

MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
CCD ASTROMETRIE PLANETEK

JINDŘICH ŽIŽKA



BRNO, KVĚTEN 2007

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Brně dne.....

Podpis:.....

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce Mgr. Janu Janíkovi, Ph.D., který mi pomohl s řadou problémů, jak odborných, tak i typografických, jež byly s bakalářskou prací spojeny. Dále bych rád poděkoval konzultantovi bakalářské práce Bc. Miloši Tichému za odbornou pomoc a cenné rady, které přispěly ke zkvalitnění textu. V neposlední řadě velmi děkuji Mgr. Filipu Hrochovi, Ph.D., za plodné debaty o astrometrii a zapůjčení potřebné literatury a Mgr. Josefu Hufovi, působícím na Gymnáziu v Jevíčku, za pomoc s překladem některých svízelných pasáží ve studované literatuře.

Jindřich Žižka

Abstrakt

Tato práce se zabývá CCD astrometrií planetek. Určení přesné polohy nebeských objektů patří k základním úlohám astronomie. Astrometrie vychází z projekce nebeské sféry do tečné roviny vedené k této sféře a projekce do roviny snímku. Ze známých rovníkových souřadnic (II. druhu) referenčních hvězd a polohy planetky na CCD snímku můžeme poté určit rovníkové souřadnice planetky. Polohy hvězd byly postupně brány z katalogů USNO-A2.0, USNO-B1.0 a GSC 2.3 a výsledky astrometrických měření byly potom srovnány s teoretickou hodnotou, kterou udává NeoDys [15]. Z odchylek od této teoretické hodnoty byly katalogy vzájemně srovnány.

Abstract

This paper is devoted to the CCD astrometry of asteroids. The determination of the accurate position of space objects belongs to fundamental assignments of astronomy. Astrometry is based on the projection of the celestial sphere into the tangent plane led to this sphere and the projection into the CCD image plate. We can determine equatorial coordinates of asteroids from known equatorial co-ordinates (II. type) of reference stars and the position of the asteroid on the CCD image. The stars positions were taken gradually from three catalogues USNO-A2.0, USNO-B1.0 and GSC 2.3 and the results of astronomical measurements were then compared with theoretical value which is provided by NeoDys. The catalogues were compared according to the deviations from these theoretical values.

Obsah

Úvod	6
1 Historie astrometrie	7
1.1 Počátky měření poloh objektů na nebeské sféře	7
1.2 Fotografická astrometrie	10
1.3 CCD astrometrie	12
1.4 Moderní astrometrické projekty	14
2 Historie a rozvoj astronomických katalogů	15
2.1 Období tvorby katalogů před vynálezem dalekohledu	15
2.2 Období tvorby katalogů po vynálezu dalekohledu	16
3 Astrometrie CCD snímku	20
3.1 Projekce sféry na rovinu	20
3.1.1 Standardní (ideální) souřadnice	21
3.2 Transformace mezi rovníkovými (II. druhu) a ideálními souřadnicemi	23
3.2.1 Aproximace pro malé zorné pole	24
3.3 Vztah mezi astrografickými a standardními souřadnicemi	25
3.3.1 Posunutí a vzájemné otočení mezi astrografickými a ideálními souřadnicemi	26
3.3.2 Vliv diferenciální refrakce a aberace	26
3.4 Metoda nejmenších čtverců	29
3.4.1 Lineární model pro šest deskových konstant	29
3.4.2 Lineární model pro čtyři deskové konstanty	30
3.4.3 Výpočetní skript pro astrometrii CCD snímku	32

4	Zpracování měření	36
4.1	Pozorovací technika	36
4.2	Ošetření snímků	36
4.3	Planetka E5656	37
4.4	Planetka F2895	38
4.5	O-C Analýza	39
	Závěr	43
	Literatura	45

Úvod

Určování poloh objektů na nebeské sféře je jednou ze základních úloh astronomie vůbec. Astrometrie, neboli poziční astronomie je tedy odvětví astronomie, které se zabývá přesným určováním poloh nebeských těles na nebeské sféře. Světelný paprsek přicházející z nebeského tělesa je charakterizován třemi základními vlastnostmi: směrem, intenzitou a spektrálním složením. Přesné určení směru z něhož paprsek přichází, je předmětem astrometrie, intenzitou se zabývá fotometrie a složením paprsku spektroskopie. Do astrometrie náleží také studium změn poloh způsobených pohybem zemské osy. Těmi jsou přirozeně precese a nutace. Astrometrie se dále dělí na jednotlivé části. Těmi jsou fotografická astrometrie, meridiánová astrometrie, fundamentální astrometrie a CCD astrometrie. Fotografická astrometrie určuje polohy hvězd, planet, planetek a komet vzhledem k referenčním hvězdám na fotografické desce.

Meridiánová astrometrie určuje polohy vzhledem k pohybu Země.

Fundamentální astrometrie určuje absolutní hodnoty poloh hvězd. CCD astrometrie je v principu velmi podobná fotografické astrometrii, rozdíl je pouze v tom, že obraz není promítán na fotografickou desku, ale je detekován CCD čipem. V posledních letech dochází k velkému pokroku díky velmi přesným astrometrickým a fotometrickým datům získaných převážně z družicových pozorování.

Kapitola 1

Historie astrometrie

1.1 Počátky měření poloh objektů na nebeské sféře

Astrometrie jako historicky vůbec první odvětví astronomie, je jednou z nejstarších vědních disciplín. Měření poloh hvězd na nebeské sféře nacházelo praktické využití již v dávné minulosti, kdy se z jejich pozic předpovídaly záplavy, plánovala se setba obilí, předpovídaly se monzunové deště, apod. Později, v případě zaoceánských plaveb se hrála nezastupitelnou roli při navigaci, neboť z postavení hvězd mohli mořeplavci vcelku přesně určit svoji polohu na Zemi. Kvantitativní přístup k astrometrii pochází již od řeckého astronoma Hipparcha, který ve 2. stol. př. n. l. sestavil první hvězdný katalog. Přitom také vymyslel stupnici jasností hvězd, kterou jen mírně pozměněnou užíváme dodnes.

Níže je uveden stručný přehled historicky významných osobností, které se podílely na vývoji astrometrie od konce středověku do konce 18. století.

- **Ulugh Beg (1393 - 1449)**

- uzbecký astronom
- zakladatel samarkandské observatoře v uzbeckém městě Buchara
- velice přesně spočítal délku roku, která se jen málo lišila od hodnoty známé dnes (pouze o 51 sekund)
- základním a hlavním výsledkem samarkandské observatoře se stalo dílo Zij-I Sultani.
- Zij-I Sultani obsahoval informace o měření času, kalendáři, praktické astronomii (včetně trigonometrie), pohybech Slunce, Měsíce a planet, polohách hvězd.

Polohy planet zde byly udány s přesností až 5 úhlových vteřin.

– jeho smrtí symbolicky na čas končí rozvoj arabské vědy

- **Tycho Brahe (1546 - 1601)**

- dánský astronom

- na svoji dobu měl vynikající výsledky měření poloh hvězd s chybou přibližně jedné úhlové minuty

- usuzoval, že oběhem Země kolem Slunce by se hvězdy na obloze musely posunovat (v důsledku paralaxy)

- pozorování supernovy v souhvězdí Kasiopeja roku 1572, tehdy považována za novou hvězdu

- zakladatel observatoře Uraniborg na ostrově Hven

- vynálezce mnoha astronomických přístrojů (sextant)

- naprosto změnil pozorovací techniky své doby

Důležitým mezníkem v historii astronomie je jistě vynález dalekohledu. S tím tedy opět úzce souvisí zvýšená přesnost měření objektů na nebeské sféře. Tvorba katalogů a astrometrická měření jsou v dalším již úzce spjata s jeho použitím.

- **Johannes Kepler (1571 - 1630)**

- německý matematik a astronom

- po příchodu do Prahy jmenován Rudolfem II. císařským matematikem

- pomocník Tycho Brahe

- ze studia prací Tycho Brahe a drah Marsu odvozuje Keplerovy zákony

- Keplerovými zákony je potvrzena Koperníkova heliocentrická soustava

- přestože Kepler poznává jejich platnost, nedokáže vysvětlit příčinu fungování

- **John Flamsteed (1646 - 1719)**

- zakladatel greenwickské observatoře

- královský astronom

- tvůrce katalogu Historia Coelestis Britannica obsahujícího 3000 hvězd

- **Edmond Halley (1656 - 1742)**

- anglický astronom
- studoval ve Velké Británii na fakultě sv. Pavla
- po absolvování této školy pokračoval studiem na královské univerzitě v Oxfordu, později zde působil jako profesor geometrie
- 1677 - pozorování přechodu Merkuru přes sluneční disk (výsledky mu velmi pomohly při stanovení astronomické jednotky)
- roku 1678 sestavil první mapu jižní oblohy čítající 341 hvězd
- spočtení dráhy dlouhoperiodické komety dnes nesoucí jeho jméno

- **Jean-Dominique Cassini (1656 - 1742)**

- vědeckou kariéru nastartoval v Itálii
- měřil rotační periody Jupiteru a Marsu, poprvé vyslovil myšlenku konečné rychlosti světla
- objevil čtyři nové Saturnovy měsíce, odhalil diskrétní rozložení Saturnových prstenců
- zpřesňoval hodnotu sluneční paralaxy

Roku 1725 mohla být díky změření aberace světla hvězd konečně přímo potvrzena hypotéza, že se Země pohybuje prostorem okolo Slunce.

Za zakladatele moderní astrometrie je považován Friedrich Bessel (1784-1846) a to zásluhou jeho díla *Fundamenta astronomiae* obsahujícího polohy 3222 hvězd pozorovaných v období mezi lety 1750 až 1762 Jamesem Bradleyem. Dále mimo jiné stanovil roku 1838 paralaxu objektu 61 Cygni a objevil vlastní pohyb Síría. Dobovými souputníky Bessela, kteří se neméně významným způsobem podíleli na měření paralax hvězd, byl kupříkladu Friedrich Georg Wilhelm von Struve (1793-1864) či Thomas Henderson (1798-1844).

