog obsahuje 181 731 referenčních hvězd, čili jeho plošná hustota je 8,6 hvězdy na čtvereční stupeň pro severní polokouli, a 197 179 referenčních hvězd, čili 9,7 hvězdy na čtvereční stupeň pro jižní polokouli. Z toho je patrné, že byl opět určen pro velkoformátovou fotografickou astrometrii. Formální chyby v přesnosti pozic jsou $0,30''$ pro severní část a $0,16''$ pro jižní část oblohy. Nyní se již s ohledem na přechod od fotografické na CCD astrometrii prakticky nepoužívá.

6.4 GSC

The Hubble Guide Star Catalog vznikl v roce 1990 na základě potřeby navigace Hubblova kosmického teleskopu. Ve verzi 1.2 obsahuje astrometrické údaje pro cca 19 milionů referenčních objektů až do 19. magnitudy (nelze psát hvězd, protože katalogy tohoto typu používají jako referenční objekty jak hvězdy, tak například i vzdálené galaxie, které mají na snímcích též „hvězdný“ čili bodový vzhled, proto tento termín používám i v následujících katalozích již bez tohoto zdůvodnění). Tento katalog je s ohledem na množství referenčních objektů vhodný i pro maloplošnou CCD astrometrii. Nevýhodou je absence vlastních pohybů referenčních objektů. Z tohoto důvodu klesá s časem přesnost astrometrie při užití tohoto katalogu. Pro epochu katalogu – 1992,0 – byla přesnost na úrovni 500 mas. S ohledem na poměrně malý počet hvězd a absenci vlastních pohybů byl v CCD astrometrii nahrazen jinými katalogy z produkce The United States Naval Observatory (USNO).

6.5 USNO A-2.0

Katalog USNO-A2.0 obsahuje astrometrické a fotometrické údaje o 526 230 881 objektech. Informace o polohách byly získány na základě tří fotografických přehlídek oblohy, a to Palomar Optical Sky Survey (POSS-I), Science Research Council (SRC)-J survey a the European Southern Observatory (ESO)-R survey. Stejně jako předchozí GSC katalog neobsahuje informace o vlastních pohybech objektů, ale jeho výhodou je vyšší plošná hustota referenčních objektů. Poziční chyby na epochu pořízení byly blízko 250 mas, čili má tento katalog asi dvojnásobnou přesnost než katalog GSC.

6.6 Hipparcos

Katalog Hipparcos je prvním katalogem, kde byly přesné polohy objektů měřeny pomocí specializované družice – satelitu Hipparcos. S ohledem na pozorování mimo vliv zemské atmosféry jsou získané polohy i vlastní pohyby extrémně přesné. Širšímu využití ale brání poměrně malé množství hvězd – katalog jich obsahuje pouze 118 218, s přesností 1-3 mas v polohách na danou epochu, a pokud jde o vlastní pohyby, tam je chyba 1-2 mas/rok. Tento katalog však slouží jako etalon pro vytváření dalších katalogů na základě celooblohových přehlídek.

6.7 Tycho-2

Katalog Tycho-2 je navázán na superpřesný katalog Hipparcos. Obsahuje celkem 2,5 milionu hvězd a vznikl spoluprací univerzitní observatoře v Kodani a USNO. Je to opět kompilát ze 140 jiných katalogů. Obsahuje 99% hvězd do jasnosti $m_V = 11,0$ mag a 95% hvězd do jasnosti $m_V = 11,5$ mag. Přesnosti určení poloh se pohybují v rozmezí 10 až 100 mas, v závislosti na jasnosti objektu. Přesnost vlastních pohybů je od 1 do 3 mas. Katalog kombinuje družicová data s daty získanými prostřednictvím pozemských teleskopů.

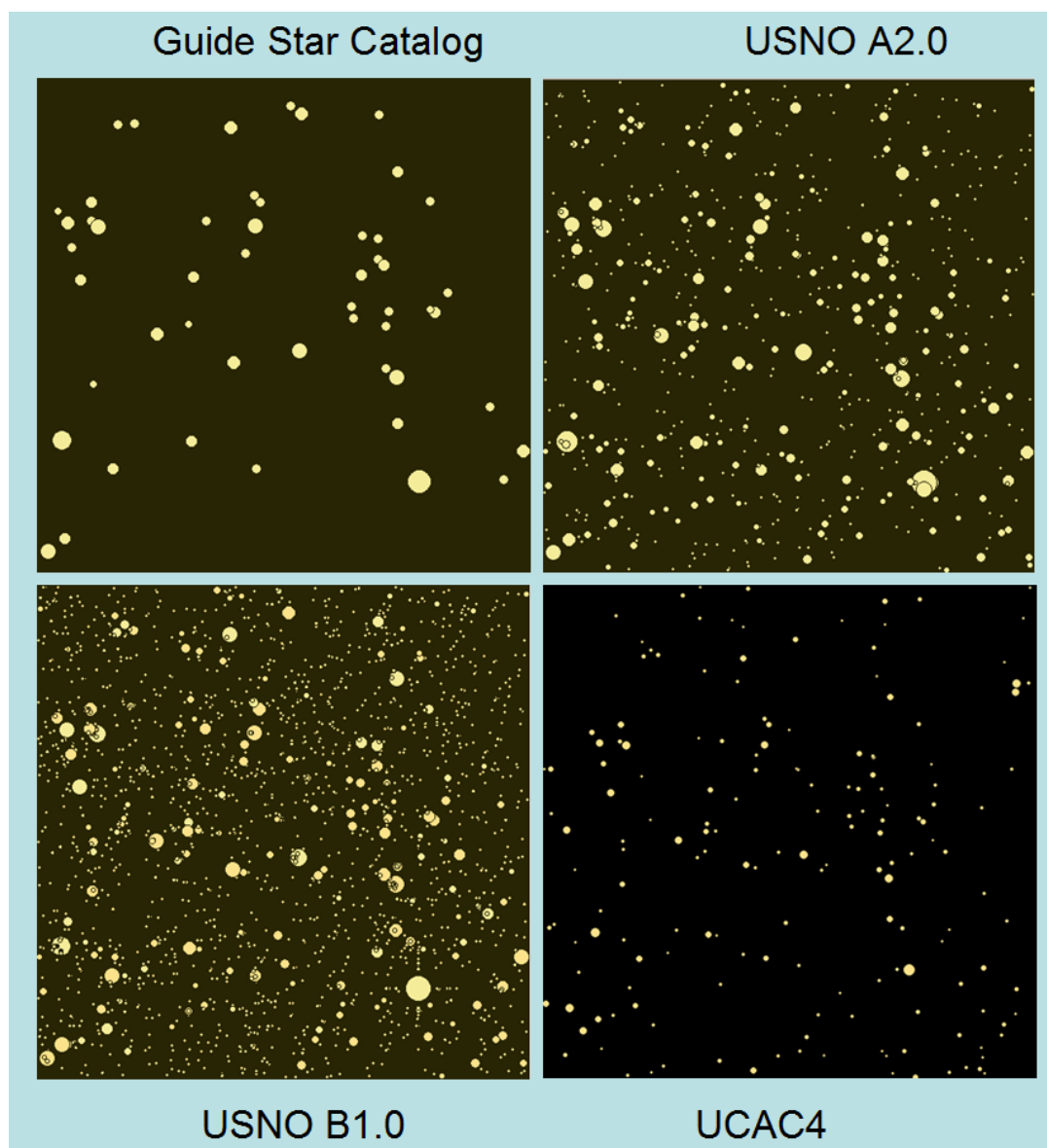
6.8 USNO B-1.0

Katalog USNO-B1.0 je pokračování katalogů ze série USNO-A. Oproti verzi USNO-A jsou zde již ale zahrnuty vlastní pohyby astrometrických objektů. Katalog USNO-B1.0 obsahuje celkem 1 042 618 261 objektů (hvězd a nehvězdných objektů), jejich přesné polohy včetně vlastních pohybů a fotometrických parametrů, které byly změřeny opět z řady fotografických přehlídek oblohy. Střední chyba polohy pro danou epochu je kolem 200 mas. I přes svou velikost, která je cca 80 GB, je tento katalog momentálně jedním ze dvou nejpoužívanějších katalogů v astrometrii malých těles sluneční soustavy.

6.9 UCAC 4

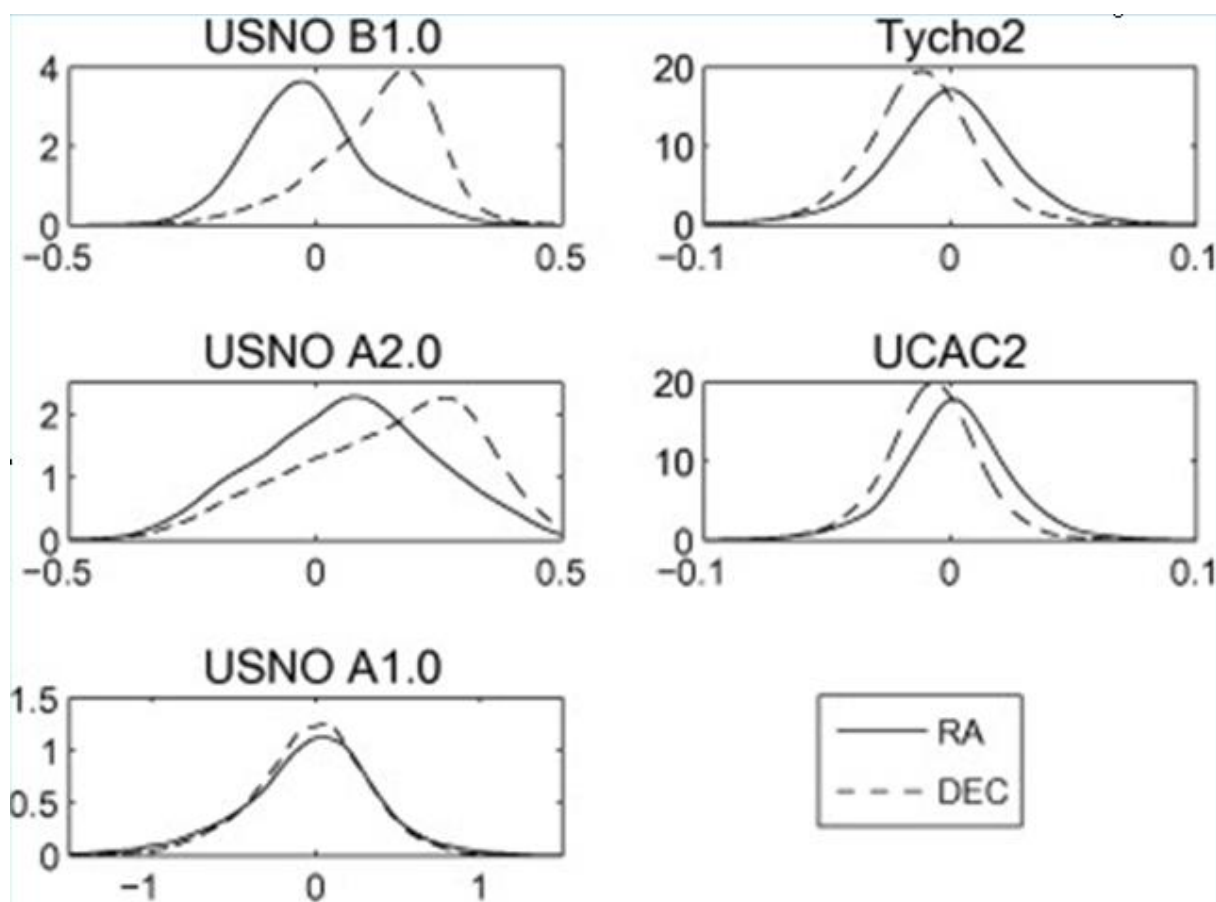
Katalog UCAC4 představuje kompilaci celooblohového katalogu hvězd s jasnostmi od 8. do 16. magnitudy (magnitudy ve spektrální třídě mezi V a R). Jde o velice přesný katalog, kde se přesnost určení polohy hvězd v jasnostech od 10. do 14. magnitudy pohybuje v rozmezí 15 a 20 mas. Pohyby jsou kompilovány užitím 140 jiných katalogů včetně katalogů Hipparcos a Tycho. Celkem obsahuje rovnoměrně rozložených 113 milionů objektů. Je tak řídkší než katalog USNO B-1.0, ale je o polovinu přesnější. Díky přesnosti patří mezi dva nejužívanější katalogy pro astrometrii těles sluneční soustavy.

Obr. 8 nám představuje porovnání hustoty hvězd jednotlivých katalogů. S ohledem na skutečnost, že obvyklé zorné pole teleskopů osazených CCD kamerami je poměrně malé (zorné pole je obvykle v jednotkách, výjimečně v desítkách úhlových minut), je hustota katalogu jedním ze stěžejních parametrů pro přesný astrometrický výpočet.



Obr. 8: Porovnání hustoty hvězd astrometrických katalogů s ohledem na zorné pole teleskopu KLENOT (Zdroj: Observatoř Klet)

Oproti tomu obrázek *Obr. 9* nám ukazuje porovnání středních chyb poloh referenčních hvězd vybraných katalogů, protože kromě počtu referenčních hvězd je pro přesnou astrometrii nutná i vlastní přesnost tohoto katalogu.



Obr. 9: Porovnání středních chyb astrometrických katalogů

Astrometry: Measurement

Star#	RA	Decl	Res.	Mag	Note
1	+0.34	+0.09	+0.35	+0.18	
2	-0.02	+0.07	+0.07	-0.45	
3	+0.19	-0.23	+0.30	-0.48	
4	+0.01	+0.02	+0.02	-0.38	
5	+0.24	+0.03	+0.24	-0.18	
6	+0.06	-0.03	+0.06	-0.15	
7	+0.07	+0.03	+0.07	-0.28	
8	-0.23	+0.06	+0.24	-0.34	
9	+0.27	-0.05	+0.27	-0.41	
10	-0.17	+0.05	+0.18	-0.41	
11	-0.44	-0.34	+0.55	-0.28	
12	+0.46	-0.20	+0.50	+0.13	
13	+0.64	+0.25	+0.69	+0.07	
14	-0.88	+0.38	+0.96	+0.93	
15	-0.17	-0.19	+0.26	-0.40	
16	-0.08	+0.16	+0.18	-0.25	
17	+0.09	+0.23	+0.25	+1.37	
18	-0.18	+0.34	+0.38	-0.65	
19	+0.10	-0.04	+0.10	-0.30	
20	-0.34	-0.78	+0.85	+0.41	
21	+0.01	+0.30	+0.30	+1.07	

Reduction method: Quadratic Mag. Band: R

Note for observation:

Star: No. = 1 / 24 (24 stars used) Catalog: USNO B1.0
 X = 678.58 Y = 668.14 Mag = 14.34 Mag. Corr. = 0.04
 RA. = 11 20 05.65 Decl. = +02 13 37.5 Cat Mag = 14.20

Auto Select Deselect All Use over exposed stars Configure output

Object: Designation: NK0157

Catalog Reduction:
 X = 581.62 ± 0.05
 Y = 668.17 ± 0.05
 R.A. = 11 20 17.20 ± 0.004s
 Decl. = +02 13 54.9 ± 0.05"
 Mag = 16.7 R ± 0.12
 Total error = 0.08"

CCD Reduction:
 Reduction Note:
 Position error: 0.13"
 Peak ratio: 3.33
 S/N ratio: 14.43

UTC: 2003 02 27.06052 Observers: M+K+Q+H

Add MPCline Add DBF object Cancel Save & Exit

F2 - AddMPCline+DBFobject F3 - <F2> without mag in MPCline F10 - Save&Exit

no.	cl	night	teles	ccd	ccdfil	nfram	frame	rect	decl	year	mon	UT	exposit	observ	filter	xy_objects	notice
79		20030226	KT	S300	NK016		1	11.20236	2.1847	2003	2	27.06052	01:00	M+K+Q		NK0157 (582.668)	

NK0157 c2003 02 27.06052 11 20 17.20 +02 13 54.9 16.7 R 246

Obr. 10: Příklad astrometrického výpočtu Projektu KLENOT (Zdroj: Observatoře Klet')[6]

7 Malá tělesa sluneční soustavy

7.1 Planetky a komety

Pokud hovoříme o malých tělesech sluneční soustavy, rozumíme tím planetky a komety. Historie moderního zkoumání celé naší sluneční soustavy je stará jen něco málo přes dvě stě let. Z toho, co dnes označujeme za sluneční soustavu, lidstvo znalo od starověku jen Slunce, Měsíc, pět planet od Merkuru po Saturn, a jasné komety. Čili pouze to, co bylo pohodlně pozorovatelné neozbrojeným okem. Nic dalšího nebylo do konce 18. století známo.

Planetky jsou neoddelitelnou součástí našeho planetárního systému, vznikly současně s velkými objekty a v počátcích hrály, dle posledních výzkumů, jednu z klíčových rolí při transportu vody na Zemi a následně i vzniku života na naší planetě. Výzkum planetek patří mezi mladší astronomické disciplíny. Ačkoliv se o existenci tělesa či těles mezi Marsem a Jupiterem uvažovalo již ve druhé polovině 18. století, byla první planetka sluneční soustavy objevena až 1. ledna 1801 v Palermu italským astronomem Giuseppem Piazzim. Od té doby je známo již více než sedm set tisíc planetek a několik tisíc komet. Většina planetek patří do hlavního pásu. Zde také byly planetky objevovány nejdříve, což je, s ohledem na skutečnost, že se tam nacházejí největší známé planetky, logické. Později byly objevovány také planetky na neobvyklých drahách, například na dráze podobné jako má planeta Jupiter, či planetky blízkozemní, blížící se či dokonce křížující dráhu Země. Postupně se zlepšující technikou byly objevovány planetky i ve vzdálenějších oblastech sluneční soustavy jako jsou Kentauři či transneptunická tělesa.

7.2 Blízkozemní planetky

Blízkozemní planetky, jak již název napovídá, jsou planetky, které se přibližují k Zemi a jejichž přísluní je blíže než 1,3 astronomické jednotky (AU) od Slunce. Dostávají se do blízkosti dráhy Země a některé ji i křížují [5].

Planetky, které se mohou k Zemi přiblížit na méně než 0,05 AU (čili méně než 7,5 milionů kilometrů) a mají větší průměr než 150 m, se označují jako potenciálně nebezpečné planetky – Potentially Hazardous Asteroid (PHA).

Některé z planetek křížujících dráhu Země mají dokonce nenulovou pravděpodobnost srážky se Zemí v následujících sto letech. Takovéto planetky označujeme jako Virtuální impaktory – VI. Zpřesněná dráha neboli větší počet pozorování a delší oblouk pozorování může mít za následek vyřazení planetky z kategorie VI, neboli že pravděpodobnost srážky tohoto tělesa se Zemí se v příštích sto letech stane rovnou nule vlivem zpřesněných výpočtů.

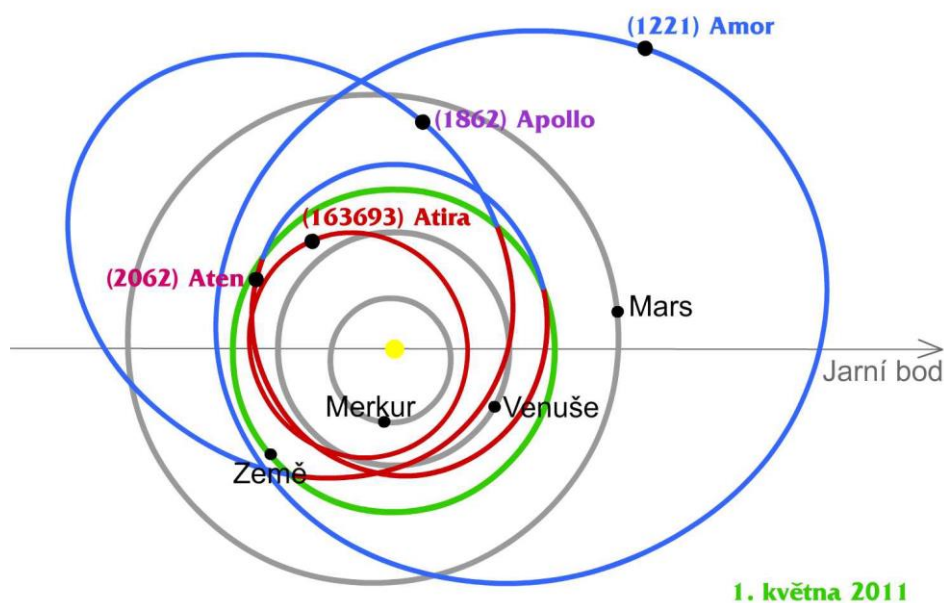
Dle dráhových elementů se blízkozemní planetky dělí do čtyř základních typů, které jsou pojmenovány obvykle dle první objevené planetky tohoto typu.