Počátkem 19. století, ještě před vznikem fotografické astrometrie, startuje zásluhou Giuseppe Piazzihovo výzkum v proměřování planetek, doposud neznámých objektů. V té době byl Piazzii v Palermu profesorem astronomie a matematiky. Za poměrně krátkou dobu se stal jedním z nejrenomovanějších astronomů. Po dobu jeho tříleté studijní cesty do Paříže a Londýna, kde se setkal s osobnostmi jako Cassini či Messier, stihl navázat řadu kontaktů s kvalitními odborníky, mezi kterými byl i Jesse Ramsden, proslulý

výrobce precizních přesných astronomických přístrojů. Ten mu poskytl potřebné vybavení pro budoucí palermskou observatoř. Observatoř byla dokončena roku 1791 a Piazzini má hned tři výhody - nejnižněji položenou observatoř, vynikající atmosférické podmínky a nejlepší astronomické vybavení té doby. Piazziniho program spočíval v měření přesných poloh hvězd a následném sestavení katalogu hvězd. Jeho nejrozsáhlejší katalog obsahuje 7646 hvězd s přesností v určení poloh několik úhlových vteřin. Pro přesné výsledky pozoroval každou hvězdu minimálně čtyři noci. Účastnil se také astronomické kampaně v hledání fiktivní chybějící planety mezi Marsem a Jupiterem. Její existenci předpokládalo tzv. Titius-Bodeovo pravidlo, které vychází z posloupnosti čísel udávajících vzdálenosti jednotlivých planet od Slunce v astronomických jednotkách. Posloupnost $(0+4)/10$, $(3+4)/10$, $(6+4)/10$, $(12+4)/10$, $(24+4)/10$, ... odpovídá vzdálenostem planet od Slunce, pokud vzdálenost Země - Slunce považujeme za 1. Astronomové se soustředili na hledání planety ve vzdálenosti 2,8 AU. Piazzini na Nový rok 1801 naráží na údajnou novou hvězdu, jasností srovnatelnou s hvězdami osmé velikosti, stejné barvy jako Jupiter. Další den si všiml jejího pohybu mezi hvězdami, což ho vedlo k dalšímu preciznímu sledování objektu až do 11. února. Piazzini tělesu přisuzuje kometární charakter. Zpráva o existenci objektu však dorazila k astronomické komunitě pozdě, kdy již nebylo možno planetku pozorovat. Znovu ji našel F. X. von Zach o rok později s použitím nové Gaussovy výpočetní metody. Nová hvězda, za kterou ji Piazzini považoval, dostala jméno Ceres Ferdinandea. Dochovalo se pro ni ale pouze jméno Ceres.

1.2 Fotografická astrometrie

Za zrod fotografické astrometrie považujeme rok 1850, kdy W. C. Bond na harvardské hvězdárně pořídil první fotografie Vegy a Měsíce. Tyto fotografie však ještě nebyly určeny k proměřování. Ty byly pořízeny opět Bondem o sedm let později, roku 1857, a jednalo se o fotografie Slunce a Mizaru. Pro potřeby odvození heliografických souřadnic slunečních skvrn a prvků rotace se od roku 1873 soustavně fotografuje v Greenwichi Slunce. S rostoucí citlivostí fotografických desek dochází ke stále masivnějšímu fotografování oblohy. První etapa moderní éry fotografické astrometrie je úzce spjata s Frankem Schlesingerem (1871 – 1943). Kariéru nastartoval jako zeměměřič, následně studuje astronomii na Columbia University v New Yorku, kde roku 1889 obhájí doktorský titul na základě experimentů a měření hvězdných pozic na fotografické desce.

Posléze pracuje na Yerkes Observatory při University of Chicago, kde razí cestu v použití fotografických metod k určení hvězdné paralaxy, které okamžitě použil k tvorbě dvou poměrně rozsáhlých katalogů paralax známých pod jménem General Catalogue of Trigonometric Parallaxes, čítajících v konečné fázi data pro 4260 hvězd. Je považován za zakladatele metody dependencí. Symbolem druhé moderní ery (stále ještě však fotografické astrometrie) je jistě Peter van de Kamp (1901-1995). Proměřením 2316 fotografických desek van de Kamp roku 1963 přichází s výsledkem, že sledovaná Barnardova hvězda, která byla součástí projektu sledování na Sproulské observatoři v Pensylvánii, vykazuje pohyb na snímku v řádech mikronů způsobený přítomností tělesa o hmotnosti 1,6 Jupiterů s periodou 24 let. Nezávislá pozorovací data o desetiletí později však přítomnost takového tělesa vyloučila.

Astronomové té doby velmi oceňovali schopnost fotografické desky za poměrně krátkou expoziční dobu zaznamenat obrazy hvězd v jejich vzájemné poloze. Fotografie umožňuje přenést veškerá měření vzájemných poloh hvězd a jejich relativních jasností do laboratoře a dále, je-li třeba, veškerá měření později opakovat nebo je doplňovat. Výzkum desek poukazuje také na to, že mohou být archivovány a speciálně uchovávány po desítky let bez znatelných změn.

Kromě standardních katalogů se astronomové také zabývali tvorbou tzv. fotografických přehlídek oblohy. Zde je dobré zmínit Maxe Wolfa (1863-1932). Technika, kterou Wolf používal spočívala v pořízení snímků pole pětipalcovým nebo šestipalcovým dalekohledem. Nejprve byla hodinu exponována deska A, druhou hodinu pak deska B. Pak byla znovu další hodinu exponována deska A. Tyto desky pak byly kombinovány a srovnávány. Při vyhodnocování desek za pomoci lupy mohly být snadno zaznamenány planety až do jasnosti 12,6 mag. Max Wolf objevil za svůj život 228 planetek. Novější fotografickou přehlídkou byla například PLS (Palomar-Leiden Survey).

Po roce 1887 startuje významný projekt „Fotografické mapy hvězdné oblohy“ (Carte du Ciel). V Paříži bylo rozhodnuto ofotografovat celou oblohu, kdy zachycené hvězdy měly být jasnější než 11 mag. Pro každou hvězdu byly samozřejmě spočteny rovníkové souřadnice (II. druhu). Desky se musely vzájemně překrývat tak, aby v rozích každé desky byly středy sousedních desek. Tím bylo možno určit souřadnice každé hvězdy dvakrát. Ke konci osmdesátých let 19. stol. se začíná teoreticky zkoumat zejména to, jakým způsobem lze z měřených pravoúhlých souřadnic obrazů hvězd na fotografické desce určit jejich sférické souřadnice α a δ . Jako nejpraktičtější se ukázala metoda Turnerova a metoda

dependencí. Od počátku devadesátých let 19. stol. se používá ve velké míře k fotografování hvězdného nebe poměrně krátkoohniskových objektivů o ohniskové vzdálenosti od 100 do 10 cm, u nichž plocha zobrazeného nebe na desce je 500 čtverečních stupňů.

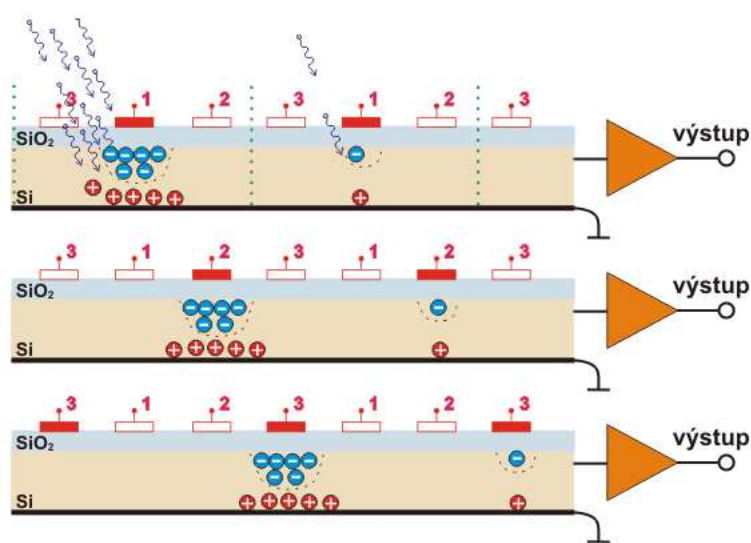
1.3 CCD astrometrie

Ruku v ruce s vývojem a novými poznatky z teorie pevných látek dochází ke vzniku polovodičových součástek. Ty tvoří základ světlocitlivého CCD čipu. Ten byl vynalezen v Bellových laboratořích roku 1969 Williardem Boylem a Georgem Smithem. Není bez zajímavosti Boylevo prohlášení po udělení ocenění Americké národní akademie. Prohlásil tehdy, že jim samotný návrh principu CCD čipu trval snad necelou hodinu.

CCD čip sestává z polovodičových součástek citlivých na světlo. Hlavním principem je využití fotoefektu. Při absorpci fotonu dochází v polovodiči k přechodu elektronu z valenčního do vodivostního pásu (u dotovaného polovodiče je častější přechod elektronu z donorové hladiny do vodivostního pásu), přičemž energie fotonu musí být rovna nebo větší než oblast zakázaných energií v polovodiči (u dotovaných polovodičů je tato energie mnohonásobně menší). Velikostí této energie je určena tedy i citlivost CCD čipu při nějaké pevně dané teplotě. V polovodiči se takto uvolněný elektron může podílet na elektrické vodivosti, respektive, je možné jej z polovodiče odvést pomocí přiložených elektrod, podobně, jako v případě běžné fotodiody. U CCD je však elektroda od polovodiče izolována tenkou vrstvičkou oxidu křemičitého SiO_2 , jež je dokonalým izolantem. Ta brání úniku elektronů z dané oblasti detekce signálu v CCD čipu. Elektrony se nemohou volně pohybovat po čipu, neboť na čipu jsou vytvořeny svislé negativní potenciálové valy. Systém vodorovných elektrod vytváří na čipu mřížku tzv. potenciálových studní, z nichž elektrony nemohou uniknout. Každá potenciálová studna reprezentuje jeden obrazový bod, pixel. CCD čip je tedy pokryt sítí elektrod která udržuje světlem uvolněné elektrony. Balíky elektronů, reprezentující jednotlivé pixely, jsou posouvány do výstupního zesilovače, kde je elektrický náboj převeden na napětí. Elektronika kamery pak musí toto napětí změřit (převod na číslo pomocí AD převodníku) pro každý pixel. Matice, obsahující v každém svém prvku tuto informaci poté reprezentuje snímaný obrázek.

Na elektrody se přivede kladné napětí a na CCD čip se nechá dopadat světlo. Elektrony jsou pak přitahovány ke kladně nabitým elektrodám a vznikají svislé negativní potenciálové valy. Po elektronech zbydou v polovodiči neobsazené stavy, tzv. díry. Ty

jsou přitahovány elektrodou na spodku CCD. Hranice pixelů jsou znázorněny svislými tečkovanými čarami. Z obrázku (1.1) je vidět, že na levý pixel dopadlo více fotonů než na pixel prostřední. Poté, co již přestaneme čip vystavovat elektromagnetickému záření, je třeba z nahromaděných elektronů získat potřebný elektrický signál a z něj zkonstruovat obraz. Na množiny elektrod 1, 2 a 3 pak začneme přivádět tzv. trojfázový hodinový signál. Ten dělá v principu to, že na elektrodách 2 se začne pozvolna zvyšovat napětí, zatímco na elektrodách 1 se souběžně snižuje. Tím je pak balík elektronů přitahován pod elektrodu 2. Děj se poté opakuje mezi elektrodami 2 a 3, potom mezi 3 a 1 atd. Proces osvětluje sekvence na obrázku (1.1).



Obrázek 1.1: Schématický náčrt činnosti CCD, zdroj [14]

Shluky elektronů z jednotlivých pixelů se tak posouvají přes sousední pixely směrem k výstupnímu zesilovači (na obrázku vpravo). Tento zesilovač pak zesílí malý proud odpovídající počtu nacytaných elektronů v jednotlivých pixelech na napětíové úrovni vhodné pro další zpracování obrazu. Takto popsany CCD čip nazýváme lineárním. Ve většině zařízení (kamery, digitální fotoaparáty atd.) je ovšem třeba snímat dvourozměrný obraz najednou. Základní konstrukce dvourozměrného CCD je pouhým spojením mnoha lineárních CCD na jediném čipu.

Je dobré poznamenat, že se fakticky v matematických a dobře fungujících postupech, o které se opírala fotografická astrometrie, opírá se i dnešní CCD astrometrie.

1.4 Moderní astrometrické projekty

V posledních letech rostou tendence techniku pro studium nebeských objektů přesunovat mimo atmosféru, do vesmírného prostoru. Tím se docílí velmi vysokého rozlišení optické soustavy než tomu bylo v případě jejího umístění na Zemi. Družice na oběžné dráze studují vskutku všechno možné, zde se však zmíním pouze o projektech astrometrických. Jistě je třeba zmínit družici Hipparcos. Ta byla vynesena na oběžnou dráhu nosnou raketou Ariane-4 roku 1989 s hlavním cílem přesného proměřování hvězdných pozic. Samozřejmě úkolem nebyla jen přesná astrometrie. Velmi přesná data pomohla při výpočtech předpovědi srážky komety Shoemaker-Levy 9 s Jupiterem, ve výzkumu změn tvaru Mléčné dráhy, či v potvrzení výsledků Einsteinovy obecné relativity. Družice určila s velkou přesností polohy, vzdálenosti, vlastní pohyby a jasnosti více jak 100 000 hvězd, tedy, přibližně 200 krát více, než kdy v minulosti bylo změřeno. Výsledkem celé mise jsou dva katalogy, Hipparcos a Tycho, které publikovala ESA roku 1997.

Dalším astrometrickým projektem je převážně ruský projekt Osiris, od něhož se čeká přesnost v rozlišovací schopnosti v řádu 10^{-6} úhlových vteřin, čili stokrát větší než u stávajících pozemských observatoří či doposud realizovaných vesmírných astrometrických projektů. Za zmínku jistě stojí i projekty zabývající se hledáním planetek. Nejznámějšími jsou například projekt LINEAR, LONEOS, NEAT, SSS, CSS, MLS či Spacewatch. Nově se chystá mezinárodní ambiciózní projekt Gaia. Z českých projektů má světový význam projekt KLENOT.

Kapitola 2

Historie a rozvoj astronomických katalogů

2.1 Období tvorby katalogů před vynálezem dalekohledu

Pro řešení mnoha praktických i teoretických úloh v astronomii je nezbytné znát přesné polohy a vlastní pohyby hvězd. Určení přesného místního času, odvození zeměpisných souřadnic a azimutů na povrchu Země, určení poloh malých planet a komet, studium struktury a dynamiky naší hvězdné soustavy - to jsou oblasti astronomie, kde nalézají uplatnění hvězdné katalogy. Se sestavováním hvězdných katalogů se začalo již v dávné minulosti. Doposud je sestavování přesných katalogů jedním ze základních úkolů astronomie. První určování souřadnic hvězd, o kterém máme zprávy, prováděl Eudoxos, zřejmě v letech 368 – 352 př. n. l. Jeho katalog obsahuje 25 nejjasnějších hvězd. Tvorbou katalogů se však po něm zabývali i jiní, například Aristoteles, Timocharis, Hipparchos, Menelaos a další. Nejznámějším je však Ptolemaios, shrnuvší ve svém *Almagestu* soupis astronomických šířek a délek 1025 hvězd pro ekvinokcium 138.

Později se polohy hvězd z Ptolemaiova katalogu znovu určovaly a sestavovaly se nové, originální soupisy. Zde je pozoruhodný v minulé kapitole zmíněný Ulugh-Begův katalog, obsahující vlastní pozorování 1018 hvězd pro ekvinokcium 1437,5, Rotmanův katalog s 1004 hvězdami pro epochu 1594, Tycho Brahe katalog čítající 1005 hvězd pro epochu 1601 a Heveliusův katalog s 1553 hvězdami pro epochy 1661 a 1701. Polohy hvězd ve všech těchto katalogích se určovaly bez použití dalekohledu.

Všechny doposud probrané katalogy nás zajímají především po stránce historické, neboť přesnost souřadnic hvězd určených bez dalekohledu byla příliš malá. Například

měření Tycho Brahe dosáhla přesnosti jedné až dvou úhlových minut.

2.2 Období tvorby katalogů po vynálezu dalekohledu

Po vynalezení dalekohledu počet katalogů rychle vzrůstá. Zvláštní postavení mezi nimi zaujímají katalogy pulkovské observatoře. Tvorba znamenitých pulkovských katalogů se řídila plánem jejího zakladatele, akademika V. J. Struveho. Jejich vyjímečná přesnost přinesla pulkovské observatoři světová uznání. Pro soudobou astronomii mají nemalý význam katalogy greenwichské, washingtonské, kapské (pro jižní polokouli) a další. Co se týče chyb kupříkladu Flamsteedových pozorování, tak ty okolo roku 1690 činily jen několik obloukových vteřin. Je dobré uvědomit si, že zvyšování přesnosti v určování rektascenzí a deklinací je úzce spjato s přesnějšími měřidly času.

Tvorba katalogů nabírá rychlý spád. Roku 1863 F. W. A. Argelander a jeho spolupracovníci E. Schonfeld a A. Kruger vydali katalog "Atlas severní hvězdné oblohy" s přibližnými souřadnicemi 324 188 hvězd, počínaje severním pólem a konče deklinací 2°. O desetiletí později byl sestaven Severní pohraniční komisí Spojených států katalog deklinací hvězd. Za jeho tvůrce je považován L. Boss. Při jeho tvorbě užil katalogů Bradleyho, Bessela, Piazziho, Airyho a dalších. Počátkem minulého století se objevuje další významná práce, a to Eichelbergerův fundamentální katalog. Eichelbergova práce nabyla světového významu.

Katalog poněkud jiného rázu, omezující se na hvězdy v části vesmíru okolo našeho Slunce do poloměru přibližně 25 pc je Glieseho katalog. Jeho první verze čítající 915 hvězd byla vydána přirozeně jeho tvůrcem Wilhelmem Gliesem roku 1957. Pořadí hvězd se řídí takovým pravidlem, že čím větší rektascenze hvězdy je, tím větší je její pořadové číslo. Hvězdám se navíc předřazoval prefix „Gl“. Protože se na dalších vydáních tohoto katalogu podílel též astronom Hartmut Jahreiβ, byl později kromě již zmíněného prefixu „Gl“ používán alternativně i prefix „GJ“ (Gliese–Jahreiβ).

Kromě hvězdných katalogů se v historii utvářely i katalogy jiných objektů, jako například katalogy mlhovin, hvězdokup, galaxií a dalších. Jeden z prvních katalogů tohoto typu sestavil Charles Messier, který do něj zakomponoval celkem 110 objektů značených M1 až M110. První v katalogu zapsané, pochází z pozorování již od roku 1757. Původním účelem katalogu bylo upozornit na objekty na pohled zaměnitelné s kometami. Ty byly do katalogu přidávány postupně - první vydání katalogu z roku 1771 obsahuje 45 objektů, třetí vydání z roku 1781 jich má již 103. Současnou podobu získal katalog až ve 20. století,

kdy byl upřesněn a doplněn.

Koncem 19. století vychází poměrně známý Index Catalogue (IC katalog), jež byl rozšířen na více než 5000 objektů. Index Catalogue, který vytvořil John Dreyer slouží jako doplněk k New General Catalogue (NGC). New General Catalogue (NGC) je nejznámějším katalogem objektů hlubokého vesmíru v amatérské astronomii. Obsahuje přibližně 8 000 objektů, které jsou známy pod označením NGC objekty. NGC je jeden z nejrozsáhlejších všeobecných katalogů, zahrnuje všechny typy objektů hlubokého vesmíru (nespecializuje se například pouze na galaxie).

Moderní astronomické katalogy

Dnes nejvíce doporučovanými a zároveň nejvíce užívanými katalogy jsou Hipparcos, Tycho – 2 catalog, UCAC2, USNO-A2.0, USNO-A1.0, USNO-B1.0 a jistě i další. Já se zmíním jen o některých.

- **Atlas Eclipticalis**

Atlas Eclipticalis je soubor 32 hvězdných map oblastí oblohy v blízkosti ekliptiky mezi deklinací od -30° do 30° , určených na zvláštní cíle (fotometrie a astrometrie planetek). Jednomu stupni odpovídají 2 cm. Výběr hvězd není omezen jasností, ale znalostí přesné polohy a vlastního pohybu. Je vhodný pro studium planetek, neboť drtivá většina z nich se nachází v rovině ekliptiky. Atlas Eclipticalis doplňuje Atlas Australis a Atlas Borealis. Z dalších katalogů Antonína Bečváře je jistě vhodné zmínit Atlas Coeli.

- **Hipparcos**

Vychází z dat stejnojmenné družice. Čítá 118 218 hvězd pozorovaných mezi lety 1989 – 1993. Přesnost v určení pozice je 1 – 3 tisíciný úhlové vteřiny pro epochu 1991,25. Podle mezinárodních dohod je katalog Hipparcos standardem pro měření v optické astrometrii. Data obsahují také vizuální fotometrické informace, které se pro jasné hvězdy liší přibližně o 1 až 2 milimagnitudy.

- **PPM Star Catalogue**

Katalog pozic a vlastních pohybů hvězd. Astrometrická chyba je 0,27 úhlových vteřin, chyba ve vlastních pohybech hvězd je 0,3 úhlové vteřiny za století. Obsahuje 378 910 referenčních hvězd.

- **SAOC (Smithsonian Astrophysical Observatory Catalog)**

Vychází z kombinace dat některých dřívějších katalogů (AGK1, AGK2, ...). Obsahuje pozice a vlastní pohyby 258 997 hvězd, ze kterých 8719 jsou dvojhvězdy a 449 jsou hvězdy proměnné. Astrometrická chyba pro dřívější epochu 1963,5 je přibližně polovina úhlové vteřiny.

- **Tycho-2**

Je výsledkem společné usilovné spolupráce mezi Copenhagen University Observatory (CUO) a United States Naval Observatory (USNO). CUO znovu analyzovala data ze satelitu Hipparcos, což vedlo k určení lepších hvězdných pozic pro katalog Tycho - 1 a také k navýšení počtu hvězd až na 2,5 milionu. USNO bylo odpovědné za výpočty vlastních pohybů, jež byly provedeny kombinací úžasného množství 140 astrometrických katalogů. Konkrétní chyby v určení pozic v rozsahu 10 až 100 tisícín úhlové vteřiny jsou závislé na hvězdné velikosti. Chyby ve vlastních pohybech jsou 1 – 3 tisíciny úhlové vteřiny. Tento katalog je s dokumentací přístupný po kontaktování United States Naval Observatory. Tycho-2 je založený na kombinaci družicových dat a dřívějších pozemních astrometrických pozorování.