Planetky typu Amor jsou pojmenovány dle planetky (1221) Amor, objevené v roce 1932. Tyto planetky se k Zemi přibližují zvenčí a nekřížují zemskou dráhu. Jejich vzdálenost v přísluní se pohybuje v rozmezí 1,0 až 1,3 AU a jejich oběžná doba kolem Slunce je delší než jeden rok.

Planetky typu Apollo jsou pojmenovány dle planetky (1862) Apollo, objevené též v roce 1932. Planetky typu Apollo mají přísluní v menší vzdálenosti než 1 AU, a zároveň mají velkou poloosu dráhy a větší než 1 AU, z čehož vyplývá, že oběžná doba je též větší než jeden rok. Jak je zřejmé z velikosti velké poloosy dráhy a vzdálenosti přísluní, planetky typu Apollo křížují zemskou dráhu zvenku.

Planetky typu Aten jsou pojmenovány dle (2062) Aten, objevené v roce 1976. Tyto planetky mají přísluní v menší vzdálenosti než 1 AU a zároveň mají velkou poloosu dráhy též menší než 1 AU, z čehož vyplývá, že mají oběžnou dobu kolem Slunce kratší než jeden pozemský rok. Planetky typu Aten oproti předchozímu typu Apollo křížují zemskou dráhu zevnitř.

Pro poslední typ se často užívá pojmenování Atira, podle první planetky tohoto typu (163693) Atira, objevené v roce 2003. Celá dráha těchto těles je uvnitř zemské dráhy, čili mají odsluní v menší vzdálenosti než 0,983 AU a tudíž tyto planetky nekřížují zemskou dráhu.



Obr. 11: Dráhy blízkozemních planetek ve sluneční soustavě

7.3 Výzkum planetek a komet

Astrometrie planetek a komet hraje klíčovou roli při studiu těchto pozoruhodných objektů sluneční soustavy. Právě zpřesnění astrometrických metod mělo výsledně za následek výzkum dynamiky sluneční soustavy do minulosti, včetně objevů migrace planet či migrace kometárních jader celou sluneční soustavou.

I když se nyní může zdát, že astrometrie leží na okraji zájmu astronomů zabývajících se dynamikou a fyzikou sluneční soustavy, jde o základní disciplínu, bez které se jakékoliv další výzkumy neobejdou. Pokud chceme například dělat nějakou spektroskopickou analýzu planetky nebo komety, musíme ji prvně být schopni přesně najít, čili znát kvalitní dráhové elementy zkoumaného objektu. Jejich výpočet bez kvalitní astrometrie neobejde. Stejně důležitou roli hraje v případě výzkumu pomocí radarů či kosmických sond, kdy opět hraje navigace podstatnou roli v celém projektu. Čili by se dalo říci, že astrometrie je základním kamenem dalšího výzkumu vesmíru.

První etapou v poznávání planetek je zjištění jejich zastoupení ve sluneční soustavě. Této inventarizaci planetek se věnují velké hledací projekty, které jsou umístěny převážně ve Spojených státech amerických. Hlavním úkolem všech těchto projektů je ve většině případů vyhledávání blízkozemních těles, které by mohly ohrozit naši Zemi. Většina těchto projektů je podporována prostřednictvím NASA. Momentálně celosvětově největším tzv. hledacím projektem je Catalina Sky Survey, projekt University of Arizona. Mezi další velké projekty patří projekt Spacewatch, LINEAR (projekt ve spolupráci Massachusetts Institute of Technology a US Air Force), PanSTARRS či LONEOS.

Kromě zajištění pozorování hraje neoddělitelnou roli i výpočet drah a katalogizace jak pozorování, tak i dráhových elementů pozorovaných těles. O toto se stará celosvětová centrála Minor Planet Center při Mezinárodní astronomické unii, sídlící na Harvard Center for Astrophysics v americké Cambridge v Massachusetts. Do této celosvětové centrály posílají všichni astrometričtí pozorovatelé planetek a komet svá pozorování a tato centrála vydává cirkuláře s informacemi jak o nově objevených tělesech (tzv. Minor Planet Electronic Circulars - MPEC) tak o všech pozorováních a dráhových elementech všech v dané lunaci pozorovaných planetek a komet (tzv. Minor Planet Circulars - MPC).

7.4 Parametry ovlivňující kvalitu astrometrie

Jako každé fyzikální měření i astrometrie malých těles sluneční soustavy je zatížena chybami, a to jak chybami systematickými, tak chybami náhodnými.

Pokud jde o zdroje chyb v astrometrii, je jich opravdu nemálo. Mezi základní patří vlastní metoda výpočtu, přesnost určení času, přesné určení topocentrických souřadnice pozorovacího místa, kvalita, přesnost a rozložení hvězd v použitém referenčním katalogu, velikost pixelu zobrazovací CCD matice, rychlost a přesnost závěrky CCD kamery a následně i metody užitá na výpočet dráhových elementů či efemerid.

Prvním zdrojem chyb může být určení času, protože pro přesnou astrometrii je potřeba znát čas určení polohy tělesa s přesností na stotisíciny dne, čili o něco přesněji než na časovou sekundu. Jsou zde dva základní problémy, týkající se přesnosti určení času. První je časová

základna. Pro Evropu přichází v úvahu časový signál DCF, případně získávání času pomocí GPS. Obě tyto metody poskytují dostatečnou přesnost pro daný typ pozorování a jeho vyžadovanou přesnost.

Dalším možným zdrojem chyb v určení času je vlastní synchronizace počítače dle časové základny a chyby z toho pramenící. Pro kompenzaci této chyby je potřeba mít základovou desku na frekvenci minimálně 1000 kHz, což současné počítače splňují. K velice závažným chybám v určení času patří problematika zpoždění závěrky vlastní CCD kamery. Obvykle bývá uvedena u parametrů kamery a je potřeba daný čas připočítat jak k začátku, tak i ke konci expozice daného snímku. Profesionální CCD kamery mají toto zpoždění obvykle menší než 0,1 sekundy a tudíž není potřeba pro danou astrometrickou přesnost uplatňovat žádnou korekci.

Nedílnou součástí přesných astrometrických měření je kvalitní určení topocentrických souřadnic pozorovacího místa. Pokud chceme dosáhnout výsledné požadované přesnosti pod 1 úhlovou vteřinu (menší přesnost není vhodná pro následný výpočet dráhových elementů), je potřeba astro-geodeticky určit souřadnice s lepší přesností než na 15 metrů. To, s ohledem na možnost měření souřadnic WGS84 pomocí GPS, není momentálně již problém.

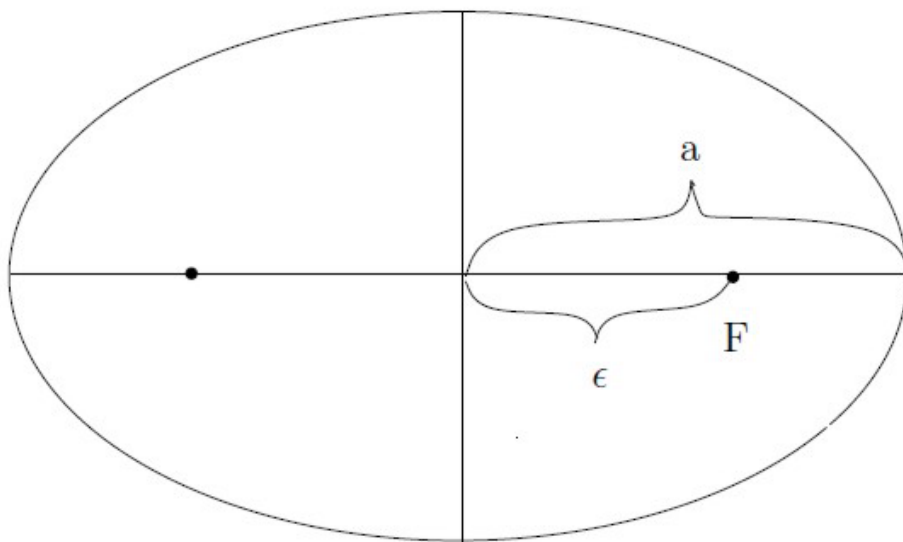
V neposlední řadě hraje roli přesnost použitého astrometrického katalogu, množství použitých hvězd a jejich rozložení na snímku. Z výše uvedených katalogů se z tohoto hlediska jeví momentálně jako nejlepší volbou katalog UCAC4 případně USNO-B1.0.

8 Dráhové elementy malých těles sluneční soustavy

Abychom byli schopni matematicky popsat prostorovou dráhu tělesa ve sluneční soustavě, potřebujeme k tomuto popisu znát minimálně šest nezávislých parametrů dráhy, které se nazývají dráhové elementy. Pomocí těchto dráhových elementů známe nejen obecnou dráhu čili kuželosečku, po které se daný objekt ve sluneční soustavě pohybuje, ale i jeho přesnou polohu na dráze pro konkrétní čas. Nyní ke dráhovým elementům obecněji [1,9].

První dva dráhové elementy nám popisují obecnou velikost a tvar dráhy tělesa. Prvním je hlavní (velká) poloosa dráhy a , která představuje střední vzdálenost tělesa od Slunce, přesněji od těžiště čili hmotného středu soustavy. Druhým parametrem je excentricita. První excentricitou je *lineární excentricita* ϵ , které se někdy říká délková, protože udává vzdálenost ohniska elipsy od vlastního středu elipsy. Máme ještě *numerickou excentricitu* e , která udává podíl odmocniny rozdílu druhých mocnin *velké poloosy dráhy* a a *malé poloosy dráhy* b a *velké poloosy dráhy* a , čili $e^2=(a^2-b^2)/a^2$.

Excentricitou máme definován obecně typ kuželosečky, po které se těleso pohybuje ($e=0$ pro kruhovou dráhu $0 < e < 1$ pro dráhu eliptickou, a $e=1$ pro dráhu parabolickou).

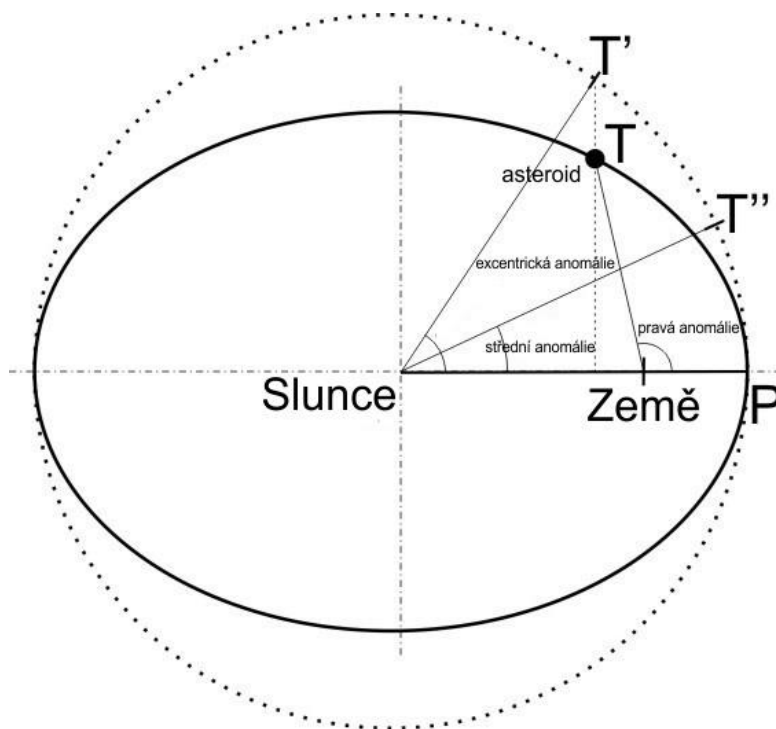


Obr. 12: Velká poloosa dráhy a a excentricita

Další dráhové elementy nám určují orientaci elipsy či jiné kuželosečky, po které se těleso pohybuje, v prostoru, a to s ohledem na dráhu Země kolem Slunce, neboli vůči ekliptice. Místa, kde dráha tělesa protíná rovinu ekliptiky se nazývají uzly dráhy. Každá dráha má dva

uzly, které jsou spojeny tzv. uzlovou přímkou. První z uzlů, ve kterém prochází těleso na své dráze nad rovinu ekliptiky, se nazývá výstupní uzel dráhy. Druhý uzel, ve kterém přechází těleso pod rovinu ekliptiky, se nazývá sestupný uzel dráhy. Samotné uzly nám ohledně orientace dráhy mnoho neřeknou, je potřeba je vztáhnout k referenčnímu bodu. Nejvhodnějším a nejvýhodnějším referenčním bodem je jarní bod, čili průsečík ekliptiky se světovým rovníkem. V dráhových elementech tak nalezneme parametr, který se jmenuje *délka výstupního uzlu* Ω . Ten představuje úhel, který svírá výstupní uzel dráhy právě s jarním bodem. Úhel se měří v matematicky kladném směru čili proti směru pohybu hodinových ručiček. Druhým parametrem, určujícím polohu kuželosečky v prostoru, je *sklon dráhy* i . Tento parametr dráhy představuje velikost úhlu měřeného od roviny ekliptiky k rovině dráhy tělesa. Pokud je tento úhel větší než devadesát stupňů, mluvíme o dráze retrogradní, čili protisměrné. Kdysi byly tyto dráhy „vyhrazeny“ pro dlouhoperiodické komety, nyní již známe i 95 planetek (stav k 18. srpnu 2018) se sklonem dráhy větším než devadesát stupňů.

Pátým dráhovým elementem orientujeme dráhu tělesa v rovině pomocí tzv. přímky apsid, což je spojnice přísluní a odsuluní, neboli nejbližšího a nejvzdálenějšího bodu dráhy objektu vůči našemu Slunci. Úhel mezi uzlovou přímkou a přímkou apsid se nazývá *argument šířky perihelu* ω . Tento parametr nám určuje polohu přísluní v rovině dráhy objektu.



Obr. 13: Pravá, střední a excentrická anomálie

Tímto pátým parametrem již máme plně definovanou obecnou prostorovou dráhu objektu ve sluneční soustavě. Chybí nám již jen jediné – určení polohy tělesa na této dráze. Tímto parametrem může být například *průchod přísluním* T , který nám udává čas, kdy se objekt na své dráze nachází přesně v bodě nejbližší Slunci. V praxi se tento parametr obvykle používá u komet, u planetek byl nahrazen alternativním, pro výpočty většinou vhodnějším, parametrem, a to *střední anomálií* M . Tento parametr představuje úhel, který svítá přímka apsid se spojnicí Slunce a rovnoměrně obíhajícího tělesa (čili vlastně po kruhové dráze – viz. *Obr. 13*). Střední anomálie je počítána, stejně jako ostatní dráhové elementy, pro přesný čas, který se označuje jako *Epocha elementů*. Ta je obvykle uváděna v tzv. Juliánském datu, které představuje počet dní, které uplynuly od poledne světového času od 1. ledna 4713 př. n.l. Například Juliánské datum pro 17. prosince 2011 pro čas 12:00 UT (světového času) je 2 455 913. Střední anomálie M je vázána na *pravou anomálii* v . *Pravá anomálie* v představuje úhel, který svírá průvodič tělesa, v tomto případě spojnice Slunce-těleso, se směrem k přísluní. Používáme ještě *excentrickou anomálii* E , kterou vytvoříme geometricky tak, že spustíme v objektu kolmici na velkou poloosu dráhy a , a kde nám protne kružnici vytvořenou na poloměru velké poloosy dráhy, tam dostaneme *excentrickou anomálii* E (viz. *Obr. 13*). Pravou anomálii v můžeme spočítat ze znalosti excentrické anomálie E , spočtené ze střední anomálie M a excentricity e pomocí Keplerovy rovnice:

$$M = E - e \sin E, \quad (8.1)$$

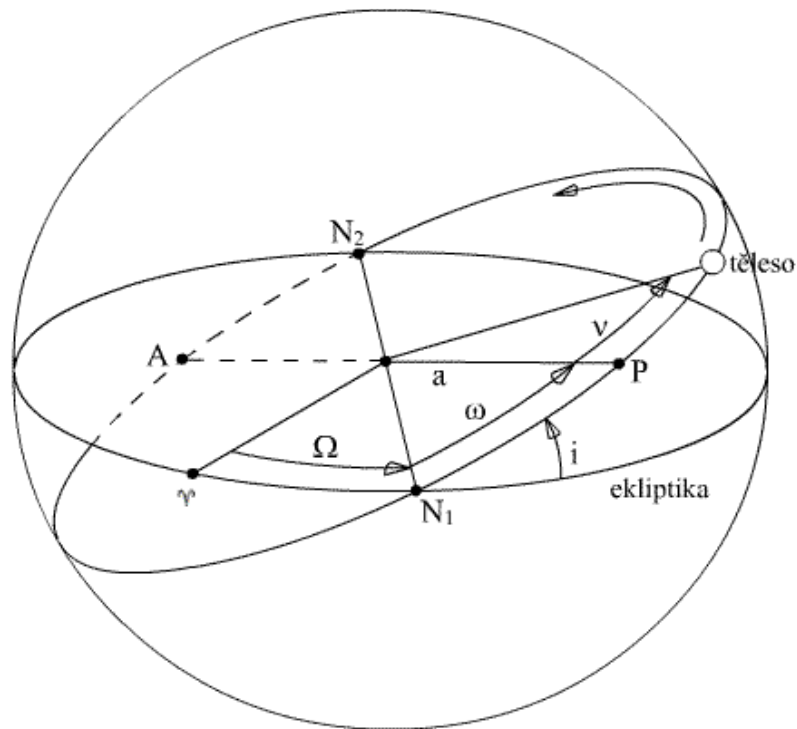
$$v = 2 \cdot \arctg \left(\sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \cdot \tg \left(\frac{E}{2} \right) \right) \quad (8.2)$$

Kromě těchto šesti standardních dráhových elementů, které jsou plně postačující pro veškeré výpočty, týkajících se daného tělesa, se můžeme setkat ještě i s doplňkovými parametry dráhy. Takovýmto parametrem je například *oběžná doba* P , *střední denní pohyb* n , či *vzdálenost přísluní* q . Tyto veličiny již nejsou nezávislé a tudíž je můžeme spočítat pomocí výše uvedených dráhových elementů – v tomto případě nám k výpočtům postačí velikost hlavní poloosy dráhy a , případně hodnota excentricity e .

$$P = \sqrt{a^3} \quad (8.3)$$

$$n = 0,985607614 \cdot a^{-3/2} \quad (8.4)$$

$$q = (1 - e)a \quad (8.5)$$



Obr. 14: Dráhové elementy

Tímto bychom měli kompletně určené dráhové elementy tělesa. Pro následný výpočet efemerid je ještě důležitý jeden parametr, udávající přesnost těchto dráhových elementů a tudíž i následnou přesnost vypočtených efemerid neboli přesných poloh na obloze pro daný objekt a daný čas. Tento parametr se v dráhových elementech označuje U . Počítá se z nepřesností určení času průchodu přísluním a nepřesnosti v určení oběžné doby tělesa. Čím je hodnota U menší, tím jsou dráhové elementy tělesa přesnější. Parametr U nabývá hodnot od 9 do 0. Takto spočtená hodnota odpovídá přesnosti určení polohy čili nepřesnosti určení efemeridy tělesa v následujících deseti letech. Například pro $U=0$ je hodnota nepřesnosti menší než $1''$. Jednotlivé hodnoty představuje následující tabulka [27].