- **UCAC2 (USNO CCD Astrograph Catalog)**

Katalog je nedávno dokončenou prací. Roku 2004 pokrýval 86% oblohy. Čítá více jak 48 milionů hvězd s hvězdnými velikostmi v intervalu od 8. do 16. magnitudy. Pozice jsou založeny na posledních pozorováních americké observatoře Cerro Tololo umístěné v chilských Andách. Dále přispěly observatoře v Arizoně a také data ze samotného katalogu USNO. Vlastní pohyby u hvězd majících hvězdnou velikost větší než 12,5 mag byly odvozeny stejnou cestou jako bylo zmíněno u katalogu Tycho-2, užitím družice Hipparcos. Katalog je opět přístupný po kontaktování United States Naval Observatory.

- **USNO-A1.0**

Obsahuje 488 006 860 objektů, jejichž pozice mohou být použity pro astrometrická měření. Tyto objekty byly detekovány pomocí PMM (Precision Measuring Machine) a zpracovány U.S. Naval Observatory. Astrometrické chyby se pohybují okolo 0,25 úhlových vteřin, typická fotometrická chyba je přibližně 0,25 magnitudy. Po zpřesnění dat a nové analýze se podařilo docílit astrometrické chyby 0,15 úhlové vteřiny a fotometrické chyby 0,15 magnitudy.

- **USNO-A2.0**

Čítá 526 280 881 hvězd, je založený na katalogu USNO-A1.0. Hlavní rozdíl mezi A2.0 a A1.0 je, že A1.0 užívá Guide Star Catalog jako svůj souřadnicový systém, kdežto A2.0 používá ICRF. Astrometrická chyba je v řádech setin úhlové vteřiny.

- **USNO-B1.0**

Obsahuje polohy, vlastní pohyby a vícebarevnou fotometrii pro 1,04 mld. hvězd, zobrazených na 7435 snímcích ze čtyř Schmidtových komor (Flagstaff, Palomar, ESO a UKST) v průběhu posledního půlstoletí. Mezní hvězdná velikost katalogu je $V = 21$ mag. Astrometrická chyba je menší než $0,2''$, chyba fotometrická nepřesahuje $0,3$ mag.

Kapitola 3

Astrometrie CCD snímku

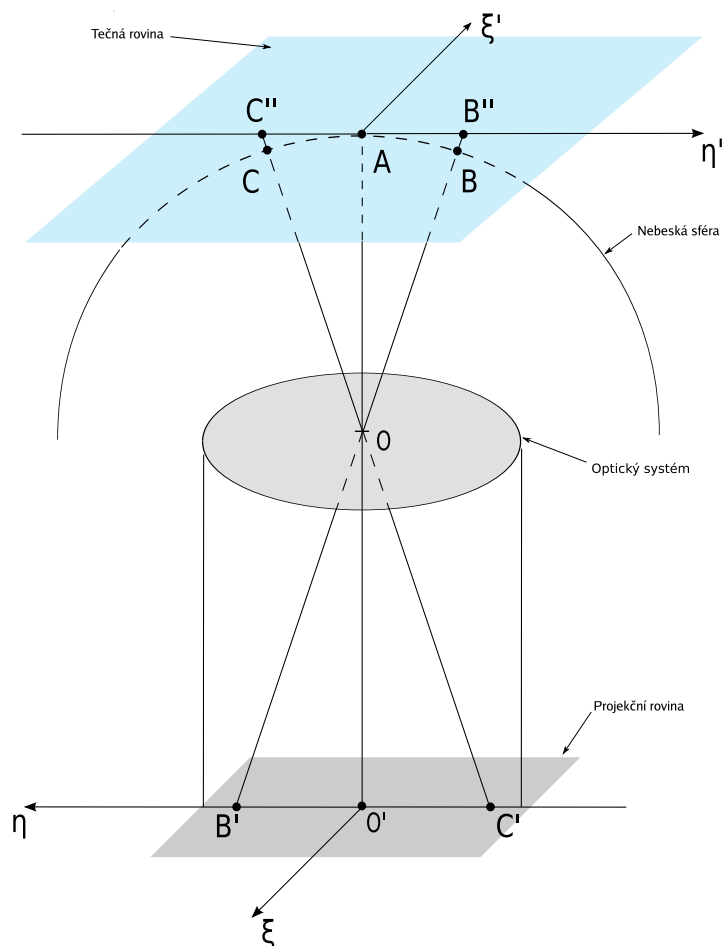
3.1 Projekce sféry na rovinu

Proměrování fotografických desek či CCD snímků je založeno na poněkud jednoduché myšlence, a to takové, že hvězdy na nebeské sféře se promítají z kulové plochy do roviny. Toto zobrazení je jistě jednoznačné, můžeme tedy každé hvězdě na fotografickém či CCD snímku přiřadit právě jednu dvojici souřadnic na nebeské sféře. Nás budou zajímat rovníkové souřadnice druhého druhu. Situaci osvětluje obrázek (3.1). Přichází-li světelný svazek paprsků od hvězdy z jedné strany optické soustavy, pak vycházející paprsky jsou rovnoběžné s tímto svazkem. Toto platí však pro malé úhly, které svírají paprsky s optickou osou. V mezích dobrých obrazů v astronomickém dalekohledu lze toto pravidlo považovat za naprosto správné. Čím je tento úhel větší, tím je větší i úhel sevřený mezi dopadajícím a ze soustavy vycházejícím paprskem. Příkladem podle obrázku může být například Keplerův dalekohled.

Na obrázku (3.1) je bod O středem nebeské sféry. V bodě A je vedena tečná rovina k této sféře, přirozeně rovnoběžná se CCD čipem (fotografickou deskou). Hvězdy jsou reprezentovány body A, B, C , jejich projekce do tečné roviny jsou body A'', B'', C'' , projekce na CCD čip potom A', B', C' . Úsečka OO' udává směr optické osy. Z obrázku lze čekat, že pravoúhlé souřadnice na CCD čipu a na tečné rovině budou svázány nějakými transformačními rovnicemi. Označme z obrázku (3.1) $\phi = \widehat{O'OC'} = \widehat{AOC}$. Ihned je vidět, že

$$\tan \phi = \frac{O'C'}{O'O} = \frac{AC''}{AO}. \quad (3.1)$$

Bod C'' na tečné rovině má souřadnice $[\xi', 0]$, jemu odpovídající obraz na CCD čipu pak



Obrázek 3.1: Projekce hvězd z nebeské sféry na tečnou rovinu a snímek

$[\xi, 0]$. Potom zřejmě platí, že

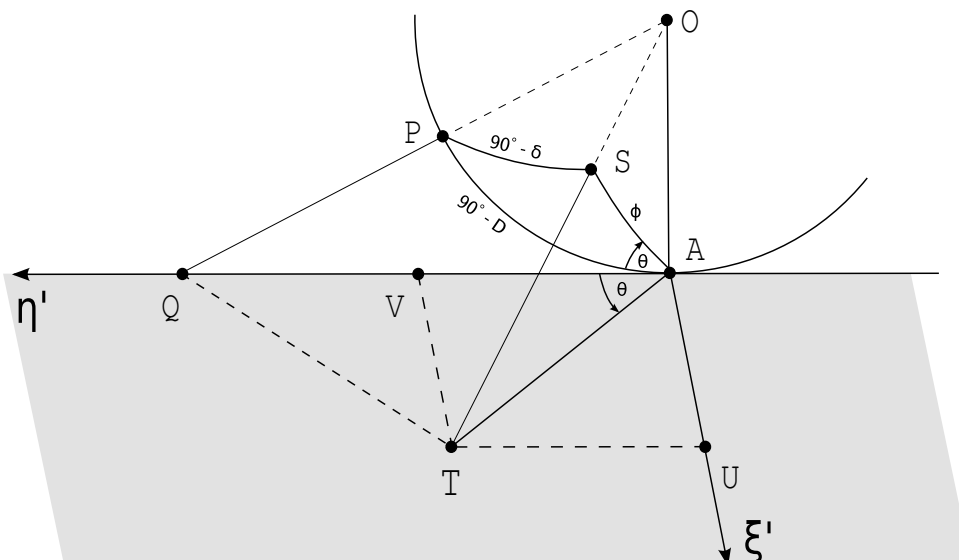
$$\xi' = OA \tan \phi \quad \xi = OO' \tan \phi. \quad (3.2)$$

Kdybychom udělali stejnou úvahu i pro body ležící na ose η' , dostaneme tyto transformační rovnice

$$\xi = \frac{OO'}{OA} \xi' \quad \eta = \frac{OO'}{OA} \eta'. \quad (3.3)$$

3.1.1 Standardní (ideální) souřadnice

Představme si pohled na tečnou rovinu podle obrázku (3.2). Necht' A je bod nebeské sféry na který je zaměřen dalekohled a bod S hvězda poblíž A . Z obrázku je vidět, že bod T je projekcí S do tangenciální roviny. Kružnice určená obloukem \widehat{AS} se pak přirozeně promítne do tangenciální roviny v přímku určenou body AT . Budiž dále bod P severním pólem nebeské sféry. Zřejmě tedy kružnice určená obloukem \widehat{AP} utváří poledník, jež se promítá do přímky dané body AQ . Tuto přímku můžeme vzít jako první osu tečné roviny,



Obrázek 3.2: Pohled na nebeskou sféru ze směru tečné roviny

druhá na ni kolmá je zřejmě určena body AU . Z obrázku vidíme, že \widehat{QAT} definuje sférický úhel \widehat{PAS} , čili $\widehat{QAT} = \widehat{PAS}$. Dále je vidět, že úhel mezi dvěma hlavními kružnicemi, jejichž oblouky se promítnou na tečnou rovinu podle obrázku, je roven úhlu mezi promítnutými přímkami na tečné rovině. Tato poznámka je navíc omezena jen na kružnice procházející tangenciálním bodem (A). Mějme kupříkladu kružnici SP a její průmět TQ a kružnici AP a její průmět AQ . Potom tedy jistě úhel mezi AQ a TQ není roven úhlu \widehat{SPA} . Označme nyní oblouk \widehat{AS} jako ϕ a \widehat{SAP} jako θ . Tedy podle předchozího textu je $\widehat{QAT} = \theta$.

Následující jednoduché rovnice vycházejí opět z obrázku (3.2).

$$VT = \xi' = AT \sin \theta \quad UT = \eta' = AT \cos \theta \quad (3.4)$$

$$AT = OA \tan \widehat{AOT} = OA \tan \phi \quad (3.5)$$

Kombinací těchto rovnic dostaneme

$$\xi' = OA \tan \phi \sin \theta \quad \eta' = OA \tan \phi \cos \theta. \quad (3.6)$$

S použitím rovnic (3.3) máme

$$\xi = OO' \tan \phi \sin \theta \quad \eta = OO' \tan \phi \cos \theta. \quad (3.7)$$

Pokud zvolíme jednotkovou ohniskovou vzdálenost, potom

$$\xi = \tan \phi \sin \theta, \quad (3.8)$$

$$\eta = \tan \phi \cos \theta. \quad (3.9)$$

ξ a η jsou tedy zmíněné standardní souřadnice (poprvé definoval prof. H.H. Turner).