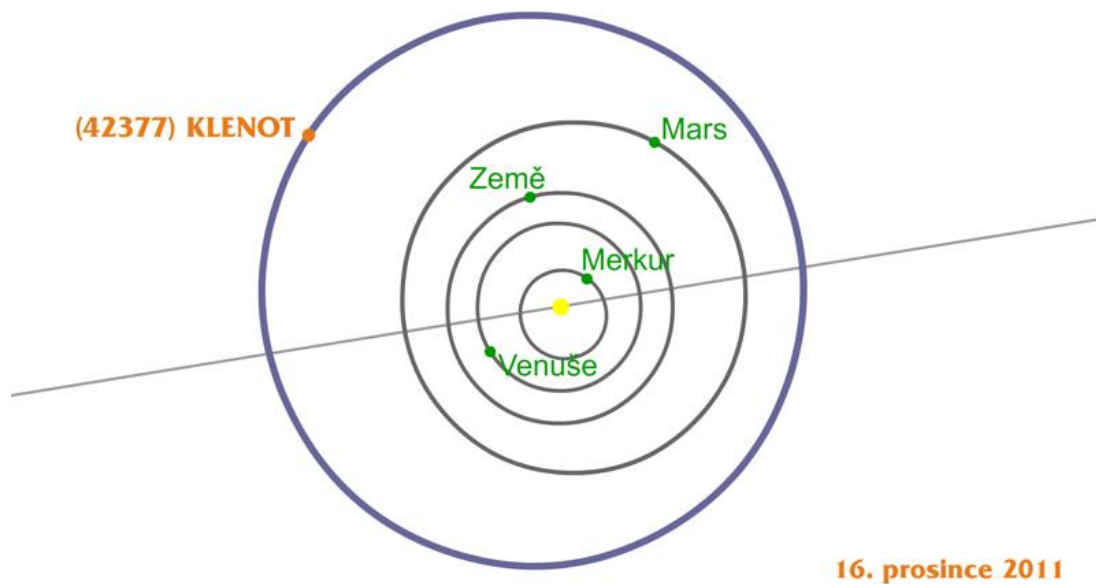
Tab. 2: Nepřesnost určení polohy v závislosti na vypočteném parametru U (Zdroj: *Minor Planet Center*)

U	"	U	"
0	< 1,0	5	< 1692
1	< 4,4	6	< 7488
2	< 19,6	7	< 33121
3	< 86,5	8	< 146502
4	< 382	9	> 146502

U blízkozemních planetek se kromě dráhových elementů planetek můžeme setkat i s parametrem *MOID* neboli *Minimum Orbital Intersection Distance*, který představuje nejmenší teoreticky možnou vzdálenost mezi dvěma objekty, v případě blízkozemních planetek je *MOID* mezi Zemí a blízkozemní planetkou neboli *Earth MOID*. U *MOID* je třeba vždy specifikovat, ke kterému tělesu sluneční soustavy se vztahuje, protože je například počítatelný i vůči Marsu či dokonce Venuši. Udává se v astronomických jednotkách – AU. Dále uvádíme příklady dráhových elementů pro planetku hlavního pásu planetek mezi Marsem a Jupiterem ((42377) KLENOT) a planetku blízkozemní (2003 UT₅₅), a to včetně grafického znázornění ve sluneční soustavě.

Dráhové elementy planetky (42377) KLENOT z hlavního pásu planetek [26]:

```
Epoch 2011 Aug. 27.0 TT = JDT 2455800.5
M 154.90145 (2000.0)
n 0.26458766 Peri. 284.15723 T = 2455215.05526 JDT
a 2.4030141 Node 294.83414 q = 2.1325385
e 0.1125568 Incl. 6.19810
P 3.73 H 15.2 G 0.15 U 1
From 211 observations at 8 oppositions, 1992-2006, mean residual 0".61.
```



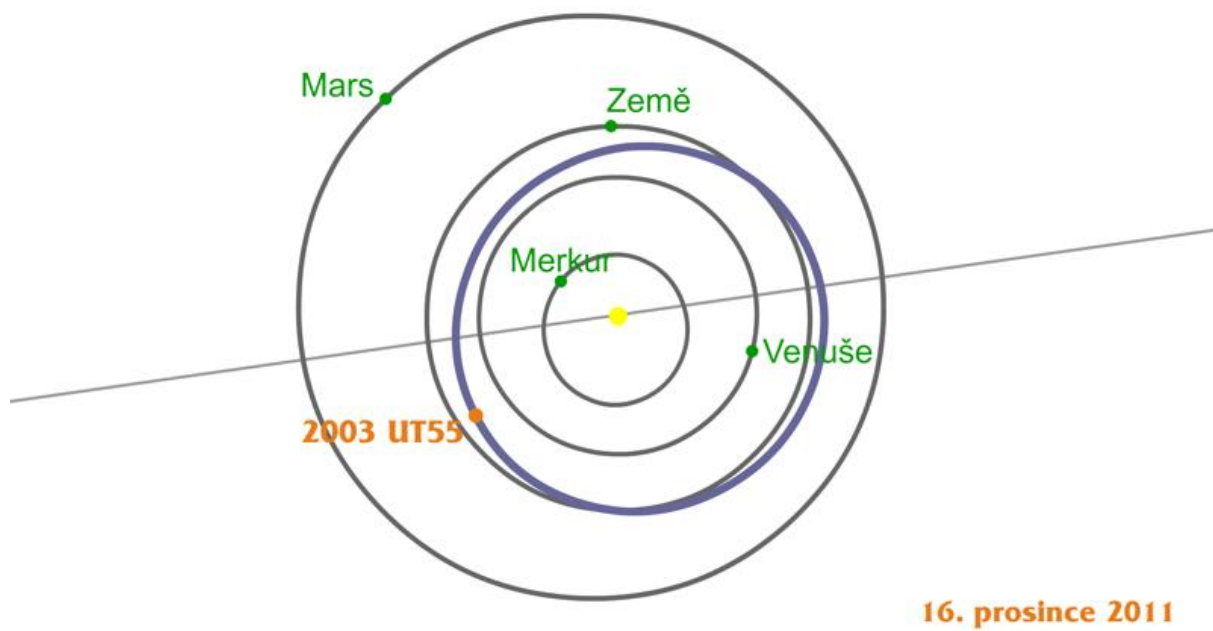
Obr. 15: Dráha planety hlavního pásu (42377) KLENOT ve sluneční soustavě

Dráhové elementy blízkozemní planety 2003 UT₅₅ typu Aten [26]:

```

Epoch 2011 Aug. 27.0 TT = JDT 2455800.5 MPC
M 298.56706 (2000.0)
n 1.01666055 Peri. 287.28225 T = 2455860.92621 JDT
a 0.9795322 Node 212.75178 q = 0.8340173
e 0.1485555 Incl. 16.78914 Earth MOID = 0.00677 AU
P 0.97 H 26.8 G 0.15 U 7
From 22 observations 2003 Oct. 26-27, mean residual 1".69.

```

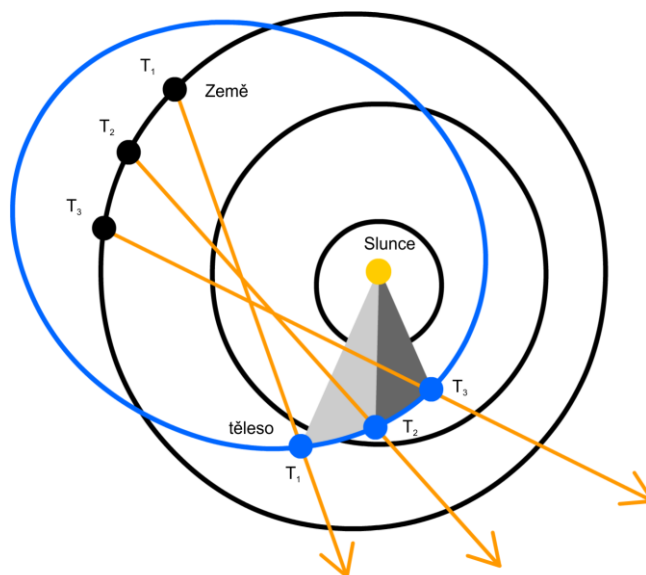


Obr. 16: Dráha blízkozemní planety 2003 UT₅₅ typu Aten ve sluneční soustavě

9 Výpočet dráhových elementů

Pro základní výpočet dráhových elementů těles ve sluneční soustavě nám postačí astrometrické souřadnice ze tří časů pozorování. Nejčastěji užívaná je metoda Gaussova. Na výpočet z této metody budeme potřebovat následující data: čas pozorování t (standardně uvedený v UT), rovníkové souřadnice II. druhu *rektascenzi* α a *deklinaci* δ , a heliocentrické pravoúhlé ekliptikální souřadnice Slunce X , Y a Z . Nadto všechny souřadnice musí být ve stejném ekvinokciu a na stejný čas.

Pomocí Gaussovy metody výpočtu jsou nejprve vyneseny ze tří pozic pozorovatele směry k pozorovanému tělesu (viz. Obr. 17). Tyto jsou pak protnuty rovinou, která prochází gravitačním středem sluneční soustavy, tj. Sluncem, a to tak, aby po vykreslení kuželosečky, která prochází průsečíky směrů pohledu a oné roviny, v jejímž středu je gravitační střed sluneční soustavy, splňovaly dvojnásobky ploch mezi prvním a druhým průvodičem a druhým a třetím průvodičem Keplerovy zákony. Plochy mezi průvodiči lze přesně spočítat i bez předchozí znalosti parametrů dráhy tělesa. Tak pro určení parametrů dráhy tělesa získáme jeho tři polohy v prostoru. Tím eliminujeme fakt, že pozemská pozorování jsou vlastně prováděna ve 2D a dostáváme se do verze 3D, čili z roviny do prostoru.



Obr. 17: Geometrické provedení problému výpočtu dráhových elementů

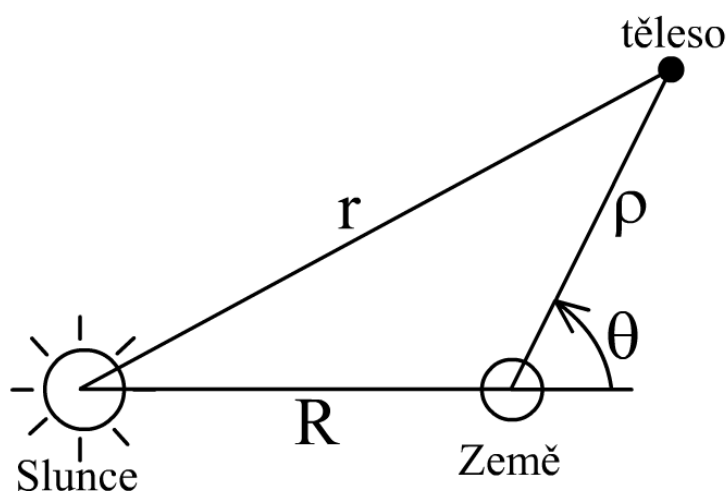
Heliocentrické a geocentrické souřadnice tělesa jsou vzájemně spojeny rovnicemi:

$$\begin{aligned}\rho_i \cos \delta_i \cos \alpha_i &= x_i + X_i \\ \rho_i \cos \delta_i \sin \alpha_i &= y_i + Y_i \\ \rho_i \sin \delta_i &= z_i + Z_i \\ i &= 1,2,3\end{aligned}\tag{9.1}$$

Kde ρ představuje neznámou vzdálenost tělesa a α a δ rektascenzi a deklinaci jednotlivých pozorování, X, Y, Z heliocentrické souřadnice Slunce k času jednotlivých pozorování a x, y, z jsou heliocentrické souřadnice tělesa, momentálně taktéž neznámé. Pokud podělíme vztahy z rovnice (9.1) ρ_i , získáme tak a_i, b_i, c_i , které vytyčují směr k tělesu.

$$\begin{aligned}a_i &= \cos \delta_i \cos \alpha_i \\ b_i &= \cos \delta_i \sin \alpha_i \\ c_i &= \sin \delta_i \\ i &= 1,2,3\end{aligned}\tag{9.2}$$

Následně je potřeba vycházet z klasických rovnic pro heliocentrické souřadnice, s použitím obecných rovnic pro roviny a zahrnutím průvodičů a jejich ploch. Následně spočteme poměry jednotlivých ploch mezi průvodiči. Matematickými úpravami dojdeme to situace, že budeme mít vyjádřený průvodič r_2 pomocí již jen jedné neznámé ρ_2 .



Obr. 18: Geometrické upořádání

Následně, pomocí iteračních metod, vypočteme průvodič r_2 a ρ_2 . Pomocí další sady pomocných rovnic spočteme i zbývající hodnoty ρ , a to ρ_1 a ρ_3 . Získané hodnoty ρ pak

použijeme k výpočtu zbylých průvodičů r_1 a r_3 . Získáme tak výsledně heliocentrické souřadnice tělesa:

$$\begin{aligned}x_i &= a_i \rho_i - X_i \\y_i &= b_i \rho_i - Y_i \\z_i &= c_i \rho_i - Z_i \\i &= 1, 2, 3\end{aligned}\tag{9.3}$$

Jelikož již známe vzdálenost tělesa, můžeme opravit každé z pozorování o planetární aberaci:

$$\begin{aligned}t_i^o &= t_1 - A \rho_i \\A &= 0,005772 \text{ dne}\end{aligned}\tag{9.4}$$

Dále nás bude zajímat poměr plochy opsané průvodičem k ploše vytyčené trojúhelníkem, jehož vrcholy jsou ve dvou heliocentrických souřadnicích tělesa a ohnisku opisované elipsy (*Obr. 18*). Využijeme i druhého Keplerova zákona, který říká, že poměry ploch opsaných průvodičem jsou úměrné době, po kterou tuto plochu opisovaly. Z geometrie vyplývá, že druhá mocnina dvojnásobku plochy trojúhelníka vytyčeného průvodiči r_1 a r_3 je rovna součtu druhých mocnin ploch průmětu této plochy do souřadných rovin, s použitím pravých anomálií v_1 a v_3 .

$$\begin{aligned}[r_1 r_3 \sin(v_3 - v_1)]^2 &= (y_1 z_3 - z_1 y_3)^2 + (z_1 x_3 - x_1 z_3)^2 + (x_1 y_3 - y_1 x_3)^2 \\&\text{neboli} \\r_1 r_3 \cos(v_3 - v_1) &= x_1 x_3 + y_1 y_3 + z_1 z_3\end{aligned}\tag{9.5}$$

Dalšími úpravami dojdeme k následujícím vztahům:

$$\sin(v_3 - v_1) = \frac{r_0}{r_3}\tag{9.6}$$

$$\cos(v_3 - v_1) = \frac{x_1 x_3 + y_1 y_3 + z_1 z_3}{r_1 r_3}\tag{9.7}$$

Toto nám již umožňuje spočítat úhel rozdílu pravých anomálií v_3 a v_1 , přesněji $(v_3 - v_1)$, a to díky oběma goniometrickým funkcím jednoznačně. Nyní můžeme spočítat parametr p , který je taktéž $p = b^2/a$. My jej ale nyní dostaneme ve tvaru:

$$\sqrt{p} = \frac{r_1 r_0}{\tau_2} y_2 \quad (9.8)$$

Rovnice kuželosečky s ohniskem v počátku je

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \nu} \quad (9.9)$$

Tyto rovnice uvedeme pro průvodiče r_1 a r_2 , provedeme substituci $\cos \nu = q$, a pro q_1 a q_2 dostaneme:

$$q_1 = \frac{p}{r_1} - 1; q_3 = \frac{p}{r_3} - 1 \quad (9.10)$$

Tyto rovnice nám pomocí transformace spolu s výše uvedenou substitucí za q umožní spočítat pravou anomálii ν_1 , a to ze znalosti $e \sin \nu_1$ a $e \cos \nu_1$.

$$e \cdot \cos \nu_1 = q_1 \quad (9.11)$$

$$e \cdot \sin \nu_1 = \frac{q_1 \cos(\nu_3 - \nu_1) - q_3}{\sin(\nu_3 - \nu_1)} \quad (9.12)$$

Jelikož už známe ν_1 a $\sin \nu_1$, můžeme spočítat i ν_3 a následně excentricitu dráhy e .

$$e = \frac{e \cdot \sin \nu_1}{\sin \nu_1} \quad (9.13)$$

Jelikož známe už výstřednost dráhy e a parametr p , můžeme spočítat velkou poloosu dráhy a :

$$a = \frac{p}{1 - e^2} \quad (9.14)$$

Jsme již též schopni spočítat hodnoty excentrických anomálií E_1 a E_2 :

$$\begin{aligned} \tan\left(\frac{1}{2} E_1\right) &= \sqrt{\frac{1-e}{1+e}} \tan\left(\frac{1}{2} \nu_1\right) \\ \tan\left(\frac{1}{2} E_3\right) &= \sqrt{\frac{1-e}{1+e}} \tan\left(\frac{1}{2} \nu_3\right) \end{aligned} \quad (9.15)$$

Z Keplerovy rovnice $E = M + e \sin E$ spočteme numericky střední anomálii M :

$$\begin{aligned} M_1 &= E_1 - e \sin E_1 \\ M_3 &= E_3 - e \sin E_3 \end{aligned} \quad (9.16)$$

Pro určení střední anomálie na danou *Epochu* potřebujeme ještě spočítat denní pohyb μ :

$$\mu = \frac{M_3 - M_1}{t_3 - t_1} = \frac{3548,188''}{a^{3/2}} \quad (9.17)$$

Nyní jsme schopni spočítat střední anomálii M_0 pro předepsanou epochu t_0 :

$$M_0 = M_1 + \mu(t_0 - t_1^0) = M_3 + \mu(t_0 - t_3^0) \quad (9.18)$$

Ted' můžeme spočítat směrové kosíny dráhy P a Q . Tyto dva vektory jsou vlastně ekvivalentem klasických dráhových elementů.

$$P_x = x_1 \frac{\cos v_1}{r_1} - x_0 \frac{\sin v_1}{r_0}, Q_x = x_1 \frac{\sin v_1}{r_1} - x_0 \frac{\cos v_1}{r_0} \quad (9.19)$$

$$P_y = y_1 \frac{\cos v_1}{r_1} - y_0 \frac{\sin v_1}{r_0}, Q_y = y_1 \frac{\sin v_1}{r_1} - y_0 \frac{\cos v_1}{r_0} \quad (9.20)$$

$$P_z = z_1 \frac{\cos v_1}{r_1} - z_0 \frac{\sin v_1}{r_0}, Q_z = z_1 \frac{\sin v_1}{r_1} - z_0 \frac{\cos v_1}{r_0} \quad (9.21)$$

Nyní potřebujeme spočítat sklon dráhy vůči ekliptice. Sklon zemské osy je $\varepsilon = 23^\circ 26' 47''$. Z následujících rovnic získáme prvně díky znalosti $\sin i \cdot \sin \omega$ a $\sin i \cdot \cos \omega$ hodnotu argumentu délky perihelia ω . Následným dosazením do týchž rovnic spočteme sklon dráhy i .

$$\begin{aligned} \sin i \sin \omega &= P_z \cos \varepsilon - P_y \sin \varepsilon \\ \sin i \cos \omega &= Q_z \cos \varepsilon - Q_y \sin \varepsilon \end{aligned} \quad (9.22)$$

Posledním ze šesti parametrů dráhových elementů, který nám ještě chybí, je délka výstupného uzlu dráhy Ω . Tu spočteme následovně:

$$\begin{aligned} \sin \Omega &= (P_y \cos \omega - Q_y \sin \omega) \sec \varepsilon \\ \cos \Omega &= P_x \cos \omega - Q_x \sin \omega \end{aligned} \quad (9.23)$$

10 Výpočet efemerid malých těles sluneční soustavy

Efemeridou rozumíme výpočet přesné polohy tělesa na obloze v daném souřadnicovém systému pro daný časový okamžik [1]. Pro malá tělesa sluneční soustavy, kterými jsou planety a komety, je výpočet efemerid neoddelitelnou součástí přípravy pozorování těchto těles. Bez spočtení kvalitní efemeridy bychom nevěděli, kde se v danou dobu dané těleso nalézá a kdy je pro nás pozorovatelné.

Základem výpočtu efemerid jsou známé dráhové elementy tělesa. S ohledem na skutečnost, že se budeme v následující kapitole zabývat identifikací planetek ve sluneční soustavě, zaměříme se na výpočty efemerid z eliptických drah těchto těles.

Prvním krokem při výpočtu efemerid je výpočet střední anomálie M pro čas t .

$$M(t) = M_0 + n(t - t_0), \quad (10.1)$$

kde M_0 je hodnota střední anomálie pro čas t_0 .

Dalším krokem je numerické řešení Keplerovy rovnice

$$M = E - e \sin E, \quad (10.2)$$

kde E označuje excentrickou anomálii. Keplerova rovnice nemá analytické řešení, ale jen numerické. Standardní metodou řešení této rovnice je iterační metoda, kdy za úvodní hodnotu excentrické anomálie E_0 dosadíme hodnotu střední anomálie M . Opět dosadíme do Keplerovy rovnice, a nyní dostaneme:

$$E_{(i+1)} = M + e \sin E_{(i)}, \quad (10.3)$$

V následném dosazování a iteracích pokračujeme tak dlouho, dokud rozdíl posledních dvou hodnot neklesne pod předem stanovenou mez.

$$|E_i - E_{(i+1)}| < \varepsilon \quad (10.4)$$

Uvedené vzorce platí pro E a M v radiánech. Pokud bychom užili E a M ve stupních, měla by Keplerova rovnice tvar:

$$M = E - (180/\pi)e \sin E \quad (10.5)$$

Postup výpočtu je v obou případech úplně stejný.

Nyní, když máme spočtenou excentrickou anomálii E , přistoupíme k výpočtu dalších veličin potřebných pro určení přesné polohy tělesa. Určíme pravouhlé souřadnice x, y tělesa v rovině dráhy, a to s počátkem souřadnic ve středu eliptické dráhy.

$$x = a(\cos E - e) \quad (10.6)$$

$$y = a\sqrt{(1 - e^2)} \sin E \quad (10.7)$$

Nyní je potřeba vypočítat heliocentrické souřadnice X, Y, Z tělesa a zároveň heliocentrické souřadnice X_z, Y_z, Z_z pro Zemi. Vzorce pro těleso i Zemi jsou identické, jen se vždy musí dosadit dráhové elementy odpovídajícího tělesa. Pokud jde o heliocentrické souřadnice X_z, Y_z, Z_z pro Zemi, ty lze pro daný čas získat i jiným způsobem, například použitím Development Ephemeris DE405/406 z JPL.

$$X = (\cos \omega \cos \Omega - \sin \omega \sin \Omega \cos i)x - (\sin \omega \cos \Omega + \cos \omega \sin \Omega \cos i)y \quad (10.8)$$

$$Y = (\cos \omega \sin \Omega + \sin \omega \cos \Omega \cos i)x - (\sin \omega \sin \Omega - \cos \omega \cos \Omega \cos i)y \quad (10.9)$$

$$Z = (\sin \omega \sin i)x + (\cos \omega \sin i)y \quad (10.10)$$

Ze známých heliocentrických souřadnic tělesa a Země spočteme přímo pravouhlé geocentrické souřadnice tělesa:

$$X_t = X - X_z \quad (10.11)$$

$$Y_t = Y - Y_z \quad (10.12)$$

$$Z_t = Z - Z_z \quad (10.13)$$

Získané pravoúhlé rovníkové geocentrické souřadnice tělesa převedeme na souřadnice sférické, čímž dostaneme požadovanou polohu na obloze v rovníkových souřadnicích II. druhu. Je třeba samozřejmě ctít kvadranty goniometrických funkcí.

Pro $x > 0$ dostaneme:

$$\alpha = \arctan \frac{y}{x} \quad (10.14)$$

Pro $x < 0$ dostaneme:

$$\alpha = \arctan \frac{y}{x} + 180^\circ \quad (10.15)$$

Pro $x = 0$ a $y > 0$ dostaneme $\alpha = 90^\circ$, pro $x = 0$ a $y < 0$ je $\alpha = 270^\circ$.

Obvykle se pak převedou souřadnice z úhlové míry na hodinovou, čili $360^\circ = 24$ hodin neboli 1 hodina $= 15^\circ$. Tímto máme z dráhových elementů spočtenu efemeridu tělesa na požadovaný čas.

Pokud bychom tudíž užili klasické 24-hodinové zobrazení rektascenze, byly by tyto extrémní hodnoty následující:

Pro $x = 0$ a $y > 0$ je výsledná rektascenze $\alpha = 6^h 0^m$, pro $x = 0$ a $y < 0$ je poté $\alpha = 18^h 0^m$.

Tímto máme spočtenu efemeridu, ale pouze geocentrickou, kdy je teoretický pozorovatel umístěn ve středu Země. Je ještě potřeba převést souřadnice na topocentrické, čili přímo pro pozorovatele na daném místě zemského povrchu.

Tato korekce je obzvláště nutná pro sledování blízkozemních těles, které jsou k nám blíže než 0.05 AU. Pro vzdálenější tělesa, pohybující se ve sluneční soustavě v hlavním pásu planetek, případně v oblasti Trójanů, neboli planetek v libračních bodech L4 a L5 soustavy Slunce-Jupiter, či vzdálenějších těles sluneční soustavy jako jsou Kentauři a transneptunická tělesa, není bezpodmínečně nutné přepočítávat geocentrické souřadnice na topocentrické, protože výsledný rozdíl v polohách se liší méně než o 10“. To je dáno i tím, že paralaktický rozdíl pro těleso ve vzdálenosti jedné astronomické jednotky, neboli 149,6 milionů kilometrů, činí 8,794“, což je pro tyto výpočty *paralaktická konstanta*. Výsledný rozdíl v poloze pro vzdálenější tělesa je řádově menší než pixel size neboli rozlišení používaných CCD kamer na teleskopech.

Vlastní korekce z topocentrických na geocentrické souřadnice je vlastně korekce geocentricky spočtené rektascenze α na topocentrickou rektascenzi α_T a korekce geocentrické deklinace δ na topocentrickou deklinaci δ_T . Vlastní rovnice korekce pak mají tvar:

$$\alpha_T = \alpha + \Delta\alpha \quad (10.16)$$

$$\delta_T = \delta + \Delta\delta \quad (10.17)$$

Pro vlastní výpočet potřebujeme znát rovníkovou horizontální paralaxu tělesa π , která je přímo závislá na vzdálenosti ρ počítaného objektu od Země. Tuto paralaxu spočteme se znalostí jednotkové paralaktické konstanty, neboli paralaxy objektu ve vzdálenosti jedné astronomické jednotky.

$$\pi = \frac{8,794}{\rho} \quad (10.18)$$

Veličinu ρ čili vzdálenost objektu od Země v astronomických jednotkách spočteme ze známých heliocentrických pravoúhlých souřadnic Země X_z, Y_z, Z_z a heliocentrických pravoúhlých souřadnic objektu X_T, Y_T, Z_T .

$$\rho = \sqrt{X_T^2 + Y_T^2 + Z_T^2} \quad (10.19)$$

Nyní již můžeme přistoupit k vlastnímu výpočtu topocentrických korekcí. K výpočtu je potřeba znát zeměpisnou šířku pozorovacího místa φ a místní hvězdný čas θ , čili vlastně i zeměpisnou délku pozorovacího místa λ , na které místní hvězdný čas závisí. Paralaktické korekce závisí též na spočtených souřadnicích tělesa α a δ .

$$\Delta\alpha = \frac{-\pi \cos \varphi \sin H}{\cos \delta} \quad (10.20)$$

$$\Delta\delta = -\pi(\sin \varphi \cos \delta - \cos \varphi \cos H \sin \delta) \quad (10.21)$$

$$H = \Theta - \alpha \quad (10.22)$$

11 Identifikace malých těles sluneční soustavy

11.1 Proč je potřeba identifikovat tělesa

Abychom byli schopni spočítat relevantní dráhové parametry těles ve sluneční soustavě, nestačí tato tělesa jen objevit, případně je pozorovat v několika málo nocích, následujících po objevu, aby nemohlo dojít ke ztrátě tohoto tělesa případně ke špatné identifikaci s jiným dříve či později pozorovaným tělesem. Abychom byli schopni spočítat kvalitní dráhu, je potřeba těleso, planetku nebo kometu, pozorovat minimálně ve dvou opozicích, neboli ve dvou pozorovacích oknech. Situace je poněkud odlišná u planetek hlavního pásu a u objektů blízkozemních.

Pokud jde o planetku hlavního pásu, pro relevantní dráhové elementy, kdy jsme schopni spočítat předpověď polohy neboli efemeridu na následujících deset let s chybou menší než 5", potřebujeme obvykle těleso pozorovat alespoň ve čtyřech opozicích. Výjimku mohou tvořit některé speciální dráhové kategorie planetek (například planetky typu Hungaria ve vnitřní části hlavního pásu, planetky typu Hilda, pohybující se ve sluneční soustavě v rezonančním stavu 3:2 s Jupiterem, či planetky typu Trójan, nalézající se v libračních bodech L4 a L5 s největší planetou sluneční soustavy Jupiterem), kde můžeme relevantní dráhové elementy získat již po pozorování ve dvou či třech opozicích, ve výjimečných případech i v jedné opozici.

U blízkozemních planetek je situace jiná. Jejich dráhové elementy jsou mnohem odlišnější než jsou dráhové elementy planetek hlavního pásu, a tudíž obvykle i jejich pohyb po obloze vykazuje obvykle neobvyklých hodnot. Stejná situace je u oblouku dráhy, který závisí na geometrii vzájemných pohybů Země a tělesa kolem Slunce. Některá blízkozemní tělesa, objevená ve vhodné poloze a pozorovatelná v časovém sledu i desítek dnů, mohou mít spočtenou kvalitní dráhu sluneční soustavou už po první pozorovatelné opozici, protože pozorovaný zdánlivý oblouk dráhy na obloze je dostatečný pro výpočet kvalitních orbitálních elementů i při oblouku řádově jen ve dnech. Ale toto se týká jen části blízkozemních planetek. Část blízkozemních planetek má tak nepříznivou geometrii pohybu na obloze, že je v objevovém roce pozorována velice málo, což následně značně ztěžuje jejich znovunalezení v následujících opozicích, případně mají tak nevhodnou geometrii dráhy, že k dalšímu vhodnému pozorovatelnému přiblížení dojde až za mnoho let, což prakticky znemožňuje jejich systematické znovunalezení. Znovunalezení pak bývá dílem náhody - nalezením

tohoto tělesa obvykle některým z velkých hledacích programů a následné identifikace (jako příklad takovéto identifikace je planetka typu Amor 2003 HU₄₂) [5, 7].

U znovuzobjevování komet je situace ještě těžší. Kromě klasických gravitačních vlivů velkých těles sluneční soustavy totiž zde přichází ještě v úvahu působení negravitačních sil, způsobených jevy na povrchu kometárního jádra (výtrysky, výbuchy), které mají též vliv na výslednou dráhu tělesa. Nadto se tyto negravitační parametry mění nejen z oběhu na oběh, ale i během jednoho oběhu kolem Slunce a jsou obtížně spočitatelné. Jednodušší je tak situace při znovunalezání komet s méně aktivními jádry, případně s menšími jádry.

Kritickou roli hraje identifikace u rádooby nově objevených blízkozemních těles, které byly v objevové opozici málo pozorovány, a následně náhodně objeveny v rámci hledacích programů a prvotně nezidentifikovány světovou planetkovou centrálou Minor Planet Center. Takováto včasná identifikace pomůže neplýtvat drahocenným časem teleskopů zabývajících se následnou astrometrií těchto těles a v tomto oboru hraje nezanedbatelnou roli. Některé z takovýchto identifikací, provedených autorem této práce níže uvedenou metodikou, jsou v závěru kapitoly 10.4.

Znovunalezání malých těles sluneční soustavy, obzvláště blízkozemních, hraje důležitou roli při výpočtech přiblížení těchto objektů k Zemi, a i při výpočtech pravděpodobností eventuálních srážek těchto objektů se Zemí, protože až relevantní, dostatečně kvalitně spočtená dráha nám může poskytnou odpovídající výsledky.

O skutečnosti, jak se mohou měnit dráhové elementy blízkozemních planetek v závislosti na množství pozorování a pozorovaném oblouku dráhy, svědčí následující obrázky, kde jsou postupně uvedeny dráhové elementy pro planetku typu Amor 2007 OV pro 2 dny a 18 pozorování, 10 dní a 22 pozorování a výsledně pro oblouk pozorování 114 dní a 174 astrometrických měření. Dráhové elementy jsou uvedeny včetně chyby *jedna* σ .

EPOCHA 54200		
Dráhové elementy		σ
a (AU)	2.70596	0.3965
e (°)	0.522161	0.0621
i (°)	12.153	2.206
Ω (°)	356.818	6.51
ω (°)	324.625	19.85
M (°)	334.183	7.16

EPOCHA 54200		
Dráhové elementy		σ
a (AU)	2.49886	0.03016
e (°)	0.487436	0.005373
i (°)	12.711	0.05233
Ω (°)	353.791	0.1091
ω (°)	333.073	0.1662
M (°)	329.213	0.5786

Délka oblouku (dny) = 2
Pozorování = 18

Délka oblouku (dny) = 10
Pozorování = 22

Obr. 19: Dráhové elementy planety 2007 OV po 2 a 10 dnech

EPOCHA 54400		
Dráhové elementy		σ
a (AU)	2.47821	6.363e-05
e (°)	0.483701	1.129e-05
i (°)	12.674	0.0001923
Ω (°)	353.72	5.398e-05
ω (°)	333.155	0.0001486
M (°)	19.342	0.0007339

Délka oblouku (dny) = 114
Pozorování = 174

Obr. 20: Dráhové elementy planety 2007 OV po 114 dnech

11.2 Katalogy dráhových elementů

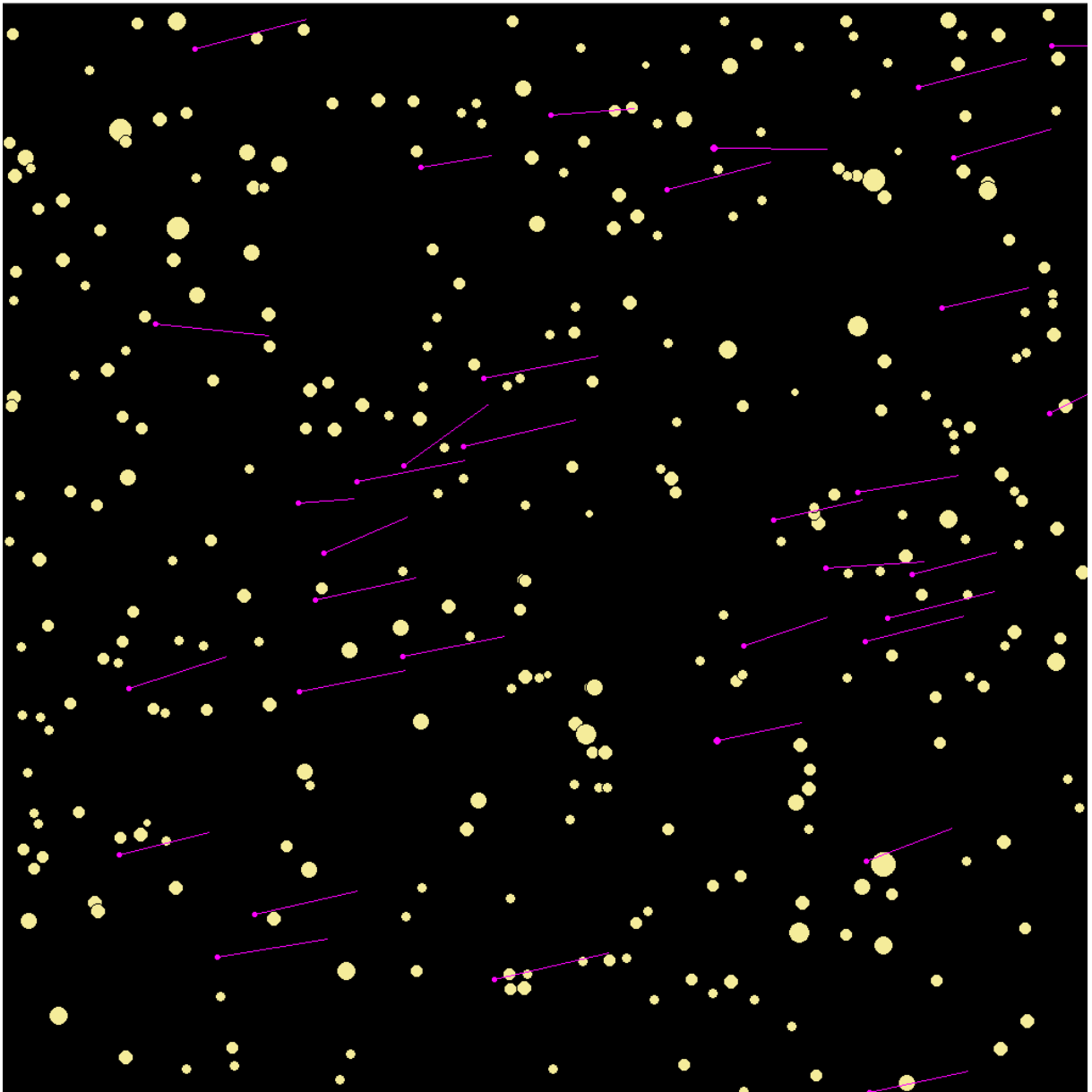
Pro výpočet efemerid a následně i pro správnou identifikaci těles jsou potřeba kvalitní katalogy dráhových elementů planetek, případně i komet.

Nejpoužívanějším katalogem dráhových elementů planetek je *The Minor Planet Center Orbit Databáze (MPCORB)* [26,27]. *MPCORB* obsahuje dráhové elementy planetek, které byly publikovány celosvětovou planetkovou centrálou Minor Planet Center, a to jak ve vydávaném *Minor Planet Circular (MPC)*, což je měsíčník obsahující jak informace o astrometrické produkci observatoří ve světě tak i o nových číslovaných planetkách a dráhových elementech planetek (a i komet), tak i v *Minor Planet Electronic Circulars (MPEC)*, které jsou vydávány nepravidelně k nově objeveným či nově znovuobjeveným obzvláště blízkozemním tělesům. Katalog je minimálně jednou denně aktualizován s ohledem na nová pozorování a objevy. K 18.srpnu 2018 obsahuje MPCORB dráhové elementy 781 557 těles.

Druhým používaným katalogem je *The Asteroid Orbital Elements Databáze (ASTORB)*, který vytváří Lowell Observatory v USA [28]. Zdroj základních astrometrických dat je stejný, Minor Planet Center, ale výpočty jsou prováděny metodami vyvinutými na Lowell Observatory. Výhodou je, že obsahuje i krátkoobloukové dráhy starších objektů, což umožňuje větší škálu identifikací. K 18.srpnu 2018 obsahuje katalog informace o 781 368 objektech.

Třetím katalogem, který na Observatoři Kletí používáme, je vlastní katalog Observatoře Klet' *K_KLET*, který vybrán ze dvou předchozích, doplněný o nové vlastní objevy (než dostanou předběžné označení od Minor Planet Center) a zároveň další informace, jako například o našich posledních pozorováních, případně o referenčních jasnostech [5,6]. Vlastní katalog *K_KLET* obsahuje k 18.srpnu 2018 informace o 5261 objektech.

Pro přípravu pozorování a i pro vlastní identifikace se používá na dané těleso v tu danou chvíli nejvhodnější katalog resp. nejkvalitnější dostupné dráhové elementy.

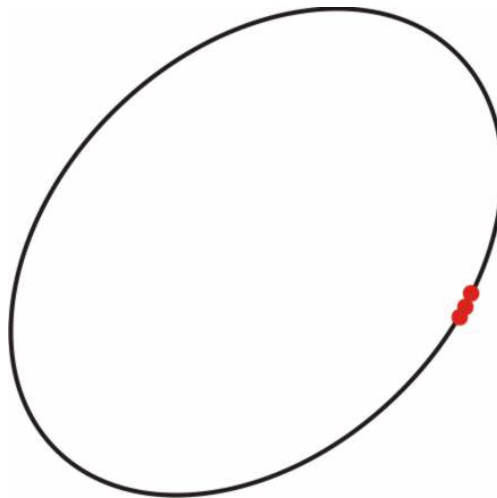


*Obr. 21: Zorné pole teleskopu KLENOT s známými planetkami a jejich nominální pohyby
(Zdroj: Observatoř Klet')[6]*

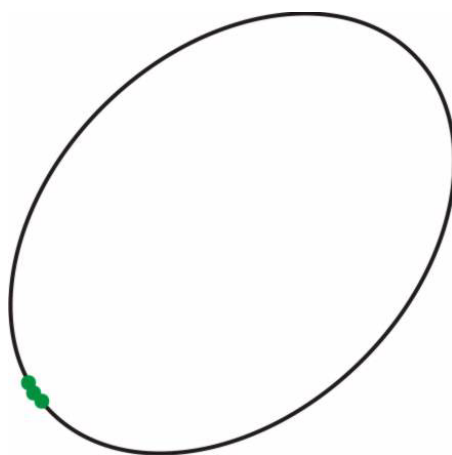
12 Metoda identifikace malých těles sluneční soustavy

Jednou z nejobtížnějších úloh v oblasti nebeské mechaniky sluneční soustavy je identifikace malých těles sluneční soustavy. Vlastně jde o problém „linkování“ (navázání), kdy se dva pozorovatelné oblouky dráhy, ze kterých jsou spočteny samostatné dráhové elementy, spojí v jeden a určí se, zda jde či nejde o jedno a totéž těleso. Toto s ohledem na dráhové změny těles, způsobené gravitačním působením planet, není úkol z nejjednodušších.