3.2 Transformace mezi rovníkovými (II. druhu) a ideálními souřadnicemi

Necht' A, D jsou rektascenze a deklinace bodu A na nebeské sféře a α, δ rovníkové souřadnice hvězdy S . Nyní ukážeme, jak spolu souvisí ξ, η, A, D a α, δ . Budeme vycházet ze sférického trojúhelníku ASP na obrázku (3.2). Má-li bod A známé souřadnice a víme-li, že P je severní nebeský pól, potom úhlová vzdálenost mezi P a A je jistě $90^\circ - D$, neboť bod A má deklinaci rovnu D a spojnice A a P je část nebeského poledníku. Stejně tak je to u hvězdy S . Spojnice mezi S a P je taktéž část nebeského poledníku, jejich úhlová vzdálenost je $90^\circ - \delta$. Poznamenejme, že deklinace se měří od světového rovníku směrem k nebeským pólům (severní nebeský pól má tudíž deklinaci $\delta = 90^\circ$). Podobný princip je s měřením rektascenze hvězdy S . Opět, je-li A rektascenze bodu A a α rektascenze hvězdy S , zřejmě rozdíl těchto dvou rektascenzí odpovídá úhlu \widehat{APS} . Máme tedy $\widehat{AP} = 90^\circ - D$, $\widehat{SP} = 90^\circ - \delta$, $\widehat{APS} = \alpha - A$, $AS = \phi$ a $\widehat{SAP} = \theta$.

Užitím rovnic sférické trigonometrie, zejména kosinovy věty pro stranu a věty sinovy, dostali bychom po rozmyšlení tyto 3 rovnice

$$\cos \phi = \sin \delta \sin D + \cos \delta \cos D \cos (\alpha - A), \quad (3.10)$$

$$\sin \phi \sin \theta = \cos \delta \sin (\alpha - A), \quad (3.11)$$

$$\sin \phi \cos \theta = \sin \delta \cos D - \cos \delta \sin D \cos (\alpha - A). \quad (3.12)$$

Podělíme-li rovnici (12) levou stranou rovnice (10) s tím, že uvážíme vztah (9), získáme první transformační rovnici pro η .

$$\eta = \frac{\cos D - \cot \delta \sin D \cos (\alpha - A)}{\sin D + \cot \delta \cos D \cos (\alpha - A)} \quad (3.13)$$

Stejně tak podělením rovnice (11) levou stranou rovnice (10) s uvážením vztahu (8) obdržíme transformační rovnici pro ξ .

$$\xi = \frac{\cot \delta \sin (\alpha - A)}{\sin D + \cos D \cot \delta \cos (\alpha - A)} \quad (3.14)$$

V praxi se ale častěji užívá transformací inverzních, neboť cílem je ideálním souřadnicím přiřadit souřadnice rovníkové (II. druhu). Inverzní vztahy následují:

$$\tan(\alpha - A) = \frac{\xi}{(1 - \eta \tan D) \cos D}, \quad (3.15)$$

$$\cot \delta \sin(\alpha - A) = \frac{\xi}{(\eta + \tan D) \cos D}. \quad (3.16)$$

Nejprve by se tedy z rovnice (3.15) spočítal výraz $(\alpha - A)$, a po dosazení do (3.16) bychom tedy obdrželi δ .

3.2.1 Aproximace pro malé zorné pole

Je-li

$$|\alpha - A| \lesssim 0,1 \text{ rad} \quad |\delta - D| \lesssim 0,1 \text{ rad}, \quad (3.17)$$

potom můžeme rovnice zapsat v aproximativním tvaru.

Označíme-li $\alpha - A = \varphi$, potom z rovnice (3.14) máme

$$\xi = \frac{\cos \delta \sin \varphi}{\sin \delta \sin D + \cos D \cos \delta \cos \varphi}. \quad (3.18)$$

Taylorův vzorec představující rozvoj funkce $f(x, y)$ v Taylorův polynom okolo bodu $[x_0, y_0]$ reprezentuje vztah

$$\begin{aligned} T_n(x, y) = & f(x_0, y_0) + \frac{\partial f}{\partial x}(x_0, y_0)h + \frac{\partial f}{\partial y}(x_0, y_0)k + \\ & + \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(x_0, y_0)h^2 + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}(x_0, y_0)hk + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}(x_0, y_0)k^2 \right) + \dots + \\ & + \frac{1}{n!} \sum_{j=0}^n \binom{n}{j} \frac{\partial^n f}{\partial x^{n-j} \partial y^j}(x_0, y_0) h^{n-j} k^j, \end{aligned} \quad (3.19)$$

kde $h = x - x_0$ a $k = y - y_0$. Provedeme-li rozvoj funkce $\xi(\delta, \varphi)$ v Taylorův polynom okolo bodu $[D, 0]$ dle vztahu (3.19), dostaneme pro první tři členy rozvoje

$$\xi \simeq (\alpha - A) \cos D - (\alpha - A)(\delta - D) \sin D + (\alpha - A)^3 \cos D \frac{3 \cos^2 D - 1}{6}. \quad (3.20)$$

Naprostu analogickým postupem bychom zjistili, že

$$\eta \simeq (\delta - D) + \frac{1}{4}(\alpha - A)^2 \sin 2D + \frac{1}{2}(\alpha - A)^2(\delta - D) \cos 2D + \frac{1}{3}(\delta - D)^3. \quad (3.21)$$

Pro inverzní transformace potom dostáváme

$$\alpha - A \simeq \xi \sec D + \xi \eta \sec D \tan D - \frac{1}{3} \xi^3 \sec^3 D + \xi \eta^2 \sec D \tan^2 D, \quad (3.22)$$

$$\delta - D \simeq \eta - \frac{1}{2}\xi^2 \tan D - \frac{1}{2}\xi^2 \eta \sec^2 D - \frac{1}{3}\eta^3. \quad (3.23)$$

Uvažujeme-li pouze první členy rozvoje, máme

$$\begin{aligned} \xi &\approx (\alpha - A) \cos D, \\ \eta &\approx \delta - D. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Přesnost této aproximace při zpracovávání CCD snímků plně vyhovuje.

3.3 Vztah mezi astrografickými a standardními souřadnicemi

Je zřejmé, že ideální souřadnice jsou modelovým případem projekce bodu na nebeské sféře do roviny snímku. Ve skutečnosti souřadnice, které na snímku měříme, tzv. astrografické souřadnice, se od souřadnic ideálních poněkud liší. Rozdíly mezi naměřenými souřadnicemi x, y a standardními souřadnicemi ξ, η hvězd lze rozdělit do dvou skupin.

1. Počátky těchto dvou souřadnicových soustav mohou být obecně různé, neboť lze jen s obtíží umístit počátek souřadnicové soustavy (x, y) do optického středu. Dále je třeba v ideálním případě umístit osu y tak, aby byla rovnoběžná s deklinačním kruhem. Důležitý je fakt, že ξ a η jsou podle výpočtů vzájemně kolmé, ale u souřadnic x a y to tak přesně být nemůže.
2. Souřadnice ξ, η se podstatně odlišují od souřadnic x, y v tom smyslu, že ideální souřadnice ξ, η určené z α, δ přesně odpovídají vzájemné poloze hvězd na nebeské sféře, avšak souřadnice x, y zobrazují tuto polohu hvězd zkreslenou vlivem diferenciální refrakce, aberace, distorse objektivu, atd. v okamžiku fotografování.

Je třeba poznamenat, že ideální souřadnice neodpovídají měřeným rozměrům na fotografické desce jak z výše zmíněných důvodů, tak i z důvodu různých jednotek mezi ideálními a astrografickými souřadnicemi a tedy jiným měřítkem mezi nimi. Měřítka c je zřejmě určeno vztahem

$$c = \sqrt{\frac{(\xi_i - \xi_j)^2 + (\eta_i - \eta_j)^2}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}. \quad (3.25)$$

Vztah představuje podíl vzdáleností mezi i -tou a j -tou hvězdou v soustavách standardních a astrografických souřadnic. Z několika známých vzdáleností pak aritmetickým průměrem dostaneme odhad měřítka v jednotkách pixel na úhlovou vteřinu, popřípadě naopak.

3.3.1 Posunutí a vzájemné otočení mezi astrografickými a ideálními souřadnicemi

Uvažujeme tedy nyní, že soustava souřadnic ideálních je otočena vůči astrografickým souřadnicím o úhel φ . Dále předpokládáme vzájemné posunutí středů o hodnoty X_0 a Y_0 . Dvourozměrná lineární transformace popisující přechod od astrografických k ideálním souřadnicím je určena následujícím vztahem

$$\mathbf{r}_{(\xi,\eta)} = c (\mathbf{R}_0 + \mathbf{S}\mathbf{r}_{(x,y)}), \quad (3.26)$$

kde $\mathbf{r}_{(\xi,\eta)}$ je polohový vektor obrazu objektu v ideální souřadnicové soustavě, $\mathbf{r}_{(x,y)}$ polohový vektor obrazu objektu v astrografické souřadnicové soustavě, \mathbf{R}_0 vektor vzájemného posunutí středů obou soustav a \mathbf{S} matice otočení. Rovnici (3.26) zapíšeme v maticové formě

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} = c \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} + c \begin{pmatrix} A & -B \\ B & A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}, \quad (3.27)$$

kde $A = \cos \varphi$ a $B = \sin \varphi$ (φ je úhel otočení soustav). Poznamenejme, že platí goniometrická identita $A^2 + B^2 = 1$. Transformace nepopisuje zrcadlení snímku, to je třeba odhalit jinými způsoby. Měřítko c by samozřejmě šlo určit minimalizací metodou nejmenších čtverců, avšak tím bychom došli k soustavě nelineárních rovnic. Proto se tomuto postupu vyhýbáme, i když by byl principiálně správný a postupujeme dle výše zmíněného schématu. Ukazuje se, že přesnost metody určování měřítka dle vztahu (3.25) je i tak velmi uspokojivá.

3.3.2 Vliv diferenciální refrakce a aberace

Dá se ukázat, že o refrakci opravené hodnoty, které označíme x' a y' splňují následující vztahy (viz. [1])

$$\begin{aligned} x' &= x + xk(1 + \tan^2 \zeta \sin^2 q) + yk \tan^2 \zeta \sin q \cos q \\ &\quad + \text{členy druhého řádu vzhledem k } x \text{ a } y, \\ y' &= y + yk(1 + \tan^2 \zeta \cos^2 q) + xk \tan^2 \zeta \sin q \cos q \\ &\quad + \text{členy druhého řádu,} \end{aligned} \quad (3.28)$$

kde q je paralaktický úhel, ζ zenitová vzdálenost a k je refrakční součinitel ($k \approx 0,0003$). Dříve, při prvních pokusech použití fotografie v astrometrii, se refrakční opravy astrografických souřadnic skutečně počítaly podle takovýchto vzorců. Nelze je však vypočítat

dost přesně, neboť není známa přesná hodnota součinitele k pro fotografické paprsky. Pro nás je však v této fázi důležité to, že rovnice mezi ξ , η a x , y si zachovávají svůj lineární tvar, omezíme-li se v rovnicích (3.28) pouze na členy s prvními mocninami x a y a zanedbáme-li členy druhého řádu. Nyní tuto linearitu ukážeme.