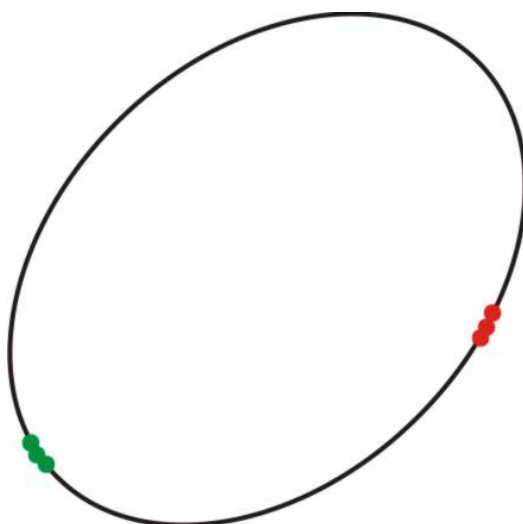
Hlavní komplikací při identifikacích objektů ve sluneční soustavě je skutečnost, že identifikovaná tělesa, stejně jako naše Země, obíhají kolem naší centrální hvězdy, kolem Slunce. Kdyby byla centrálním tělesem Země, stačilo by pouze zkontrolovat, zda se těleso pohybuje po obloze daným směrem a danou rychlostí v předem spočteném regionu z primárních dráhových elementů, a stačil by nám pouze jeho směr a rychlost pohybu po nebeské sféře. Ale jelikož se pohybuje identifikované těleso i Země kolem Slunce, je třeba použít metod sofistikovanějších, zahrnujících i pohyb naší planety.



Obr. 22: Pozorování v prvním pozorovacím okně



Obr. 23: Pozorování v druhém pozorovacím okně



Obr. 24: Výsledná dráha při správné identifikaci obou pozorovacích oken

Dalo by se říct, pro neznalé věci, že ke správné identifikaci stačí jen směr pohybu a jeho rychlost. Ale to vůbec nestačí, obzvláště v případech, že v daném napozorovaném poli máme více planetek podobného směru a pohybu, jak ukazuje obrázek *Obr. 21* . Je třeba použít sofistikovanější metodu.

Předpokládejme nyní, že máme dvě sady pozorování a spočtené dráhové elementy na stejnou epochu. Mějme dva vektory $x_1, x_2 \in R^6$, které jsou samostatně definované. Pro jejich určení použijeme dvě sady pozorování v různých letech:

$$(t_i, r_i), i = 1, m_1, (t_i, r_i), i = m_1 + 1, m_1 + m_2, \quad (12.1)$$

kde m_1 představuje sadu pozorování z prvního oblouku dráhy a m_2 sadu pozorování z oblouku druhého. Sadám pozorování odpovídají i spočtené hodnoty $O-C$,

$$\zeta_1 = (\zeta_i), i = 1, m_1, \zeta_2 = (\zeta_i) = m_1 + 1, m_1 + m_2, \quad (12.2)$$

Nyní můžeme počítat dvě směrové funkce pro $i=1,2$:

$$Q_i(x) = \frac{1}{m_i} \zeta_i \cdot \zeta_i = Q_i(x_i) + \Delta Q_i(x) = Q_i(x_i) + \frac{1}{m_i} (x - x_i) \cdot C_i (x - x_i) + \dots \quad (12.3)$$

V případě, že dráhové elementy první a druhé sady budou sobě odpovídat, čili že identifikace bude správná, budou se hodnoty členů ΔQ_i blížit limitně nule. Můžeme vytvořit směrovou funkci, která bude kombinací pozorování v obou obloucích dráhy, funkce Q bude obsahovat lineární kombinaci Q_0 kombinací minim funkce $Q_1(x_1), Q_2(x_2)$ spolu se zahrnutím odchylek ΔQ , a se zahrnutím $m = m_1 + m_2$:

$$mQ(x) = \zeta_1 \cdot \zeta_1 + \zeta_2 \cdot \zeta_2 = m_1 Q_1(x) + m_2 Q_2(x) = mQ_0 + m\Delta Q(x) \quad (12.4)$$

$$mQ_0 = [m_1 Q_1(x_1) + m_2 Q_2(x_2)] \quad (12.5)$$

$$m\Delta Q(x) = m_1 \Delta Q_1(x) + m_2 \Delta Q_2(x) = (x - x_1) \cdot C_1 (x - x_1) + (x - x_2) \cdot C_2 (x - x_2) + \dots \quad (12.6)$$

Pro vyřešení výše uvedených rovnic můžeme použít lineární aproximace. Toto je poměrně tvrdý předpoklad, použít pouze lineární metodu na výpočty, leč praxe ukazuje, že je plně postačující. Můžeme tudíž ignorovat všechny členy vyšších řádů v rovnicích (12.1) a (12.3). Pro rovnici (12.3) dostaneme následující vyjádření:

$$m\Delta Q(x) \cong x \cdot (C_1 + C_2)x - 2x \cdot (C_1x_1 + C_2x_2) + x_1 \cdot C_1x_1 + x_2 \cdot C_2x_2 \quad (12.7)$$

Nalezneme-li minimum ΔQ z výše uvedených rovnic, dostaneme též novou hodnotu x_0 , která je též minimum zjednodušené funkce:

$$m\Delta Q(x) \cong (x - x_0) \cdot C_0(x - x_0) + K \quad (12.8)$$

Z rovnice (12.6) s užitím rovnic předcházejících můžeme určit hodnoty C_0 , C_0x_0 a K :

$$C_0 = C_1 + C_2 \quad (12.9)$$

$$C_0x_0 = C_1x_1 + C_2x_2 \quad (12.10)$$

$$K = x_1 \cdot C_1x_1 + x_2 \cdot C_2x_2 - x_0 \cdot C_0x_0 \quad (12.11)$$

Pokud je matice C_0 , která je dána součtem dvou matic C_1 a C_2 , pozitivně definitní, můžeme určit i její kovarianční matici $\Gamma_0 = C_0^{-1}$ a pak dostaneme:

$$x_0 = \Gamma_0(C_1x_1 + C_2x_2), \quad (12.12)$$

kterážto má jednoduchou interpretaci z hlediska odchylek. Jestliže máme identifikaci správnou, musí nám každá ze dvou iterací pro $x \rightarrow x_i$, pro $C_i = C_i(x_i)$ konvergovat tak, že dostaneme:

$$C_1(x - x_1) = 0, C_2(x - x_2) = 0 \Rightarrow (C_1 + C_2)x = C_1x_1 + C_2x_2 \quad (12.13)$$

Je vidět, že s užitím předpokladu lineárnosti C_1 a C_2 , dostaneme stejné hodnoty „funkcí“ v x_1 , x_2 a x_0 , z čehož vyplývá, že dostáváme $x = x_0$, což je výsledek první derivace řešeného problému.

Chyba identifikace je dána poměrem K/m , což odpovídá minimální chybě $\Delta Q(x)$ normalizované počtem použitých pozorování. V lineární aproximaci tak dostaneme následující vztahy:

$$\frac{K}{m} = \Delta Q(x_0) \quad (12.14)$$

$$x_0 \rightarrow x_0 + v, x_1 = x_1 + v, x_2 = x_2 + v \quad (12.15)$$

$$K \rightarrow K + 2v \cdot (C_1 x_1 + C_2 x_2 - C_0 x_0) + v \cdot (C_1 + C_2 - C_0)v = K \quad (12.16)$$

Z rovnice (12.14) můžeme spočítat hodnotu K , pokud dosadíme $-x_1$, za předpokladu, že $x_1 \rightarrow 0, x_2 \rightarrow x_2 - x_1 = \Delta x, x_0 \rightarrow \Gamma_0 C_2 \Delta x$. Poté dostaneme:

$$K = \Delta x \cdot C_2 \Delta x - (x_0 - x_1) \cdot C_0 (x_0 - x_1) = \Delta x \cdot C \Delta x, \quad (12.17)$$

kde $C = C_2 - C_2 \Gamma_0 C_2$. Podobně získáme hodnotu K i pro $-x_2$:

$$K = \Delta x \cdot C_1 \Delta x - (x_0 - x_2) \cdot C_0 (x_0 - x_2) = \Delta x \cdot C \Delta x \quad (12.18)$$

Výše uvedené rovnice jsou z matematického hlediska správné, ale při numerickém řešení se někdy, v souvislosti s nepřesnými pozorováními a nestejnorodou hodnotou kvality jednotlivých použitých pozic, můžeme dostat i do numerických obtíží. Výsledky můžeme shrnout do následující rovnice:

$$Q(x) \cong Q_0 + \frac{1}{m} \Delta x \cdot C \Delta x + \frac{1}{m} (x - x_0) \cdot C_0 (x - x_0) \quad (12.19)$$

kteřá představuje chyby pozorování s ohledem na identifikaci dvou sad pozorování, založené na vzájemné koincidenci elipsoidů, která je definována maticí C_0 .

Tento algoritmus má i geometrickou interpretaci. Vlastně jde o průnik dvou prostorových elips (každá z nich představuje dráhu objektu v jedné z identifikovaných opozic) a vznik elipsy třetí, která má společné body s oběma elipsami. Pro výslednou elipsu i zdrojové elipsy musí zároveň platit následující rovnice, udávající zároveň i přesnost a spolehlivost identifikace parametrem ε .

$$m\Delta Q < \varepsilon, m_1\Delta Q_1 < \varepsilon, m_2\Delta Q_2 < \varepsilon \quad (12.20)$$

Pro praktické využití je daná metoda ne úplně praktická, protože předpokládá existenci dvou relevantních sad dráhových elementů. A takovouto sadu dráhových elementů nemůžeme obvykle pořídit za jednu pozorovací noc, ale potřebujeme několik nocí pozorování. Proto byla tato metoda pro praktické užití při pozorování poupravena. Ale i upravená metoda vychází z principů výše popsané metody [4]. Jde o dvě různé metody založené na různých principech. První, pracující s dráhovými elementy je velice přesná, ale zdlouhavá, výpočetně náročná, a pro její realizaci je třeba značného množství dat v obou obloucích dráhy. Druhá je ve svém principu méně robustní, ale zato velice rychlá a i poměrně kvalitní (spolehlivost přes devadesát procent).

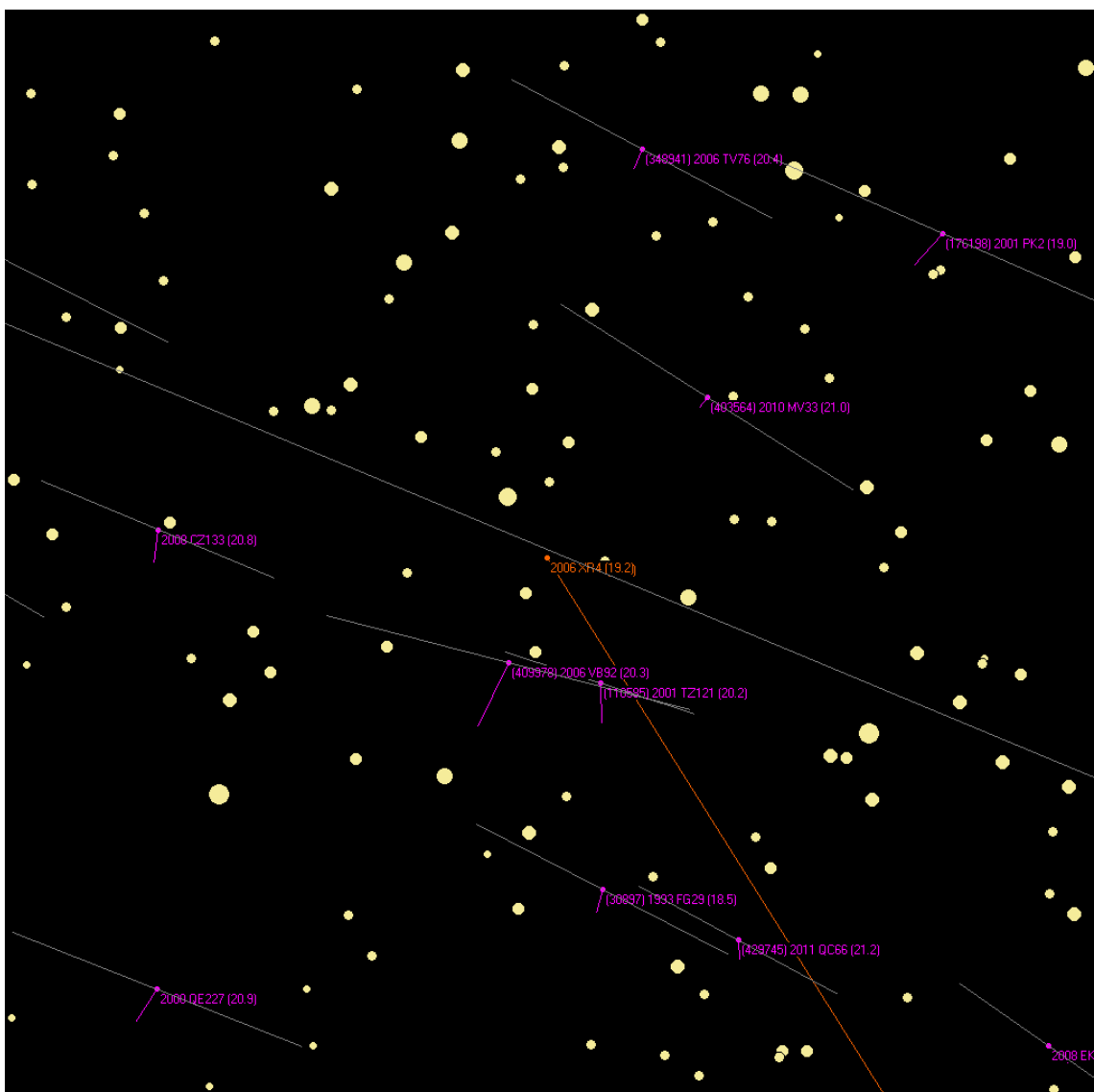
Princip metody, která byla prakticky mnohokrát s úspěchem použita, jak dokládají i následující příklady, je velice jednoduchý. Je proto s podivem, že valná část pozorovatelů tuto metodu nepoužívá a spoléhá se na identifikaci objektů celosvětové centrály Minor Planet Center. Observatoř Klet' je jedna z mála observatoří v tomto oboru, která identifikaci objektů provádí sama. Základem je předpoklad, že dráhové parametry nezávislé na čase jsou určeny přesně. Čili že prostorová elipsa, po které obíhá objekt ve sluneční soustavě, byla určena správně (to je předpoklad shodný s výše uvedenou přesnější metodou). Tudíž lze porovnat dráhové elipsy v jednotlivých rocích/opozicích pozorování, které zákonitě musí být stejné (pomineme-li případy těsných přiblížení objektů k velkým planetám sluneční soustavy, které dráhové parametry rapidně mění a je třeba pro identifikaci užít úplně jiných sofistikovanějších a pracnějších metod založených na principech nebeské mechaniky a gravitačního zákona).

Spočteme si tudíž předpokládanou polohu daného tělesa na nebeské sféře. Tím získáme základní bod, ze kterého budeme vycházet. Nyní vyjdeme z předpokladu, že těleso se na dráze zpozdílo nebo předběhlo o jeden den. Spočteme si novou hodnotu střední anomálie M_0 , která je oproti původní střední anomálii M o den (neboli střední denní pohyb n) posunuta:

$$M_0 = M \pm n \quad (12.21)$$

Nyní opět spočteme efemeridu objektu, ale s upravenou hodnotou střední anomálie. Porovnáním hodnot efemerid zjistíme, kde by se těleso mělo nacházet, pokud by bylo přesně na efemeridě, a o den se „předbíhalo“ či o den se „opozdilo“.

Zdánlivě by se mohlo zdát, že toto je zbytečný krok, že stačí spočítat efemeridu na den dopředu a budeme mít oblast, kde se těleso bude nalézat. To je ale omyl, protože těleso se nám pohybuje v prostoru, kdežto efemeridy počítáme na nebeské sféře vlastně plošně (a nadto je v pohybu i Země). Rozdíl mezi zdánlivým pohybem a variací průchodu přísluním znázorňuje následující obrázek.



Obr. 25: Pohyb tělesa na nebeské sféře společně se zobrazenou line of variation (pohyb oranžový či fialový, line of variation šedivá) (Zdroj: Observatoř Klet)

Zdánlivý pohyb blízkozemní planety 2006 XR₄ na obloze je na *obr. 25* znázorněn oranžovou barvou. Linie *line of variation* šedivou barvou. Fialově, též se šedivou *line of variation*, jsou znázorněny planety hlavního pásu nacházející se v daném čase v daném poli. Je zřejmé, že relativní pohyb po obloze a změny pohybu na dráze vůbec sobě neodpovídají, přesně dle uvedené teorie. Hvězdy z katalogu USNO B-1.0 jsou znázorněny žlutě (zdroj:Observatoř Klet', program KLAC, Klet' Software Package) [6].

Pokud se těleso nalézá na linii vytýčené první a druhou efemeridou se změněnou střední anomálií *M*, je poměrně velká pravděpodobnost, že jde o hledané/identifikované těleso. Nyní je potřeba napozorovat sadu snímků a přesně je astrometricky změřit. Hledané těleso se nejen musí nalézat na této linii (říkáme jí *line of variation*, protože měníme ve výpočtu pouze čas průchodu přísluním neboli polohu objektu na své dráze, dráhu samotnou nikoliv), musí mít rámcově stejnou jasnost, jak se předpokládá u hledaného tělesa, a nadto musí mít stejný relativní pohyb na obloze. Pokud toto vše splňuje, můžeme se domnívat, že jde o hledané/identifikované těleso. Jistotu budeme mít samozřejmě po pozorováních v minimálně dvou nocích, kdy musí pozorování souhlasit a odchylka na dráze musí být v obou pozorovacích nocích stejná.

Zde je příklad efemeridy tělesa včetně vypočtené variační hodnoty v rektascenzi (*vRA*), deklinaci (*vdel*) a pozičního úhlu variační linie (*vPA*). Jak je vidět na hodnotách, mění se během těsného přiblížení velice znatelně, *vRA* od -418,68 min/den do 731,98 min/den, *vdel* od 2479 ' /den do -308,11 ' /den, a poziční úhel od 74° do 282°. Zároveň je v efemeridě vidět i vlastní relativní pohyb tělesa (motion v " /min a poziční úhel pohybu tělesa PA ve °) (Zdroj:Observatoř Klet')[6].

2006 XR₄

Date	TT	RA (J2000)	Decl	Delta	r	Elon.	Phase	mag	motion	PA	vRA	vdel	vPA
dd.mm.yyyy	hh:mm	hh:mm:ss	+dd:mm:ss	AU	AU	deg	deg		"/min	deg	min/day	' /day	deg
15.12.2006	23:00	04:14:40	-12°36'23"	0.003	0.987	139.9E	039.9	15.5	224.60	195.4	441.30	-308.11	267.3
16.12.2006	23:00	00:08:03	-73°28'15"	0.006	0.982	070.1E	109.5	19.1	81.04	245.1	731.98	2479.70	282.7
17.12.2006	23:00	20:07:35	-71°45'12"	0.011	0.977	052.7E	126.8	21.7	22.83	303.6	-418.68	1772.98	074.2
18.12.2006	23:00	19:14:00	-67°49'18"	0.016	0.973	046.5E	132.8	23.2	10.15	316.5	-322.59	1157.00	076.6
19.12.2006	23:00	18:53:56	-65°32'31"	0.022	0.968	043.4E	135.7	24.2	5.70	321.3	-266.57	794.10	078.8
20.12.2006	23:00	18:43:34	-64°05'58"	0.028	0.963	041.5E	137.4	24.8	3.66	323.9	-226.49	573.46	080.4
21.12.2006	23:00	18:37:14	-63°06'07"	0.033	0.959	040.2E	138.5	25.4	2.58	325.7	-195.88	433.58	081.6
22.12.2006	23:00	18:32:57	-62°21'44"	0.039	0.954	039.3E	139.3	25.8	1.93	327.2	-171.76	341.38	082.5
23.12.2006	23:00	18:29:51	-61°46'58"	0.045	0.949	038.5E	139.8	26.2	1.53	328.7	-152.36	278.49	083.1
24.12.2006	23:00	18:27:29	-61°18'29"	0.050	0.944	038.0E	140.1	26.4	1.26	330.2	-136.47	234.27	083.5
25.12.2006	23:00	18:25:38	-60°54'15"	0.056	0.940	037.6E	140.4	26.7	1.07	331.8	-123.25	202.35	083.8
26.12.2006	23:00	18:24:08	-60°32'56"	0.062	0.935	037.2E	140.5	26.9	0.94	333.6	-112.10	178.77	083.9
27.12.2006	23:00	18:22:54	-60°13'41"	0.067	0.930	036.9W	140.6	27.1	0.85	335.6	-102.57	160.98	084.0
28.12.2006	23:00	18:21:52	-59°55'51"	0.073	0.926	036.7W	140.6	27.3	0.78	337.7	-94.35	147.31	084.1
29.12.2006	23:00	18:21:01	-59°39'01"	0.079	0.921	036.5W	140.5	27.4	0.73	340.1	-87.17	136.62	084.0
30.12.2006	23:00	18:20:17	-59°22'52"	0.085	0.917	036.4W	140.4	27.6	0.70	342.5	-80.85	128.12	084.0
31.12.2006	23:00	18:19:42	-59°07'09"	0.091	0.912	036.3W	140.3	27.7	0.67	345.1	-75.24	121.26	083.9
01.01.2007	23:00	18:19:13	-58°51'41"	0.096	0.907	036.3W	140.1	27.8	0.66	347.7	-70.22	115.63	083.7
02.01.2007	23:00	18:18:50	-58°36'21"	0.102	0.903	036.2W	139.9	27.9	0.65	350.3	-65.71	110.94	083.6

03.01.2007	23:00	18:18:32	-58°21'01"	0.108	0.898	036.2W	139.7	28.0	0.65	352.9	-61.63	106.98	083.4
04.01.2007	23:00	18:18:21	-58°05'37"	0.114	0.894	036.2W	139.4	28.0	0.65	355.5	-57.91	103.58	083.2
05.01.2007	23:00	18:18:14	-57°50'06"	0.120	0.889	036.3W	139.1	28.1	0.65	358.0	-54.52	100.62	083.0
06.01.2007	23:00	18:18:13	-57°34'24"	0.126	0.885	036.4W	138.8	28.1	0.66	000.5	-51.40	98.00	082.8
07.01.2007	23:00	18:18:16	-57°18'28"	0.132	0.880	036.4W	138.4	28.2	0.67	002.8	-48.53	95.65	082.5
08.01.2007	23:00	18:18:24	-57°02'18"	0.139	0.876	036.5W	138.0	28.2	0.68	005.1	-45.88	93.52	082.3
09.01.2007	23:00	18:18:37	-56°45'52"	0.145	0.872	036.7W	137.6	28.3	0.70	007.2	-43.41	91.56	082.0
10.01.2007	23:00	18:18:55	-56°29'08"	0.151	0.867	036.8W	137.2	28.3	0.71	009.3	-41.13	89.74	081.7
11.01.2007	23:00	18:19:17	-56°12'06"	0.157	0.863	037.0W	136.7	28.3	0.73	011.2	-38.99	88.03	081.4
12.01.2007	23:00	18:19:44	-55°54'45"	0.164	0.859	037.1W	136.3	28.3	0.75	013.1	-37.00	86.40	081.2
13.01.2007	23:00	18:20:16	-55°37'05"	0.170	0.855	037.3W	135.8	28.3	0.77	014.9	-35.13	84.84	080.9

Obvyklý správný postup je následující. Spočte se relevantní dráha (v případě, že jsou větší chyby v astrometrii a kratší oblouk pozorování, může být i víc dráhových variant), a to včetně spočtení hodnot $O-C$ pro jednotlivá pozorování (pro výpočet dráhových elementů použítá pozorování (O – hodnota zjištěná pozorováním, C – hodnota zjištěná výpočtem z dráhových elementů), a doladěné metodou nejmenších čtverců na co nejlepší výsledky. $O-C$ se počítá nezávisle pro obě souřadnice, tj. pro rektascenzi i pro deklinaci. Porovnává se předpovězená poloha tělesa s naměřenými hodnotami. Následně se spočítají dráhové elementy z obou oblouků pozorování a opět se optimalizují metodou nejmenších čtverců. Poslední krok metody je nejtěžší. Je potřeba zanalyzovat $O-C$, jestli získané dráhové elementy jsou reálné a realistické, čili zda identifikace je nebo není správná.

Pokud je identifikace správná, hodnoty $O-C$ oscilují díky náhodným chybám u jednotlivých měření kolem stejné hodnoty (ale ne nutně nulové). Rovnice lineární regrese vypočtená z hodnot $O-C$ musí mít u x hodnotu blízkou stejnému číslu. Vše objasníme na následujících dvou příkladech.

Tab. 3 ukazuje nesprávnou čili chybnou identifikaci, jak je zřejmé z hodnot $O-C$.

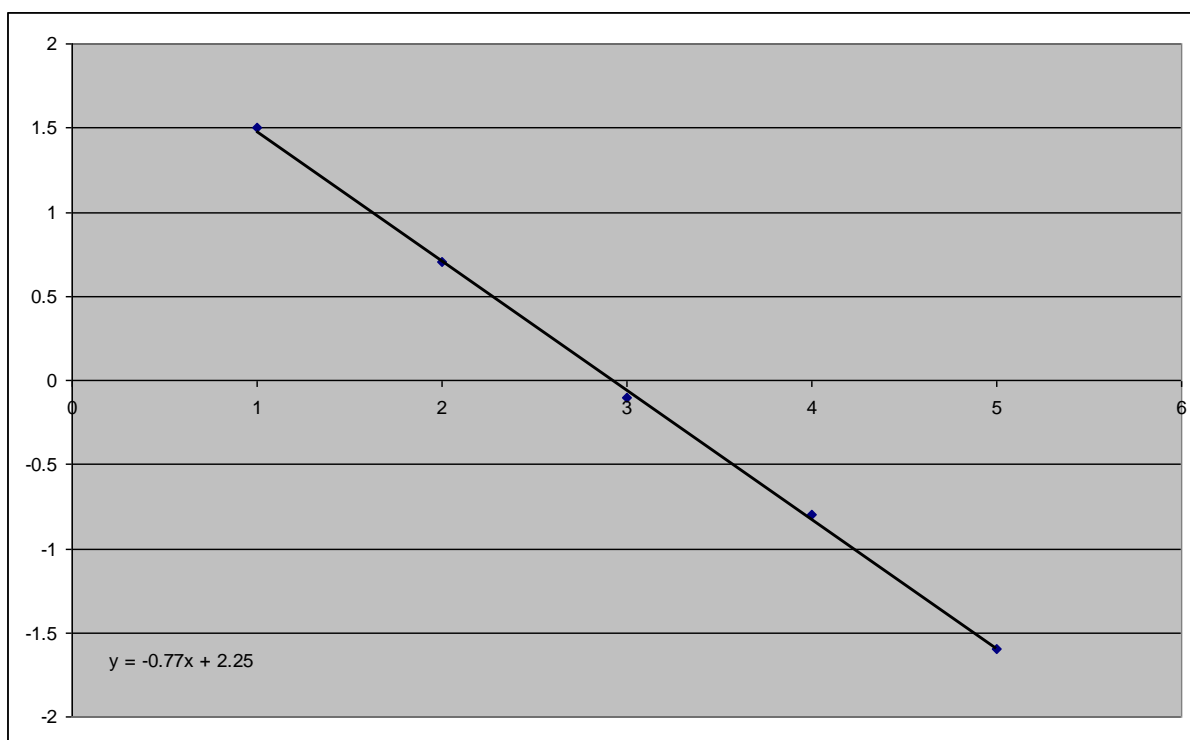
Tab. 3: $O-C$ u chybné identifikace

Pozorování	čas	$O-C$
č.	Pozorování	["]
1	T_0	+1,5
2	$T_0 + 1 \text{ min}$	+0,7
3	$T_0 + 2 \text{ min}$	-0,1
4	$T_0 + 3 \text{ min}$	-0,8
5	$T_0 + 4 \text{ min}$	-1,6

Trend přímky lineární regrese z dat uvedených v *Tab. 3* ukazuje *obr. 26*. Je vidět převládající „nenulový“ trend, čili že jde o špatnou neboli chybnou identifikaci, jak vyplývá z výše uvedených informací.

Rovnice lineární regrese pro daná pozorování má tvar:

$$y = -0.77x + 2.25 \quad (11.22)$$



Obr. 26: Lineární regrese z pozorování dle Tab. 3

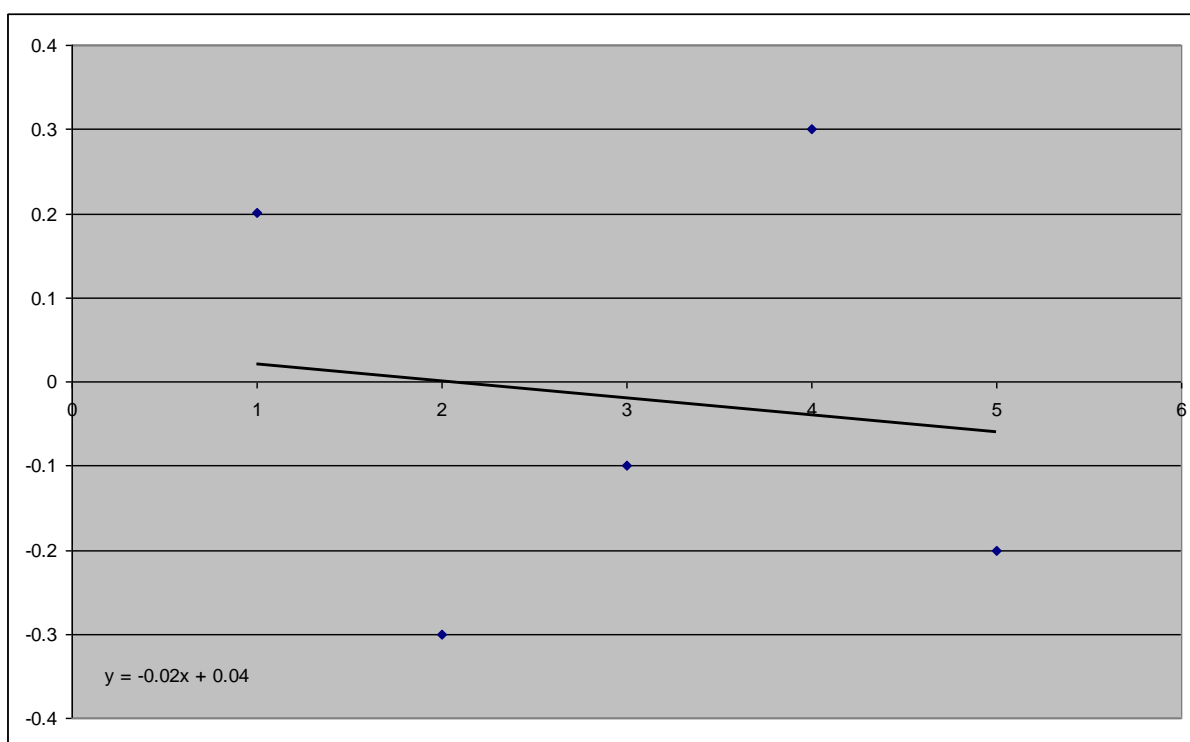
Příklad pravděpodobně správné identifikace ukazuje *Tab. 4*. a následně *obr. 27*. Hodnoty *O-C* oscilují kolem stejné hodnoty, v tomto případě kolem nuly (což není pravidlem u objektů pozorovaných v krátkém oblouku dráhy, důležitější než absolutní hodnota *O-C* je trend těchto hodnot v čase, zda jsou podobná pro všechna pozorování či nikoliv).

Tab. 4: O-C u pravděpodobně správné identifikace

Pozorování č.	čas Pozorování	O-C [“]
1	T_0	+0.2
2	$T_0 + 1 \text{ min}$	-0.3
3	$T_0 + 2 \text{ min}$	-0.1
4	$T_0 + 3 \text{ min}$	+0.3
5	$T_0 + 4 \text{ min}$	-0.2

Rovnice lineární regrese pro pozorování z *Tab. 4* má tvar

$$y = -0.02x + 0.04 \quad (12.23)$$



Obr. 27: Lineární regrese z pozorování dle Tab. 4

U špatné/chybné identifikace v *Tab. 3* je ve sloupci *O-C* vidět systematický posun hodnot, což svědčí o tom, že pohyb pozorovaného tělesa evidentně neodpovídá pohybu

předpokládaného identifikovaného objektu, z čehož lze usuzovat, že druhý pozorovací oblouk patří tělesu na jiné dráze čili jinému. Oproti sloupci *O-C* v *Tab. 4* ukazuje pouze mírný rozptyl v mezích přesnosti jak astrometrických metod tak přesnosti používaných katalogů, což znamená, že je velice pravděpodobné, že jde o správnou identifikaci. Pokud by šlo o identifikaci blízkozemního tělesa, máme prakticky jistotu, že je identifikace správná. V případě tělesa hlavního pásu, kde planetek na podobných drahách může být několik, je potřeba ještě identifikaci potvrdit následným pozorováním s užitím efemeridy spočtené z obou oblouků dráhy, čili s užitím identifikace. Podobná situace ale může nastat i u blízkozemních planetek, kde je prvotní oblouk pozorování krátký a je více možností na výpočet odpovídajících dráhových elementů [4].

Reálnou situaci – aplikaci v astrometrickém programu – ukazuje tabulka *Tab. 5*, kde se již kromě hodnot *O-C* vyskytují i hodnoty variace dráhových elementů, o kterých je hovořeno v následujících odstavcích (Zdroj: Observatoř Klet') [5, 6].

Tab. 5: Ukázka identifikace s hodnotami O-C a variace

Designation mag XXXXXXXXXXXXX m.m T	rok mes den	R.A.	O-C		VARIACE	
			DECL	R.A.	DECL	
	NNyyyy mm dd.ddddd	s.ss	vv.v	dd.ddd	dd.ddd	
13131	C2011 11 29.02399 M	-0.80	-1.7	-0.005	-0.006	
13131	C2011 11 29.02454 M	-0.80	-1.8	-0.005	-0.006	
13131	C2011 11 29.02709 M	-0.81	-1.6	-0.005	-0.006	
13131	C2011 11 29.02816 M	-0.80	-1.6	-0.005	-0.006	
K5276	C2011 11 23.91625 M	-0.81	-5.5	-0.004	-0.006	
K5276	C2011 11 23.91874 M	-0.85	-5.3	-0.004	-0.006	
K5276	C2011 11 23.91934 M	-0.87	-5.4	-0.004	-0.006	
K5276	C2011 11 23.92492 M	-0.84	-6.1	-0.004	-0.007	
K5276	C2011 11 23.92560 M	-0.84	-6.0	-0.004	-0.007	

13 Příklady identifikací

Identifikaci malých těles sluneční soustavy lze dle typu identifikovaných objektů rozdělit do několika kategorií. Nejčastější, s ohledem na největší množství těles daného typu, je identifikace objektů z hlavního pásu planetek, které se ve sluneční soustavě nachází mezi dráhami planet Mars a Jupiter. Nejdůležitější, i když výpočetně s ohledem na menší množství kandidátů na přesnou identifikaci a obvykle atypický pohyb po obloze trošku jednodušší, a tím pádem i lehčí, je identifikace těles blízkozemních. Tyto identifikace jsou velice důležité pro výpočet následných přiblížení blízkozemních objektů k Zemi, a i k případným výpočtům pravděpodobností srážek se Zemí. Další méně zastoupenou skupinou je identifikace vzdálenějších objektů sluneční soustavy – Kentaurů a transneptunických těles. I tyto identifikace, s ohledem na menší množství objektů a atypický pohyb na obloze, patří mezi jednodušší. Další, méně početnou skupinou objektů pro identifikaci, je identifikace komet, případně kometárních jader rozpadlých komet. Poslední a v tomto přehledu nejdůležitější je identifikace objektů publikovaných na *The NEO Confirmation Page* Minor Planet Center [29], a to s ohledem na skutečnost, že jde o kandidáty na nová blízkozemní či jinak zajímavá tělesa a je potřeba v krátké době spočítat relevantní dráhové elementy. Objektů na následnou astrometrii, případně i potvrzení objevu, je zde obvykle řada, a včasná identifikace s již známými tělesy ušetří pozorovací čas a umožní soustředění pozorovatelských aktivit na opravdu nové objekty.

13.1 Identifikace planetek hlavního pásu

13.1.1 Identifikace 2000 QM₁₆₆

Planetka hlavního pásu 2000 QM₁₆₆, pohybující se ve sluneční soustavě mezi Marsem a Jupiterem, byla při svém objevu v roce 2000 pozorována od 3. srpna do 3. října 2000, čili celé dva měsíce, a byly získány poměrně kvalitní dráhové elementy tohoto tělesa. Dne 4. května 2003 se objevila jako „nově objevené“ těleso 2003 HP₃₀ v zorném poli teleskopu KLENOT. Následnou astrometrií a kontrolou dráhových parametrů (pozorovatel, astrometrie a identifikace M. Tichý) bylo spočteno, že jde o těleso objevené již v roce 2000. Správná identifikace byla potvrzena pracovníky Minor Planet Center a následně publikována v cirkuláři Minor Planets Electronic Circular (MPEC) 2003-J43 [19]:

The Minor Planet Electronic Circulars contain information on unusual minor planets and routine data on comets. They are published on behalf of Commission 20 of the International Astronomical Union by the Minor Planet Center, Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, MA 02138, U.S.A.

Prepared using the Tamkin Foundation Computer Network

MPC@CFA.HARVARD.EDU

URL <http://www.minorplanetcenter.net/iau/mpc.html> ISSN 1523-6714

DAILY ORBIT UPDATE (2003 MAY 9 UT)

Update to MPEC 2003-J39

Full-precision elements for the objects listed here are available at
<ftp://cfa-ftp.harvard.edu/pub/MPCORB/>

New identifications:

K00QG6M K03H30P

Tichy

.....

Následně bylo těleso sledováno v letech 2004, 2006, 2008, 2010 a 2011. S ohledem na kvalitní dráhové elementy bylo již i očíslováno, jak je vidět na posledních dráhových elementech.

(92809) 2000 QM₁₆₆

Epoch 2011 Aug. 27.0 TT = JDT 2455800.5 MPC
M 39.26872 (2000.0)
n 0.26848505 Peri. 78.82564 T = 2455654.23963 JDT
a 2.3797024 Node 212.38141 q = 2.1060707
e 0.1149857 Incl. 5.95809
P 3.67 H 15.7 G 0.15 U 0
From 278 observations at 8 oppositions, 1999-2011, mean residual 0".58.

13.1.2 Identifikace 1999 LX₅

Planetka hlavního pásu 1999 LX₅ byla objevena v rámci projektu LINEAR dne 24. května 1999. V prvním roce byla pozorována od 24. května do 21. června 1999. Jak je vidět z dráhových elementů, jedná se o planetku z vnitřní části hlavního pásu dráhového typu Hungaria (tento dráhový typ planetek má velkou poloosu dráhy o něco menší než 2 AU, sklon dráhy k rovině ekliptiky přes 20°, a pohybují se po poměrně málo výstředné elipse s excentricitou obvykle nepřesahující 0,01).

Planetka byla znovunalezena 4. srpna 2002 opět v rámci projektu LINEAR. Vyskytlo se podezření, že se jedná o blízkozemní planetku. Po porovnání efemerid a pohybu nově

objeveného tělesa se všemi doposud známými tělesy vypočetl M. Tichý (Observatoř Klet') identifikaci nově objeveného tělesa na těleso z roku 1999. Po ověření v Minor Planet Center byla následně identifikace publikována v MPEC 2002-R41 [16]:

M.P.E.C. 2002-R41

Issued 2002 Sept.10, 06:06 UT

.

New identifications:

.

J99L05X K02P79Z

Tichy

.

Jde tudíž o identifikaci, kde nebyla použita vlastní přesná astrometrická a fotometrická pozorování, ale na samotnou identifikaci byla použita pozorování pořízená astronomy ve světě, jelikož použitá metoda identifikace není odvislá od pozorovacího místa a času pozorování, což je velice výhodné. Následně byla planetka pozorována v letech 2004, 2005, 2007 a 2010 a předobjevově pozorována v roce 1991. S ohledem na kvalitně spočtené dráhové elementy již byla očíslována, jak dokládají níže uvedené dráhové elementy:

(80091) 1999 LX₅

```
Epoch 2011 Aug. 27.0 TT = JDT 2455800.5 MPC
M 110.78790 (2000.0)
n 0.35772737 Peri. 141.10863 T = 2455490.80074 JDT
a 1.9653260 Node 175.51438 q = 1.8432046
e 0.0621380 Incl. 23.25871 Earth MOID = 0.85439 AU
P 2.76 H 15.8 G 0.15 U 1
From 234 observations at 8 oppositions, 1991-2008, mean residual 0".51.
```

13.1.3 Identifikace 1997 AY₁₄

Kromě identifikací planetek a komet objevených na jiných observatořích se malá část projektu Observatoře Klet' věnuje i znovunalezení objektů objevených právě na Kleti. To je případ planetky 1997 AY₁₄, která byla objevena na Observatoři Klet' 13. ledna 1997 a pozorována do 12. března 1997. Poté byla více než tři roky nepozorovatelná, anebo se pohybovala během nocí v tak hustých částech Mléčné dráhy, že její pozorování byla prakticky

vyloučena. Znovunalezena byla až 28. září 2000 a to opět na Kleti (pozorovatel, astrometrie, fotometrie a identifikace M. Tichý). Identifikace byla publikována v MPEC 2000-S71 [25]:

M.P.E.C. 2000-S71

Issued 2000 Sept.30, 06:28 UT

..

..

New identifications:

J96T10A K00QG7G

Williams

J97A14Y K00S45D

Tichy

..