Nejprve přepíšeme rovnice (3.28) pro krátkší psaní takto:

$$\begin{aligned}x' &= x + xl + ym, \\y' &= y + yn + ym,\end{aligned}\tag{3.29}$$

kde l , m , n jsou nějaké konstanty jen nepatrně větší než k , neboť se snažíme vyhýbat fotografování oblohy pro astrometrické účely ve velkých zenitových vzdálenostech. Dosazením opravených astrografických souřadnic (3.29) do transformačních rovnic (3.27) dostaneme po pár jednoduchých úpravách

$$\begin{aligned}\xi &= c' \cdot [X_0 + x(A + Al) + y(Am - Bm - Bn - B)], \\ \eta &= c' \cdot [Y_0 + x(Bl + B) + y(Am + An + Bm + A)],\end{aligned}\tag{3.30}$$

kde jsme jako c' označili měřítko. Zavedením nových konstant získáme Turnerovské lineární transformační rovnice (podle oxfordského astronoma prof. H.H. Turnera)

$$\begin{aligned}\xi &= ax + by + c, \\ \eta &= dx + ey + f.\end{aligned}\tag{3.31}$$

Podle těchto rovnic se v dnešní době zpracovává převážná většina astronomických snímků.

Poznamenejme, že vliv aberace na souřadnice x , y je zcela podobný vlivu refrakce, ale je ještě menší. Proto její vliv **nepozmění** tvar transformačních rovnic (3.31).

V neposlední řadě je jistě zapotřebí okomentovat zanedbání refrakčních členů druhého řádu, jež vedlo k linearizaci (3.31). Bude pro nás tedy užitečné zjistit, jaké chyby se při počítání dopustíme, zanedbáme-li refrakční členy druhého řádu. Nejjednodušší je vyšetřit tento vliv na základě refrakčních oprav souřadnic u a v (v jde na snímku směrem vertikálního kruhu k zenitu, u po hlavní kružnici kolmé k vertikálnímu kruhu). Vliv diferenciální refrakce na tyto souřadnice se vyjádří vzorci (viz. [1])

$$\begin{aligned}u' - u &= ku - kuv \tan \zeta, \\ v' - v &= kv(1 + \tan^2 \zeta) - k^2(u^2 + 2v^2 + v^2 \tan^2 \zeta) \tan \zeta.\end{aligned}\tag{3.32}$$

Z těchto rovnic se obecně ve výše citované literatuře dají právě odvodit rovnice (3.28). Opravy druhého řádu jsou tedy

$$\begin{aligned}(u' - u)_2 &= -kuv \tan \zeta, \\ (v' - v)_2 &= -k^2(u^2 + 2v^2 + v^2 \tan^2 \zeta) \tan \zeta.\end{aligned}\tag{3.33}$$

Po výpočtu refrakčního členu pro dané podmínky v době pozorování (tlak, teplota), bychom obdrželi pro $k = 60''$ následující hodnoty oprav:

ζ [°]	$u = v = 0,5^\circ$		$u = v = 1,0^\circ$		$u = v = 1,5^\circ$	
	Δu_2 ["]	Δv_2 ["]	Δu_2 ["]	Δv_2 ["]	Δu_2 ["]	Δv_2 ["]
30	-0,003	-0,009	-0,011	-0,035	-0,024	-0,079
45	-0,005	-0,018	-0,018	-0,073	-0,041	-0,165
60	-0,008	-0,048	-0,032	-0,190	-0,071	-0,427
70	-0,012	-0,132	-0,050	-0,530	-0,113	-1,192

Tabulka 3.1: Refrakční opravy druhého řádu souřadnic u, v

ζ [°]	$u = v = 2,0^\circ$		$u = v = 2,5^\circ$	
	Δu_2 ["]	Δv_2 ["]	Δu_2 ["]	Δv_2 ["]
30	-0,042	-0,141	-0,066	-0,220
45	-0,073	-0,293	-0,114	-0,458
60	-0,127	-0,762	-0,198	-1,190
70	-0,201	-2,120	-0,314	-3,320

Tabulka 3.2: Refrakční opravy druhého řádu souřadnic u, v

Vliv aberačních členů druhého řádu je mnohem menší než vliv týchž členů v případě refrakce. Jak je vidět z uvedené refrakční tabulky, omezíme-li se na plochu $2^\circ \times 2^\circ$ a nesnímujeme-li ve větší zenitové vzdálenosti než 60° , pak chyba, která vznikne zanedbáním diferenciální refrakce, je druhého řádu a nedosahuje $\pm 0,2''$. To je srovnatelná chyba, kterou je zatíženo určení základních srovnávacích hvězd.

Souřadnice u, v jsou tedy **souřadnicemi snímku** a narůstají ve směru vertikálního kruhu k zenitu a po hlavní kružnici kolmé k tomuto vertikálnímu kruhu. Tedy, je dobré upozornit na to, že se nejedná o souřadnice azimutální na které jsme běžně zvyklí. Jinak, co se týče zjišťování rovníkových souřadnic dle transformačních rovnic (3.13) a (3.14), tak ty jsou obecně již o refrakční chyby ošetřeny, neboť jsme situaci vyšetřovali bez uvážení

přítomnosti atmosféry. Zkrátka refrakční chyby pro astrometrii vznikají jen v rámci měření po snímku. Souřadnice u, v se vztahují pouze k danému snímku, podobně jako souřadnice x a y . Vztahy souřadnic astrografických a souřadnic u, v jsou

$$\begin{aligned}u &= x \cos q - y \sin q, \\v &= x \sin q + y \cos q.\end{aligned}\tag{3.34}$$

Poznamenejme, že v případě velkých desek (např. $5^\circ \times 5^\circ$), nelze zanedbávat ani vliv refrakčních členů druhého řádu, či chyb jiných.

Tedy, chceme-li uvažovat vliv refrakce, potom bohatě stačí vzít refrakční členy prvního řádu a můžeme užívat Turnerovy transformační rovnice ve tvaru (3.31).

Stojíme nyní před problémem, jak určit parametry (a, b, c, d, e, f) transformace, aby tento lineární model co nejlépe aproximoval a přimyká se k ideální situaci, kdy astrografické souřadnice splývají se souřadnicemi ideálními.

Dříve, v období mezi 40. a 70. léty se hojně užívala tzv. metoda dependencí, vyvinutá roku 1911 F. Schlesingerem. Dnes se užívá na výpočet poněkud obtížnější, avšak přesnější metoda nejmenších čtverců. Její použití úzce souvisí s nástupem počítačů. Obecně se ale u žádné metody neobejdeme bez srovnávacích hvězd o známých rovníkových souřadnicích (II. druhu). Z průběhu těchto souřadnic a naměřených astrografických souřadnic srovnávacích hvězd můžeme určit parametry snímku (a, b, c, \dots) .

3.4 Metoda nejmenších čtverců

Metoda vychází z minimalizace celkového součtu čtverců odchylek od teoretické závislosti.

3.4.1 Lineární model pro šest deskových konstant

Lineární model pro šest deskových konstant je dán Turnerovými transformačními rovnicemi

$$\begin{aligned}\xi &= ax + by + c, \\ \eta &= dx + ey + f.\end{aligned}\tag{3.35}$$

Ještě předtím, než začneme odvozovat příslušné rovnice, označíme astrografické souřadnice vynásobené měřítkem jako x' a y' . Tvar Turnerovských rovnic ale pozměněn nebude

$$\begin{aligned}\xi &= Ax' + By' + C, \\ \eta &= Dx' + Ey' + F.\end{aligned}\tag{3.36}$$

Součet, který budeme minimalizovat je ve tvaru

$$S = \sum_{i=1}^N \{[\xi_i - (Ax'_i + By'_i + C)]^2 + [\eta_i - (Dx'_i + Ey'_i + F)]^2\}.\tag{3.37}$$

Aby součet S byl minimální, musí se parciální derivace podle všech parametrů rovnat nule. Tedy

$$\frac{\partial S}{\partial A} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial B} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial C} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial D} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial E} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial F} = 0.\tag{3.38}$$

My však budeme rozebírat způsob nejjednodušší, a to lineární model pro čtyři deskové konstanty.

3.4.2 Lineární model pro čtyři deskové konstanty

Vyjdeme z transformačních rovnic (3.27). Potom

$$\begin{aligned}\xi &= Ax' - By' + C, \\ \eta &= Bx' + Ay' + F.\end{aligned}\tag{3.39}$$

Transformace se tedy týká pouze otočení a posunutí mezi ideálními a astrografickými souřadnicemi. Součet, který budeme minimalizovat vypadá následovně:

$$S = \sum_{i=1}^N \{[\xi_i - (Ax'_i - By'_i + C)]^2 + [\eta_i - (Bx'_i + Ay'_i + F)]^2\}.\tag{3.40}$$

Aby součet S byl minimální, musí se parciální derivace podle všech parametrů rovnat nule. Tedy

$$\frac{\partial S}{\partial A} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial B} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial C} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial F} = 0.\tag{3.41}$$

Potom postupně po výpočtu obdržíme

$$\begin{aligned}
A \sum_{i=1}^N [(x'_i)^2 + (y'_i)^2] + C \sum_{i=1}^N x'_i + F \sum_{i=1}^N y'_i &= \sum_{i=1}^N (\xi_i x'_i + \eta_i y'_i), \\
B \sum_{i=1}^N [(x'_i)^2 + (y'_i)^2] - C \sum_{i=1}^N y'_i + F \sum_{i=1}^N x'_i &= \sum_{i=1}^N (\eta_i x'_i - \xi_i y'_i), \\
A \sum_{i=1}^N x'_i - B \sum_{i=1}^N y'_i + NC &= \sum_{i=1}^N \xi_i, \\
A \sum_{i=1}^N y'_i + B \sum_{i=1}^N x'_i + NF &= \sum_{i=1}^N \eta_i.
\end{aligned} \tag{3.42}$$

Tuto soustavu napíšeme maticově

$$\mathbf{SM} = \mathbf{P}, \tag{3.43}$$

kde \mathbf{S} je tzv. matice nejmenších čtverců.

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N [(x'_i)^2 + (y'_i)^2] & 0 & \sum_{i=1}^N x'_i & \sum_{i=1}^N y'_i \\ 0 & \sum_{i=1}^N [(x'_i)^2 + (y'_i)^2] & -\sum_{i=1}^N y'_i & \sum_{i=1}^N x'_i \\ \sum_{i=1}^N x'_i & -\sum_{i=1}^N y'_i & N & 0 \\ \sum_{i=1}^N y'_i & \sum_{i=1}^N x'_i & 0 & N \end{pmatrix} \tag{3.44}$$

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ F \end{pmatrix} \tag{3.45}$$

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N (\xi_i x'_i + \eta_i y'_i) \\ \sum_{i=1}^N (\eta_i x'_i - \xi_i y'_i) \\ \sum_{i=1}^N \xi_i \\ \sum_{i=1}^N \eta_i \end{pmatrix} \tag{3.46}$$

Poznamenejme, že čárkované souřadnice jsou již vynásobené měřítkem. Číslo N reprezentuje počet srovnávacích hvězd.

Postup je tedy takový, že na daném snímku identifikujeme dle vybraného katalogu hvězdné pole. Poté vybíráme jednotlivé srovnávací hvězdy, a to takovým způsobem, že se snažíme, aby byly přibližně rovnoměrně rozmístěny po snímku. Z katalogu těchto referenčních hvězdám přiřadíme rovníkové souřadnice (II. druhu) a ve vybraném programu pro analýzu CCD snímků jim přiřadíme ještě souřadnice astrografické. Budeme-li znát rovníkové souřadnice středu snímku, pak snadno spočteme ideální souřadnice

těchto referenčních hvězd. Vše pak dosadíme do výše uvedených rovnic. Jejich vyřešením získáme deskové konstanty. Je třeba myslet na to, že astrografické souřadnice, které naměříme, musíme vynásobit měřítkem. Teprve poté dosazujeme tyto naškálované souřadnice do výše uvedených rovnic (3.42). Rovníkové souřadnice planety získáme již potom snadno z transformačních rovnic (3.39) a (3.24), kde do rovnic (3.39) dosazujeme naškálované astrografické souřadnice planety.

Co se týče zjištění středu snímku, nelze užít údaje v hlavičce souboru snímku. Tato hodnota je totiž pouze orientační pro vyhledání a identifikaci hvězdného pole které chceme fotit. Postup určení rovníkových souřadnic středu snímku je takový, že nejprve střed odhadneme z výpočtu těžiště hvězd a poté cyklicky tento střed opravujeme o relativní posuv mezi astrografickými a ideálními souřadnicemi daný deskovými konstantami C a F . Tímto postupem docílíme totiž toho, že pokud budou C a F malé, leží střed ideálních souřadnic v optickém středu soustavy. Oprava středu snímku je prováděna dle vztahů (3.24) s tím, že za ξ a η dosazujeme relativní posuv daný konstantami C a D . Postup je popsán v následující pasáži, kde je rozebrán mnou vytvořený výpočetní skript.

3.4.3 Výpočetní skript pro CCD astrometrii

Z toho co bylo doposud napsáno o CCD astrometrii, nás vede k závěru, že pro řešení budeme muset přistoupit k numerickým postupům s užitím vhodných programů. Já jsem si vybral volně šířitelný program Octave.

```

output_precision = 10 %Vysledky na deset desetinnych mist
Skript pro astrometrii CCD snimku
%Nacteni vstupnich dat
load "A.dat";
%Vybere sloupce dat v souboru A.dat
%Nacita astrograficke souradnice srovnovacich hvezd
X=A(:,4);
Y=A(:,5);
%Nacita rovníkove souradnice srovnovacich hvezd
AA = A(:,2);
DD = A(:,3);
%Definice stredu snimku
X_0 = 765/2;
Y_0 = 510/2;
%Osetreni namerenych astrografickych souradnic
%na sred snimku
X = X - X_0;
Y = Y - Y_0;

%Identifikace stredu snimku A_0 D_0
%Prvotni odhad jako teziste srovnovacich hvezd
%Vrati pocet radku matice, tedy pocet srovnovacich hvezd

```

```

pocet_hvezd = rows(X);
A_T = sum(AA)/rows(AA) %Teziste rektascenze hvezd
D_T = sum(DD)/rows(DD) %Teziste deklinace hvezd

%Tedy prvotni odhad souradnice stredu snimku je (A_T,D_T)
c=0;

for k = 1:50
%Spoctou se idealni souradnice z odhadu stredu snimku
u = (AA - A_T)*cos(D_T*pi/180);
v = (DD - D_T);

%Meritko, projizdi se vsechny kombinace hvezd
pocet_dvojic=0;
for i = 1:pocet_hvezd

    for j = (i+1):pocet_hvezd
        c(i,j) = sqrt( ((u(i) - u(j))**2 + (v(i) - v(j))**2) / \
            ( (X(i) - X(j))**2 + (Y(i) - Y(j))**2) );
        %elementu (i,j) matice c se priradi spoctene meritko
        %mezi i-tou a j-tou hvezdou
        pocet_dvojic=pocet_dvojic+1;
    endfor

endfor
%Prumerne meritko ze vsech dvojic
meritko = sum(sum(c)) / pocet_dvojic;

%Matice nejmensich ctvercu
S11=(meritko**2)*(sumsq(-X) + sumsq(Y));
S12=0;
S13=meritko*sum(-X);
S14=-meritko*sum(Y);
S21=0;
S22=(meritko**2)*(sumsq(-X) + sumsq(Y));
S23=-meritko*sum(Y);
S24=meritko*sum(-X);
S31=meritko*sum(-X);
S32=-meritko*sum(Y);
S33=pocet_hvezd;
S34=0;
S41=meritko*sum(Y);
S42=meritko*sum(-X);
S43=0;
S44=pocet_hvezd;
S=[S11, S12, S13, S14; \
    S21, S22, S23, S24; \
    S31, S32, S33, S34; \
    S41, S42, S43, S44];

%Prava strana soustavy
P11=meritko*(sum(-u .* X + v .* Y));
P21=meritko*(sum(-v .* X - u .* Y));
P31=sum(u);
P41=sum(v);

P = [P11, P21, P31, P41]

%Vysledek(parametry transformace)

```

```

M = inv(S)*P'

%Vypocet idealnich souradnic
CF=[M(3), M(4)]'; %Vektor relativniho posunuti mezi
                    %astrografickymi a idealnimi souradnicemi
T=[M(1), -M(2); M(2), M(1)]; %Matice otoceni

%Souradnice planety (astrograficke a idealni)
CO=[-(522.8 - X_0)*meritko, (460.98 - Y_0)*meritko]';
Ideal=CF + T*CO;

Rektascence_objektu = (Ideal(1)/cos(D_T*pi/180)) + A_T
Deklinace_objektu = Ideal(2) + D_T

%Oprava stredu snimku !!!
A_T = A_T + M(3)/cos(D_T*pi/180)
D_T = D_T + M(4)

endfor

```

V poslední části skriptu se opravují souřadnice těžiště dle těchto vztahů

$$\begin{aligned}
 A' &= A + \frac{C}{\cos D}, \\
 D' &= D + F,
 \end{aligned}
 \tag{3.47}$$

kde A' a D' jsou opravené souřadnice středu snímku. Snadno nahlédneme, že tyto vztahy vychází přímo z (3.24), kde místo astrografických souřadnic ξ a η dosazujeme relativní posuny C a F . Tyto opravy se opakují tak dlouho, až je relativní posun mezi souřadnicemi malý vzhledem k přesnosti v určení poloh hvězd. Pověšinou bohatě stačí pět oprav.

Ještě je třeba okomentovat, proč se v matici nejmenších čtverců měnila znaménka u astrografické souřadnice x . Jedná se o orientaci ideálních souřadnic vzhledem k souřadnicím astrografickým. Může se totiž stát, že astrografická souřadnice může narůstat v opačném smyslu než souřadnice ideální. Toto zrcadlení je třeba odhalit. Například tím, že z katalogu zjistíme, kterým směrem narůstá rektascenze a deklinace. Z toho můžeme usoudit na směr růstu ideálních souřadnic. Ten poté porovnáme se způsobem, jak narůstají naše astrografické souřadnice na snímku.

Struktura souboru „A.dat“

Vstupní soubor „A.dat“ může vypadat například takto:

```

1 269.537998 04.657577 143.08 140.93
2 269.553046 04.665336 103.80 162.06
3 269.567785 04.688742 066.28 224.95

```

První sloupec dat je pořadové číslo srovnávací hvězdy. Potom dle sloupců zleva doprava jsou čísla hvězd, rektascenze, deklinace, astrografická souřadnice x a astrografická souřadnice y srovnávacích hvězd. Čísla uvádíme ve stupních.

Kapitola 4

Zpracování měření

Nyní máme již potřebné teoretické znalosti pro praktickou astrometrii CCD snímků. Hlavním úkolem mé práce bude srovnání spočtených rovníkových souřadnic vybraných planetek pro různé katalogy. Tedy, pro každou planetku budou spočteny její rovníkové souřadnice s tím, že rovníkové souřadnice srovnávacích hvězd budou brány postupně z různých katalogů. Výsledky pro dané katalogy budou shrnuty v této kapitole. Byly užity katalogy USNO-A2.0, USNO-B1.0 a GSC 2.3 a boxy pro astrometrii postupně o rozměrech 5x5, 7x7 a 9x9 pixelů. Každá planetka byla změřena ve dvou různých časech.

4.1 Pozorovací technika

Všechny snímky v této práci byly pořízeny v Brně na observatoři na Kraví hoře. Byl použit univerzitní Newtonův reflektor o průměru zrcadla 0,62 m s ohniskovou vzdáleností 2,78 m. Jako detektor signálu byla užita CCD kamera SBIG ST-8 s čipem KAF-1600. Dalekohled byl ovládán počítačem pomocí programů vyvinutých Filipem Hrochem. Jedná se o programy Xmove a NightView.

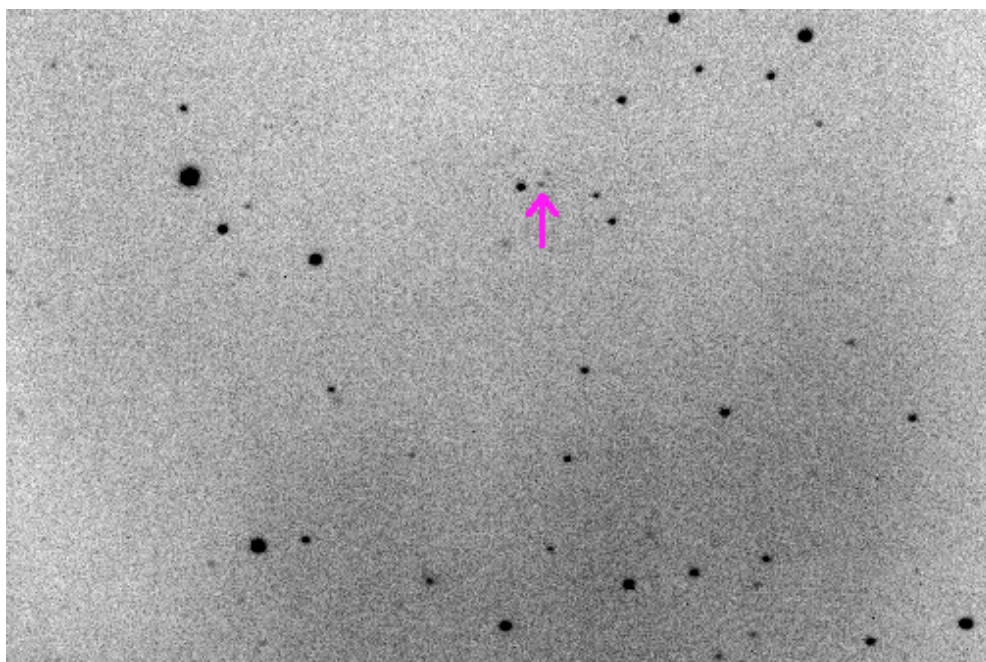
4.2 Ošetření snímků

Nejprve byly pořízeny surové snímky. Tyto snímky jsou zatíženy šumem, jehož původcem je termoeemise elektronů v CCD čipu. Čím nižší teplota kamery je, tím menšího šumu dosáhneme. Tohoto šumu je třeba se zbavit. Pro tento účel byl pořízen temný snímek (dark frame) o stejné délce expozice jako následný světlý snímek. Odečtením temného snímku od původního surového snímku se tohoto nežádoucího šumu zbavíme. Dalšími

vadami může být kupříkladu difrakce na zrnech prachu usazeném v optickém systému dalekohledu či rozdílná citlivost pixelů CCD detektoru. Jde o obraz rovnoměrné světlé plochy (flat field).