Planetka byla následně pozorována až do roku 2007 a i tento objekt již obdržel definitivní číslo v katalogu planetek.

(100508) 1997 AY₁₄

Epoch 2011 Aug. 27.0 TT = JDT 2455800.5

MPC

M 346.54671 (2000.0)

n 0.17562204 Peri. 53.57447 T = 2455877.10364 JDT

a 3.1580333 Node 301.18763 q = 3.0782625

e 0.0252597 Incl. 20.71887

P 5.61 H 13.9 G 0.15 U 0

From 225 observations at 8 oppositions, 1997-2009, mean residual 0".47.

13.2 Identifikace blízkozemních planetek

13.2.1 Amor 2003 HU₄₂

Blízkozemní planetka 2003 HU₄₂ typu Amor byla při svém objevu v rámci projektu Spacewatch pozorována v roce 2003 pouze od 29. dubna do 5. května. Prvotní spočtené předběžné dráhové elementy byly následující:

Epoch 2003 Apr. 11.0 TT = JDT 2452740.5

MPC

M 169.74516 (2000.0)

n 0.39347214 Peri. 197.99047

a 1.8444210 Node 202.92514

e 0.3294830 Incl. 10.30186

P 2.50 H 18.6 G 0.15

From 16 observations 2003 Apr. 29-May 1.

Blízkozemní planetka byla náhodně znovuobjevena v březnu 2005 v rámci hledacího programu Catalina Sky Survey. S ohledem na krátký oblouk pozorování v roce 2003 se nezdařila okamžitá identifikace tohoto objektu. Identifikace objektu byla provedena analýzou pozorování tělesa na Observatoři Klet' (astrometrie, fotometrie a identifikace objektu M. Tichý). Nové dráhové elementy včetně identifikace byly následně publikovány v cirkuláři MPEC 2005-E27 [23]:

```
2003 HU42
Id. M. Tichy (2005 observations)
Epoch 2005 Jan. 30.0 TT = JDT 2453400.5 MPC
M 72.50278 (2000.0)
n 0.39342974 Peri. 196.07921
a 1.8445535 Node 203.20119
e 0.3402643 Incl. 10.53409
P 2.51 H 18.4 G 0.15 U 6
```

13.2.2 Apollo 2001 YF₁

Planetka 2001 YF₁ typu Apollo byla objevena v rámci projektu LINEAR 17. prosince 2001. V první opozici byla pozorována od 17. prosince 2001 do 23. srpna 2002. Poté přestala být pozorovatelná. Prvotní dráhové elementy, uvedeny níže, ukazovaly na možnost znovuobjevení v létě 2004.

```
Epoch 2001 Dec. 17.0 TT = JDT 2452260.5 MPC
M 283.17645 (2000.0)
n 0.54298741 Peri. 289.45431
a 1.4880227 Node 279.53213
e 0.3519139 Incl. 19.88978
P 1.82 H 19.3 G 0.15
From 16 observations 2001 Dec. 17-19.
```

Planetka 2001 YF₁ typu Apollo byla znovuobjevena v rámci projektu KLENOT 16. července 2004 (astrometrie a identifikace M. Tichý). Od předpokládaných spočtených souřadnic dle dráhových elementů byla vzdálena 10,8" v rektascenzi a -3,3" v deklinaci (pro představu, zorné pole teleskopu KLENOT je 37' x 37'). Pokud užijeme „dráhové vyjádření“,

planetka se na dráze předběhla o +0,0046 dne, čemuž odpovídá malý rozdíl ve spočtených a naměřených souřadnicích [22].

```
Epoch 2004 July 14.0 TT = JDT 2453200.5 MPC
M 72.63406 (2000.0)
n 0.54396751 Peri. 289.75897
a 1.4862347 Node 279.56843
e 0.3395115 Incl. 20.01151
P 1.81 H 19.5 G 0.15 U 2
```

13.2.3 Apollo 2002 SR₄₁

Planetka typu Apollo 2002 SR₄₁ byla objevena 30. září 2002 v rámci amerického projektu LINEAR. V první objevové opozici byla sledována od 30. září do 31. října 2002. Zpočátku s ohledem na malé množství fotometrických údajů bylo těleso dokonce zařazeno do Potenciálně nebezpečných planetek, jak je vidět u počátečních dráhových elementů.

Orbital elements:

```
2002 SR41 PHA 0.032
Epoch 2002 Sept. 23.0 TT = JDT 2452540.5 MPC
M 272.90314 (2000.0)
n 0.86237423 Peri. 257.61012
a 1.0931310 Node 248.53493
e 0.5032939 Incl. 11.82072
P 1.14 H 19.8 G 0.15
From 16 observations 2002 Sept. 30-Oct. 1.
```

Planetka 2002 SR₄₁ byla znovunalezena v rámci projektu KLENOT 24. srpna 2003 (astrometrie, fotometrie a identifikace M. Tichý). S ohledem na množství kvalitních fotometrických dat bylo těleso vyřazeno z kategorie PHA, protože se ukázalo být menší než 150 metrů v průměru. Těleso se na dráze „zpozdlilo“ o 0,0019 dne, což znamenalo rozdíl ve spočtených a měřených astrometrických souřadnicích (O-C) -24,1“ v rektascenzi a -11,9“ v deklinaci. Znovunalezením byly opět řádově zpřesněny dráhové elementy tělesa. Na tomto příkladu je vidět, jak důležitá je následná astrometrie a znovunalezení tělesa nejen s ohledem

na zpřesnění dráhových elementů ale i na zpřesnění určení velikosti pozorovaného objektu [21].

```

2002 SR41
Epoch 2003 June 10.0 TT = JDT 2452800.5 MPC
M 138.51827 (2000.0)
n 0.87465087 Peri. 258.02795
a 1.0828781 Node 247.98057
e 0.4905728 Incl. 11.59938
P 1.13 H 20.1 G 0.15 U 5

```

13.2.4 PHA Apollo 1999 TF₂₁₁

Potenciálně nebezpečná planetka typu Apollo 1999 TF₂₁₁ byla objevena 15. října 1999 v rámci projektu LINEAR. S ohledem na předobjevová pozorování byla v prvním objevovém roce planetka pozorována od 6. října do 11. listopadu 1999. Dráhové elementy tělesa z tohoto důvodu nepatřily mezi nepřesnější [24].

```

1999 TF211
Epoch 1999 Oct. 9.0 TT MPC
M 306.58689 (2000.0)
n 0.24349750 Peri. 160.23766
a 2.53984 Node 348.22933
e 0.6344654 Incl. 38.79054
P 4.04 H 14.7 G 0.15

```

První vhodná opozice pro znovunalezení se naskytla v srpnu 2003. S ohledem na poměrně málo astrometrických pozorování v objevovém roce bylo znovuoobjevení tohoto tělesa obtížnější. Rozdíl mezi předpovězenou a faktickou polohou byl $-0,35^\circ$ v rektascenzi a $-0,35^\circ$ v deklinaci. Časový rozdíl v průchodu přísluním byl +1,7 dne. Planetka byla systematicky znovunalezena v rámci projektu KLENOT Observatoře Klet' 4. srpna 2003 (astrometrie a identifikace M. Tichý). Tímto znovuoobjevením došlo k drastickému zpřesnění dráhových elementů tohoto objektu [20].

```

1999 TF211                                     PHA 0.037D
Epoch 2003 June 10.0 TT = JDT 2452800.5      MPC
M 287.04798                                   (2000.0)
n 0.25753390      Peri. 161.10420
a 2.4466947       Node 348.43380
e 0.6146515       Incl. 39.01157
P 3.83            H 15.2                G 0.15      U 4

```

13.2.5 Aten 2002 FT₆

Planetka 2002 FT₆ byla objevena 23. března 2002 v rámci projektu LINEAR. V první objevové opozici byla astrometricky sledována od 23. března do 18. dubna 2002. Dráhové elementy se pohybovaly mezi typem Aten a Apollo. Původní, jak je vidět na elementech, byly dráhové elementy planetky typu Apollo:

```

2002 FT6
Epoch 2002 Mar. 7.0 TT = JDT 2452340.5      MPC
M 53.73189                                   (2000.0)
n 0.97893719      Peri. 226.94545
a 1.0045375       Node 188.40227
e 0.4885544       Incl. 10.27566
P 1.01            H 22.7                G 0.15
From 11 observations 2002 Mar. 23-26.

```

Planetka byla znovuobjevena 25. března 2003 na Observatoři Klet' (astrometrie a identifikace objektu M. Tichý). Ačkoliv od posledních pozorování neuplynul ani rok, nebylo znovunalezení tělesa vůbec jednoduché. Rozdíl (O-C) nakonec činil $+0,57^\circ$ v rektascenzi a $-0,07^\circ$ v deklinaci, což časově představovalo $-0,15$ dne. Daná nepřesnost byla způsobena, jak bylo zřejmé při spočtení (O-C) pro všechna pozorování použitá pro výpočet dráhy, posledními pozorováními v objevovém roce, která byla méně přesná. Výsledné dráhové elementy po znovunalezení ukázaly na planetku typu Aten [26]:

2002 FT6
 Epoch 2003 June 10.0 TT = JDT 2452800.5 MPC
 M 158.19598 (2000.0)
 n 1.00288008 Peri. 226.70291
 a 0.9884849 Node 188.63823
 e 0.4626023 Incl. 9.48863
 P 0.98 H 22.5 G 0.15 U 5

13.3 Identifikace Kentaurů

13.3.1 Kentaur 1997 CU₂₆

Planetka typu 1997 CU₂₆ typu Kentaur byla objevena v rámci projektu Spacewatch 15. února 1997. Prvotní dráhové elementy jsou uvedeny v následujícím přehledu:

Epoch 1997 Feb. 1.0 TT = JDT 2450480.5 Marsden
 M 88.37885 (2000.0)
 n 0.01938077 Peri. 63.50345
 a 13.7263578 Node 302.13821
 e 0.3118525 Incl. 30.06635
 P 50.85 H 6.0 G 0.15
 From 33 observations 1997 Feb. 15-24. (Eccentricity assumed)

V první objevové opozici byla planetka pozorována od 15. února do 28. května 1997. Poté byla z důvodu geometrie dráhy a blízkosti ke Slunci nepozorovatelná. Nad obzorem se na ranní obloze objevila v druhé polovině září 1997. Na Observatoři Klet' byl tento zajímavý objekt znovunalezen 28. září 1997 a následně znovunalezení potvrzeno 29. září (astrometrie a identifikace objektu M. Tichý). Rozdíl mezi spočtenou a napozorovanou polohou (O-C) byl v rektascenzi α (O-C) = -25,5" a v deklinaci δ (O-C) = +8,4". V hodnotě ΔT byla tato hodnota -0,5 dne. S ohledem na poměrně krátké období mezi posledním a prvním znovobjevovým pozorováním, nebylo znovunalezení extrémně obtížné, o čemž svědčí i hodnoty rozdílu spočtené a pozorované rektascenze α a deklinace δ .

Epoch 1997 Dec. 18.0 TT = JDT 2450800.5 Marsden
 M 324.46773 (2000.0)
 n 0.01576752 Peri. 243.26108
 a 15.7504797 Node 300.47641
 e 0.1736194 Incl. 23.42411
 P 62.51 H 6.0 G 0.15 U 4

Jak je vidět z výsledných dráhových elementů, bylo možné díky znovunalezení a identifikaci spočítat i výsledné dráhové elementy jako poruchové (čili se započtením gravitačního působení planet a velkých planetek), o čemž svědčí spočtený parametr U . Pokrok v dráhových parametrech tohoto tělesa je tudíž více než zřejmý [14,15].

13.4 Identifikace komet

13.4.1 Kometa C/2002 A2 (LINEAR)

Kometa C/2002 A2 (LINEAR) byla objevena v rámci hledacího projektu LINEAR (Nové Mexiko, USA). Objev byl oznámen 8. ledna 2002 a astrometricky potvrzen 9. ledna 2002 z Observatoře Klet' (astrometrie a identifikace objektu M. Tichý). Vzápětí byly nalezeny i předobjevové astrometrické pozice z projektu LINEAR z 13. a 17. prosince 2001. V první pozorované objevové opozici byla kometa pozorována až do 5. dubna 2002. Poté se přiblížila úhlově ke Slunci a přestala být pozorovatelná. Výsledkem první sady astrometrických měření byly následující dráhové elementy této komety:

```
Epoch 2001 Nov. 27.0 TT = JDT 2452240.5           Marsden
T 2001 Dec. 9.01432           q  4.7081788           (2000.0)
n  0.01284868           Peri.  19.33672
a  18.0535971           Node   82.26857
e  0.7392110           Incl.  14.22991
P  76.71
```

V následujícím pozorovacím okně byla již kometa ve větší vzdálenosti od Slunce a tím pádem i slabší, což ztěžovalo její znovuobjevení. Znovuobjevena byla na Observatoři Klet' v rámci projektu KLENOT 22. února 2003, čili přibližně deset měsíců po posledním pozorování (astrometrie a identifikace komety M. Tichý). Nově spočtené dráhové elementy byly následně publikovány v cirkuláři Minor Planet Center MPEC 2003-D23 [17]:

```
Epoch 2001 Nov. 27.0 TT = JDT 2452240.5           Marsden
T 2001 Dec. 9.94897           q  4.7087130           (2000.0)
n  0.01286048           Peri.  19.45318
a  18.0425537           Node   82.27174
e  0.7390218           Incl.  14.23188
P  76.64
```

Nově spočtené dráhové elementy měly za následek tak výrazné zlepšení dráhových parametrů, že se podařilo ve spolupráci s kolegy z JPL spočítat čas a místo rozpadu původní komety, ze které toto kometární jádro pochází. Druhým členem páru vzniklého rozštěpením původně jednoho kometárního jádra je níže uvedená kometa C/2002 A1 (LINEAR) [8].

13.4.2 Kometa C/2002 A1 (LINEAR)

Kometa C/2002 A1 (LINEAR) byla stejně jako předešlá objevena v rámci hledacího projektu LINEAR (Nové Mexiko, USA). Objev byl oznámen 8. ledna 2002 a i tento objev byl astrometricky potvrzen 9. ledna 2002 z Observatoře Klet' (astrometrie a identifikace objektu M. Tichý). Vzápětí byly nalezeny i předobjevové astrometrické pozice z projektu LINEAR z 13. a 17. prosince 2001. Kometa byla pozorovatelná do 6. února 2002. Výsledkem první sady pozorování byly následující dráhové elementy:

```
Epoch 2001 Nov. 27.0 TT = JDT 2452240.5           Marsden
T 2001 Dec. 2.20523           q  4.6985332           (2000.0)
n  0.01256837           Peri.  19.17417
a  18.3210399           Node   82.07526
e  0.7435444           Incl.  14.15628
P  78.42
```

Kometa byla znovuobjevena 25. února 2003 v rámci projektu KLENOT Observatoře Klet' (astrometrie a identifikace M. Tichý). Jádro této komety bylo asi dvakrát slabší než jádro komety C/2002 A2 (LINEAR), proto byla pozorována v první opozici neboli pozorovacím okně kratší dobu, a i její znovunalezení bylo obtížnější než její jasnější kolegyně. Výsledkem byly níže uvedené opět značně zpřesněné dráhové elementy tohoto tělesa [18]:

```
Epoch 2001 Nov. 27.0 TT = JDT 2452240.5           Marsden
T 2001 Dec. 2.31127           q  4.7135145           (2000.0)
n  0.01269751           Peri.  19.08531
a  18.1966046           Node   82.20673
e  0.7409674           Incl.  14.24200
P  77.62
```

13.4.3 Kometa P/2000 U6 (Tichý)

Kometa P/2000 U6 (Tichý) byla objevena 23. října 2000 na Observatoři Klet' (objevitel M. Tichý). V první pozorované objevové opozici byla astrometricky sledována v oblouku dráhy 86 dní. Výsledkem výpočtů z naměřených dat byly následující dráhové elementy [11,13]:

```
Epoch 2000 Oct. 23.0 TT = JDT 2451840.5           Marsden
T 2000 Oct. 4.6050           q 2.154900           (2000.0)
n 0.1335947           Peri. 11.8526
a 3.789745           Node 24.4343
e 0.431387           Incl. 19.3694
P 7.38
From 189 observations 2000 Oct. 23 - 2001 Jan. 28, mean residual 0".6.
```

Následující průchod přísluním, čili další možnost pozorování této krátkoperiodické komety Jupiterovy rodiny, byl spočten na únor 2008. Kometa se však nacházela v mnohem horší geometrické poloze, než při svém objevu v říjnu 2000, čili po západu Slunce poměrně nízko nad západním obzorem, což zhoršovalo vyhlídky na její znovunalezení. Naštěstí byl v roce 2002 uveden na Observatoři Klet' do provozu výkonnější teleskop KLENOT, čímž se zvýšila šance na znovunalezení tohoto objektu.



Obr. 28: Dráha komety 196P/Tichý ve sluneční soustavě (Zdroj: Obervatoř Klet')

První pokus o znovunalezení komety v lednu 2008 byl primárně neúspěšný. Kometu, přesněji kandidáta na znovunalezenou kometu, se podařilo objevit až na snímcích z 3. února 2008 (pozorovatelé M. Tichý a J. Tichá, identifikace a astrometrie M. Tichý). Na základě spočtené ΔT byly nalezeny předobjevové polohy komety též na snímcích z teleskopu KLENOT z 11. ledna 2008. Rozdíl mezi předpokládanou a výsledně změřenou polohou byl pouhých -0,16 dne, což svědčí o tom, že astrometrie z let 2000 a 2001 byla velice přesná. Kometární aktivita, čili výtrysky a aktivní místa, nejsou na jádru komety příliš rozšířeny, čili kometa nepatří mezi velmi aktivní komety sluneční soustavy a tudíž negravitační efekty nemají velký vliv na její výslednou dráhu. Výsledky znovunalezení této komety byly publikovány v cirkuláři Mezinárodní astronomické unie IAUC č. 8917, a to včetně nově spočtených dráhových elementů [12].

Epoch 2008 Feb. 24.0 TT Marsden
 T 2008 Feb. 7.1544 TT q 2.137870 (2000.0)
 n 0.1343244 Peri. 11.7159
 a 3.776006 Node 24.3420
 e 0.433828 Incl. 19.3785
 P 7.34

From 211 observations 2000 - 2008, mean residual 0".6.

Circular No. 8917

**Central Bureau for Astronomical Telegrams
 INTERNATIONAL ASTRONOMICAL UNION**

Mailstop 18, Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, MA 02138, U.S.A.
 IAUSUBS@CFA.HARVARD.EDU or FAX 617-495-7231 (subscriptions)
 CBAT@CFA.HARVARD.EDU (science)
 URL <http://www.cfa.harvard.edu/iau/cbat.html> ISSN 0081-0304
 Phone 617-495-7440/7244/7444 (for emergency use only)

COMET P/2008 C2 (TICHÝ)

M. Tichý and J. Tichá, Kleť Observatory, report their recovery of comet P/2000 U6 (cf. *IAUC* 7515) on CCD images obtained on Feb. 3 with the 1.06-m KLENOT Telescope, with Tichý's astrometric measures given below. They subsequently identified earlier images from Jan. 11.

2008	UT	α_{2000}	δ_{2000}	Mag.
Jan.	11.71410	0 ^h 01 ^m 07 ^s .90	+0 ^o 43' 19".0	
	11.71757	0 01 08.19	+0 43 23.9	
	11.71850	0 01 08.28	+0 43 24.4	19.4
Feb.	3.72580	0 37 04.11	+7 11 10.3	
	3.72688	0 37 04.24	+7 11 11.7	18.8
	3.72888	0 37 04.42	+7 11 13.3	
	3.73073	0 37 04.68	+7 11 14.7	
	3.73153	0 37 04.79	+7 11 15.4	
	3.73352	0 37 04.87	+7 11 17.2	
	3.73463	0 37 05.06	+7 11 19.3	18.6
	3.73748	0 37 05.30	+7 11 21.6	
	3.73848	0 37 05.48	+7 11 23.8	
	3.73950	0 37 05.58	+7 11 23.7	
	3.74552	0 37 06.07	+7 11 29.3	

The indicated correction to the prediction on *MPC* 54167 is $\Delta T = -0.16$ day. The following orbital elements by B. G. Marsden are from 211 observations, 2000-2008 (mean residual 0".6).

Epoch = 2000 Oct. 23.0 TT
 $T = 2000$ Oct. 4.6044 TT $\omega = 11^{\circ}8524$
 $e = 0.431372$ $\Omega = 24.4340$ } 2000.0
 $q = 2.154867$ AU $i = 19.3690$
 $a = 3.789587$ AU $n^{\circ} = 0.1336030$ $P = 7.38$ years

Epoch = 2008 Feb. 24.0 TT
 $T = 2008$ Feb. 7.1544 TT $\omega = 11^{\circ}7159$
 $e = 0.433828$ $\Omega = 24.3420$ } 2000.0
 $q = 2.137870$ AU $i = 19.3785$
 $a = 3.776006$ AU $n^{\circ} = 0.1343244$ $P = 7.34$ years

2008 February 5 © Copyright 2008 CBAT Daniel W. E. Green

Obr. 29: Cirkulář oznamující znovunalezení komety P/2000 U6 (Tichý)

13.5 Identifikace těles z The NEO Confirmation Page

Rychlá identifikace nově nalezených kandidátů na blízkozemní tělesa umožňuje jednak rychlejší výpočet jak dráhových elementů, tak případných přiblížení tělesa k naší planetě. Zároveň zamezí plýtvání drahocenným pozorovacím časem observatoří zaměřených na následnou astrometrii a umožní ve svém důsledku sledování více objektů z The NEO Confirmation Page (NEOCP).

Praktická zkušenost posledních let je taková, že ačkoliv systém práce Minor Planet Center je velice sofistikovaný a kvalitní, občas se stane, obzvláště u nedávno objevených těles s krátkým obloukem dráhy, že nedojde okamžitě k identifikaci při dalších pozorováních tohoto tělesa hledacími programy, a tak se dostane tento objekt opět na stránky NEOCP. Málokterá observatoř následné astrometrie má tak sofistikovaný systém identifikace objektů, jako Projekt KLENOT Observatoře Klet'. Proto se v rámci následné astrometrie snažíme i ověřovat, zda nově objevené těleso je opravdu nové, či zda jde o pozorování již známého, ale málo pozorovaného, nedávno objeveného objektu. Při této identifikaci se v prvním kroku pro zrychlení celého procesu používá porovnání pohybu objektu, protože ten bývá atypický – porovnání směru pohybu a rychlost pohybu objektu po nebeské sféře. V případě podobnosti následuje identifikace „klasickou“ cestou s užitím existujících dráhových elementů a metody *line of variation*.

Tabulka *Tab. 6* ukazuje příklady identifikací objektů z NEOCP s již dříve objevenými objekty. První sloupec představuje označení na NEOCP. Toto označení odpovídá značení, které objektu dají přímo pozorovatelské týmy pro jednoznačnou identifikaci jednotlivých pozorování, kdy každému tělesu přiřadí jednoznačné označení. Druhý sloupec představuje „mezinárodní“ označení tělesa, které mu bylo přiděleno prostřednictvím Minor Planet Center. I toto je jednoznačné určení, o jaké těleso jde, a jsou k němu přiřazena veškerá pozorování daného objektu. Poslední sloupec udává dráhový typ tělesa.

NEOCP označení	MPC označení	Dráhový typ
UU116DA	2013 UE1	Apollo
UU11AEE	2005 VR	Apollo
VF33B4C	2009 HQ82	Hungaria (není NEO)
P10c5oc	2007 PP6	Apollo
VL0F85E	377732	Apollo
VW193CE	2013 GP3	Hungaria (není NEO)
WD00EF6	2013 PQ2	Hungaria (není NEO)
P10jPMq	2015 EZ	Apollo
P10k5XJ	2015 DN180	Phocaea (není NEO)
WV80D4A	2012 SG6	Phocaea (není NEO)
WV291FE	20015 TP143	Planetka hlavního pásu
LM2lu2	2001 TR103	Planetka hlavního pásu
LM02kqh	2011 QD23	Planetka hlavního pásu
P10p7775	2010 MT90	Planetka hlavního pásu
P10pR4i	2015 VK66	Hungaria (není NEO)
Nf1133	2010 XA68	Apollo
I070154	2013 GR68	Planetka hlavního pásu
P10uv3a	2016 EZ85	Planetka hlavního pásu
A100UeF	2016 NA1	Amor
P10Wk9K	2016 PZ37	Planetka hlavního pásu
A100wv4	2009 QC7	Planetka hlavního pásu
P10x9e2	2016 RZ40	Amor
XUBC359	20016 TO56	Planetka hlavního pásu
XUBC2FC	2008 SF298	Hungaria
LM06ujQ	1042	Planetka hlavního pásu
LM06nem	70008	Planetka hlavního pásu
YBD5CA4	2017 BX91	Planetka hlavního pásu
A104vfz	496005	Amor
A104vfq	2014 YC15	Amor
I132168	347759	Planetka hlavního pásu

Tab. 6: Identifikace těles z NEOCP

Jak je vidět v tabulce *Tab. 6*, včasnou identifikací lze zamezit nadbytečnému sledování těles, která výsledně nepatří do kategorie blízkozemních planetek. Je to dáno tím, že velice krátké oblouky drah s rozdílnými chybami jednotlivých pozorování mohou vésti k výpočtu méně přesných primárních dráhových elementů. Bezprostředně po zaslání identifikace do Minor Planet Center byla tato tělesa vyřazena z NEOCP.

14 Shrnutí

Do 90. let 20. století se identifikace objektů sluneční soustavy prováděla pomocí výpočtů dráhových elementů v jednotlivých obloucích dráhy [30]. Poté byly spočteny dráhové elementy z pozorování v obou obloucích dráhy a výsledné elementy následně porovnány. Tyto výpočty byly poměrně náročné a zdlouhavé, ale s ohledem na malé množství pozorovaných objektů, řádově několik tisíc, šlo o použitelnou metodu. V devadesátých letech 20. století došlo, následkem začátku používání CCD kamer, k mohutnému rozmachu pozorování, a tím i k razantnímu zvětšení množství napozorovaných dat a následně potřeby rychlé a kvalitní identifikace objektů. Vzniklo několik teorií na identifikace – všechny byly zaměřeny na skutečnost, že dráhové elementy jsou spočteny, vlivem náhodných chyb jednotlivých měření, s určitou přesností, a tak výsledná dráha tělesa není ve skutečnosti jen obyčejná elipsa, ale při započtení veškerých chyb jde o prostorový útvar. Tento prostorový útvar měl převahu nepřesností v jedné ose, v ose pohybu tělesa. Nepřesnost v kolmém směru na směr hlavní představovala méně než 5-10% hodnoty základní osy, neboli chybová elipsa má poměr os 1:10 až 1:20 [31]. Výpočet prostorového chybového regionu pro výskyt a identifikaci planety je náročnější, než původně používaná metoda porovnání dráhových elementů, a tudíž též není vhodná pro značné množství pozorování. S ohledem na disproportionnost chybového regionu v obou osách byla diskutována a následně navržena matematicky jednodušší a tudíž výpočetně rychlejší metoda lineární aproximace, kdy se zanedbá chybový region druhé osy a předpokládá se jen chybná poloha tělesa na správně spočtené dráze [32].

15 Přínos autora

V roce 1994 byla nainstalovaná CCD kamera na 0,57-m zrcadlovém dalekohledu Observatoře Klet'. Zvětšilo se tak množství pozorování a vyvstal problém, zda a jak kvalitně identifikovat napozorovaná tělesa. Autor této práce postupně zanalyzoval veškeré tehdy dostupné a používané metody ve světě, včetně řady diskuzí o dané problematice s předními světovými odborníky [32][33]. Provedl analýzu dostupných výpočetních kapacit Observatoře Klet' a navrhl schůdné řešení pro výpočetní a zpracovávací systém Observatoře Klet'. Tento systém byl zapracován do programového balíčku, který se na Observatoři Klet' používá. Software prošel poté řadou vylepšení, které vyplynuly z praktických poznatků autora, a dospěl do stavu pohodlné použitelnosti. Taktéž byl navržen program pro výpočet kontroly pozorování na Observatoři Klet' a metoda následně aplikována v rámci výpočtu $O-C$ (rozdíl efemeridy a pozorování na daný čas) pro identifikaci objektů, kde kromě vlastního $O-C$ se počítá i rozdíl ΔT spočtený touto metodou *line of variation* [5]. Následná autorova pozorování a provedené identifikace prokázaly, že tato matematicky zjednodušená metoda je velice účinná, a koeficient správných identifikací je větší než 99%, čili že ve více než 99 procentech případů vede tato metoda ke správným výsledkům čili identifikacím, což bylo v prvních letech používání proveřeno na základě porovnání s identifikacemi původně používanou metodou [33]. Toto bylo následně potvrzeno na několika stovkách správně zidentifikovaných těles. Metoda je použitelná obecně, a to jak pro tělesa hlavního pásu planetek mezi Marsem a Jupiterem [16], tak na tělesa blízkozemní [21, 22] i na tělesa typu Kentaur či transneptunická [14,15]. S přihlédnutím k negravitačním jevům se jeví i použitelná pro identifikace komet [12].

16 Závěr

Práce představuje problematiku identifikací malých těles sluneční soustavy, a to od metod astrometrie, přes výpočty dráhových elementů, referenční astrometrické katalogy až po vlastní metody identifikace objektů. S ohledem na množství nově objevovaných těles právě identifikace hraje klíčovou roli v inventarizaci a poznání přesných počtů populací jednotlivých typů objektů našeho planetárního systému. Bez kvalitních identifikačních metod se momentálně astrometrie planetek a komet neobejde.

Zde presentovaná modifikovaná metoda identifikací *line of variation* je matematicky poměrně jednoduchou, výpočetně málo náročnou, rychlou a tudíž příjemnou metodou. Oproti původně používané robustní metodě nevyžaduje extrémně přesné dráhové elementy v obou pozorovaných obloucích dráhy daného tělesa. Z tohoto důvodu je metodou velice vhodnou pro identifikaci velkého množství napozorovaných objektů, protože je schopna přinést v poměrně krátké době řádově několika minut relevantní výsledky, a nadto není náročná na výpočetní čas.

Jak ukazují v práci uvedené příklady, lze touto metodou docílit kvalitních výsledků, a to jak při identifikaci těles hlavního pásu planetek mezi Marsem a Jupiterem, tak při identifikaci těles blízkozemních, identifikaci komet, i těles ve vzdálených oblastech sluneční soustavy, jako jsou Kentauři a transneptunická tělesa.

Jako nejdůležitější výsledek použití dané metody jsou identifikace těles z The NEO Confirmation Page, kde dochází k přímé úspoře pozorovacího času astrometrických observatoří, protože po identifikaci nemusí již dané těleso dále sledovat a mohou se tak věnovat jiným, důležitějším objektům, a podílet se na zpřesnění jejich drah.

Seznam vybraných publikací

- [1] Tichy, M., Ticha, J., Kocer, M.: KLENOT PROJECT – NEAR EARTH OBJECT FOLLOW-UP PROGRAM, in Asteroids: New Observations, New Models, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Vol. 318, pp. 319-320, 2016 (podíl 60%)
- [2] Tichy, M., Ticha, J., Honkova, M., Kocer, M.: Strategy for NEO follow-up observations, Highlights of Astronomy, Vol. 16, pp. 185, 2015 (podíl 60%)
- [3] Tichy, M., Honkova, Ticha, J., M., Kocer, M.: From Discovery to Impact, Geoinformatics, Vol. 8, pp. 73-78, 2012 (podíl 35%)
- [4] Tichy, M.: Klet Observatory – European Contribution to Detecting and Tracking of Near Earth Objects, Geoinformatics, Vol. 7, pp 107-115, 2011 (podíl 100%)
- [5] Ticha, J., Tichy, M., Kocer, M., Honkova, M.: KLENOT PROJECT 2002-2008, Meteoritics & Planetary Science, Vol. 44, Issue 12, pp. 1889-1895, 2009 (podíl 35%)
- [6] Sekanina, Z., Chodas, P. W., Tichy, M., Ticha, J., Kocer, M.: Peculiar Pair of Distant Periodic Comets C/2002 A1 and C/2002 A2 (LINEAR), The Astrophysical Journal (Letters), Vol. 591, L67-70, 2003 (podíl 25%)
- [7] Ticha, J., Tichy, M., Kocer, M.: The recovery as an important part of NEO astrometric follow-up, Icarus, Vol. 159, No. 2, pp. 351-357, 2002 (podíl 60%)

Seznam dalších cca 2000 astrometrických publikací je dostupných on-line na webu The SAO/NASA Astrophysics Data System na adrese <http://adswww.harvard.edu>.

Literatura

- [1] Andrlé, P.: Základy nebeské mechaniky, Academia, 1971
- [2] Kostelecký, Jan, Klokočník, J., Kostelecký, Jakub: Kosmická geodézie, ČVUT Praha, 2008, ISBN 80-010405-93
- [3] Mc Alister, H. A.: Astrometry: Revealing the Other Two Dimensions of Velocity Space, Center for High Angular Resolution Astronomy Georgia State University
- [4] Milani, A., Gronchi, G. F.: Theory of Orbit determination, Cambridge University Press, 2010, ISBN-10: 0521873894
- [5] Tichá, J., Tichý, M., Kočer, M.: The recovery as an important part of NEO astrometric follow-up, *Icarus*, Vol. 159, No. 2, October 2002, pp. 351-357.
- [6] Tichá, J., Tichý, M., Kočer, M.: KLENOT - KLET OBSERVATORY NEAR EARTH AND OTHER UNUSUAL OBJECTS OBSERVATIONS TEAM AND TELESCOPE, Proceedings of ACM 2002, Berlin,(ESA-SP-500), November 2002, pp. 793-796
- [7] Tichá, J., Tichý, M., Kočer, M., Honková, M.: KLENOT PROJECT 2002-2008, *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 44 (2009), Issue 12, p. 1889-1895
- [8] Sekanina, Z., Chodas, P., Tichý, M., Tichá, J., Kočer, M.: PECULIAR PAIR OF DISTANT PERIODIC COMETS C/2002 A1 AND C/2002 A2 (LINEAR), *The Astrophysical Journal (Letters)*, 591:L67-L70, 2003 July 1
- [9] Vanýsek, V.: Základy astronomie a astrofyziky, Academia, 1980
- [10] Zacharias, N., Gaume, R., Dorland, B., and Urban, S. E.: CATALOG INFORMATION AND RECOMMENDATIONS, N. Zacharias, R. Gaume, B. Dorland, and S. E. Urban, U. S. Naval Observatory, 2011
- [11] I.A.U.C. 7515 - INTERNATIONAL ASTRONOMICAL UNION Circular, 2000, ISSN 0081-0304
- [12] I.A.U.C. 8917 - INTERNATIONAL ASTRONOMICAL UNION Circular, 2008, ISSN 0081-0304
- [13] M.P.C. 42106, 2001 Feb. 8 - Minor Planet Circulars, International Astronomical Union/Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, USA, 2001, ISSN 0736-6884
- [14] M.P.E.C. 1997-D11 - Minor Planet Electronic Circulars, International Astronomical Union/Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, USA,1997, ISSN 1523-6714
- [15] M.P.E.C. 1997-S14 - Minor Planet Electronic Circulars, International Astronomical Union/Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, U.S.A., 1997, ISSN 1523-6714
- [16] M.P.E.C. 2002-R41 - Minor Planet Electronic Circulars, International Astronomical Union/Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, U.S.A., 2002, ISSN 1523-6714
- [17] M.P.E.C. 2003-D23 - Minor Planet Electronic Circulars, International Astronomical Union/Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, U.S.A., 2003, ISSN 1523-6714

- [18] M.P.E.C. 2003-D29 - Minor Planet Electronic Circulars, International Astronomical Union/Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, U.S.A., 2003, ISSN 1523-6714
- [19] M.P.E.C. 2003-J43 - Minor Planet Electronic Circulars, International Astronomical Union/Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, U.S.A., 2003, ISSN 1523-6714
- [20] M.P.E.C. 2003-P10 - Minor Planet Electronic Circulars, International Astronomical Union/Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, U.S.A., 2003, ISSN 1523-6714
- [21] M.P.E.C. 2003-Q31 - Minor Planet Electronic Circulars, International Astronomical Union/Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, U.S.A., 2003, ISSN 1523-6714
- [22] M.P.E.C. 2004-O20 - Minor Planet Electronic Circulars, International Astronomical Union/Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, U.S.A., 2004, ISSN 1523-6714
- [23] M.P.E.C. 2005-E27 - Minor Planet Electronic Circulars, International Astronomical Union/Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, U.S.A., 2005, ISSN 1523-6714
- [24] M.P.O. 2669, 2000 July 26 - Minor Planet Circulars/MINOR PLANETS AND COMETS ORBIT SUPPLEMENT, International Astronomical Union/Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, USA, 2000, ISSN 2153-8330
- [25] M.P.E.C. 2000-S71 - Minor Planet Electronic Circulars, International Astronomical Union/Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, U.S.A., 2000, ISSN 1523-6714
- [26] M.P.C. - Minor Planet Circulars, International Astronomical Union/Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, USA, 1997-2016, ISSN 0736-6884
- [27] <http://www.minorplanetcenter.org/iau/mpc.html>
- [28] <ftp://ftp.lowell.edu/pub/elgb/astorb.html>
- [29] <http://www.minorplanetcenter.net/iau/NEO/ToConfirm.html>
- [30] Dubiago, A. D. (1949). *Opredelenie orbit*. Gostekhizdat, Moskva--Leningrad.
- [31] Honková, M.: *Výpočet dráhových elementů planetek a výpočet efemerid*, Diploma Thesis, Masarykova Universita, ÚTFA, Brno, 2008
- [32] Milani, A., 1999-2001, Personal communication
- [33] Marsden, B.G., 1999-2005, Personal communication
- [34] Sansaturio, M. E., Milani, A., and Cattaneo, L., 1996. Nonlinear optimisation and the asteroid identification problem. In *Dynamics, Ephemerides and Astrometry of the Solar System*, (S. Ferraz Mello et al., Eds.), Kluwer, pp. 193-198.

Seznam obrázků

Obr. 1: Fotografická deska (Zdroj: Observatoř Klet')	9
Obr. 2: Moderní CCD kamera (Zdroj:Finger Lake Instruments).....	10
Obr. 3: CCD snímek (s označeným rychle se pohybujícím objektem)(Zdroj:Observatoř Klet')	10
Obr. 4: Pravoúhlý souřadnicový systém	13
Obr. 5: Sférická souřadnicová soustava	14
Obr. 6: Rovníkové souřadnice II. druhu.....	17
Obr. 7: Gnómonická projekce	19
Obr. 8: Porovnání hustoty hvězd astrometrických katalogů	28
s ohledem na zorné pole teleskopu KLENOT (Zdroj: Observatoř Klet').....	28
Obr. 9: Porovnání středních chyb astrometrických katalogů	29
Obr. 10: Příklad astrometrického výpočtu Projektu KLENOT (Zdroj: Observatoře Klet')[6]	30
Obr. 11: Dráhy blízkozemních planetek ve sluneční soustavě.....	33
Obr. 12: Velká poloosa dráhy a excentricita	36
Obr. 13: Pravá, střední a excentrická anomálie.....	37
Obr. 14: Dráhové elementy	39
Obr. 15: Dráha planetky hlavního pásu (42377) KLENOT ve sluneční soustavě	41
Obr. 16: Dráha blízkozemní planetky 2003 UT ₅₅ typu Aten ve sluneční soustavě.....	42
Obr. 17: Geometrické provedení problému výpočtu dráhových elementů	43
Obr. 18: Geometrické upořádání	44
Obr. 19: Dráhové elementy planetky 2007 OV po 2 a 10 dnech	55
Obr. 20: Dráhové elementy planetky 2007 OV po 114 dnech	55
Obr. 21: Zorné pole teleskopu KLENOT s známými planetkami a jejich nominální pohyby (Zdroj: Observatoř Klet')[6]	57
Obr. 22: Pozorování v prvním pozorovacím okně	58
Obr. 23: Pozorování v druhém pozorovacím okně	59
Obr. 24: Výsledná dráha při správné identifikaci obou pozorovacích oken	59
Obr. 25: Pohyb tělesa na nebeské sféře společně se zobrazenou line of variation (pohyb oranžový či fialový, line of variation šedivá) (Zdroj: Observatoř Klet').....	64
Obr. 26: Lineární regrese z pozorování dle Tab. 3.....	67
Obr. 27: Lineární regrese z pozorování dle Tab. 4.....	68
Obr. 28: Dráha komety 196P/Tichý ve sluneční soustavě (Zdroj: Obervatoř Klet').....	82
Obr. 29: Cirkulář oznamující znovunalezení komety P/2000 U6 (Tichý)	83

Seznam tabulek

Tab. 1: Astrometrická přesnost (Zdroj: Minor Planet Center, IAU).....	11
Tab. 2: Nepřesnost určení polohy v závislosti na vypočteném parametru U (Zdroj: Minor Planet Center).....	40
Tab. 3: O-C u chybné identifikace	66
Tab. 4: O-C u pravděpodobně správné identifikace.....	68
Tab. 5: Ukázka identifikace s hodnotami O-C a variace.....	69
Tab. 6: Identifikace těles z NEOCP	85