4.3 Planetka (145656)

První pozorovaná planetka nese označení (145656). Na obrázku je označena šipkou. Pro výpočet byl užit výše uvedený výpočetní skript. Pro astrometrii CCD snímku a zjištění



Obrázek 4.1: Poloha studované planetky (145656), exp. 120s, 12.4.2007, 22:53:44 UT, Brno

astrografických souřadnic jsem použil volně šiřitelný program Gaia. Výsledky astrometrie planetky shrnují tabulky (4.1), (4.2). U všech měření jsem vybral 20 srovnávacích hvězd.

Datum: 12.04.2007, Čas: 22:53:44 UT, Exp. = 120 s						
	USNO-A2.0		USNO-B1.0		GSC 2.3	
Box	α [hh:mm:ss]	δ [°:':"]	α [hh:mm:ss]	δ [°:':"]	α [hh:mm:ss]	δ [°:':"]
5x5	13:58:14,04	+3:36:07,1	13:58:14,03	+3:36:06,8	13:58:14,02	+3:36:06,6
7x7	13:58:14,03	+3:36:07,7	13:58:14,02	+3:36:07,4	13:58:14,01	+3:36:07,2
9x9	13:58:13,96	+3:36:08,1	13:58:13,95	+3:36:07,9	13:58:13,94	+3:36:07,6

Tabulka 4.1: Spočtené rovníkové souřadnice (II. druhu) planetky (145656)

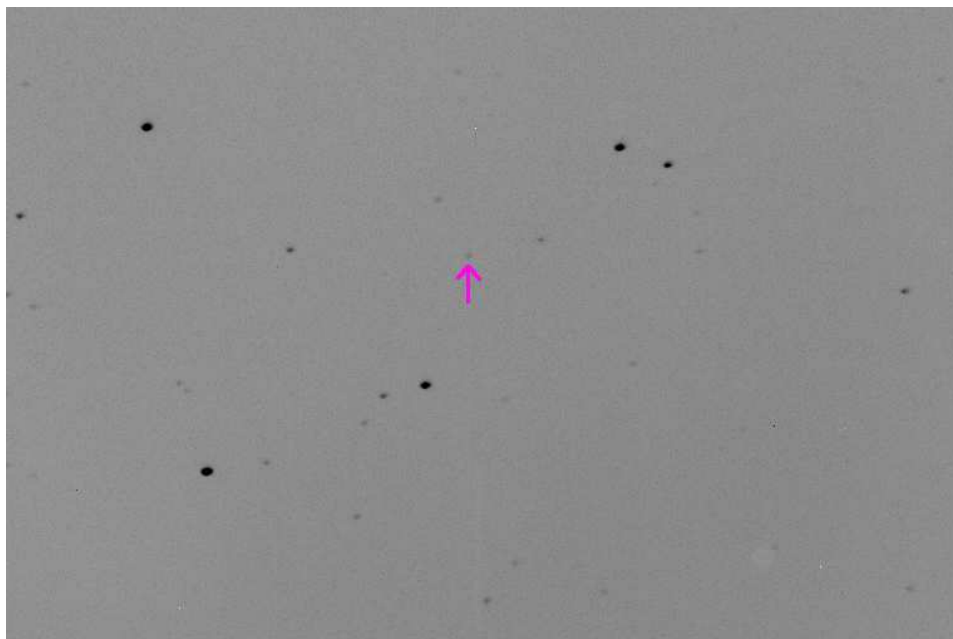
Poznamenejme, že časy odpovídají času v polovině expozice.

Datum: 12.04.2007, Čas: 23:05:50 UT, Exp. = 120 s						
	USNO-A2.0		USNO-B1.0		GSC 2.3	
Box	α [hh:mm:ss]	δ [°:':"]	α [hh:mm:ss]	δ [°:':"]	α [hh:mm:ss]	δ [°:':"]
5x5	13:58:13,97	+3:36:22,5	13:58:13,97	+3:36:22,2	13:58:13,96	+3:36:22,0
7x7	13:58:13,93	+3:36:21,8	13:58:13,92	+3:36:21,5	13:58:13,91	+3:36:21,4
9x9	13:58:13,90	+3:36:22,1	13:58:13,89	+3:36:21,8	13:58:13,88	+3:36:21,6

Tabulka 4.2: Spočtené rovníkové souřadnice (II. druhu) planetky (145656)

4.4 Planetka (152895)

Planetka (152895) byla opět pozorována ve dvou různých časech a je vyznačena na obrázku (4.2). Obrázky planetek byly zpracovány volně šířitelným programem Iris. Výsledky astrometrie planetky (152895) jsou shrnuty v tabulkách (4.3) a (4.4) na následující stránce. Ze snímku je vidět, jak málo jasná planetka při pozorování byla. To nám však pro zjištění jejich astrografických souřadnic příliš nevádí.



Obrázek 4.2: Poloha studované planetky (152895), exp. 120s, 12.4.2007, 20:01:32 UT, Brno

Datum: 12.04.2007, Čas: 20:46:50 UT, Exp. = 120 s						
	USNO-A2.0		USNO-B1.0		GSC 2.3	
Box	α [hh:mm:ss]	δ [°:':"]	α [hh:mm:ss]	δ [°:':"]	α [hh:mm:ss]	δ [°:':"]
5x5	11:02:35,01	+10:37:53,0	11:02:34,98	+10:37:52,5	11:02:34,99	+10:37:52,5
7x7	11:02:35,04	+10:37:53,9	11:02:35,01	+10:37:53,4	11:02:35,02	+10:37:53,3
9x9	11:02:35,04	+10:37:53,9	11:02:35,00	+10:37:53,4	11:02:35,01	+10:37:53,3

Tabulka 4.3: Spočtené rovníkové souřadnice (II. druhu) planety (152895)

Datum: 12.04.2007, Čas: 20:01:32 UT, Exp. = 120 s						
	USNO-A2.0		USNO-B1.0		GSC 2.3	
Box	α [hh:mm:ss]	δ [°:':"]	α [hh:mm:ss]	δ [°:':"]	α [hh:mm:ss]	δ [°:':"]
5x5	11:02:31,39	+10:38:52,4	11:02:31,36	+10:38:51,9	11:02:31,36	+10:38:51,9
7x7	11:02:31,38	+10:38:52,6	11:02:31,35	+10:38:52,1	11:02:31,35	+10:38:52,0
9x9	11:02:31,37	+10:38:52,7	11:02:31,34	+10:38:52,1	11:02:31,34	+10:38:52,1

Tabulka 4.4: Spočtené rovníkové souřadnice (II. druhu) planety (152895)

4.5 Analýza O-C

Analýzou O-C rozumíme rozdíl v napozorovaných a teoreticky spočtených souřadnicích planety (observations-computations). Teoreticky spočtená data vychází z [15]. Jsou počítána ze všech dostupných a správných měření vybrané planety po světě. I naše data posloužila tomuto účelu a z [15] jsem obdržel následující tabulku.

Planetka	Čas [r/m/den UT]	α [hh:mm:ss]	α_{O-C} ["]	δ [°:':"]	δ_{O-C} ["]
(152895)	2007/04/12.83440	11:02:31,38	0,416	+10:38:52,6	0,502
(152895)	2007/04/12.86586	11:02:35,04	-0,046	+10:37:53,9	0,516
(145656)	2007/04/12.95398	13:58:14,03	0,247	+3:36:07,7	-0,116
(145656)	2007/04/12.96238	13:58:13,93	0,386	+3:36:21,8	-0,121

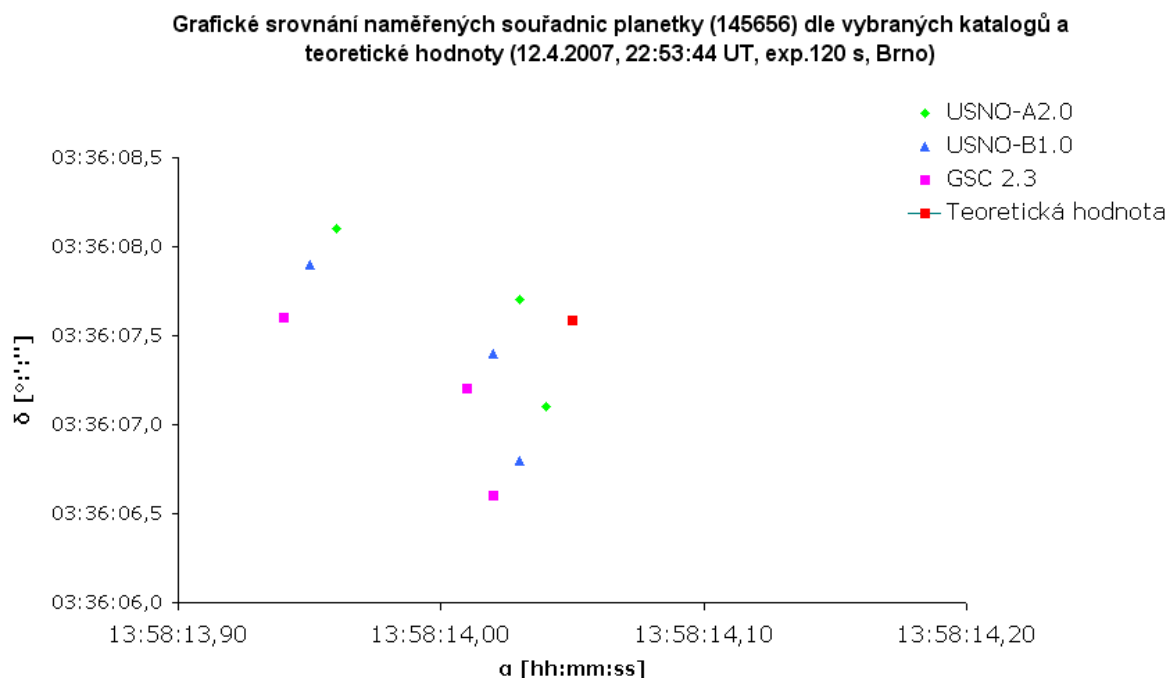
Tabulka 4.5: Odchyly od teoretických hodnot, použitý katalog USNO-A2.0, box 7x7

Poznamenejme, že do [15] byla ke zpracování poslána data vycházející z katalogu USNO-A2.0 a boxu 7x7 pixelů. Z reziduí O-C potom již snadno spočteme teoretické souřadnice planetek pro daný čas pozorování. Vše pak bude přehledně zpracováno v grafech níže. Teoreticky spočtené hodnoty α_T a δ_T jsou v tabulce (4.6).

Planetka	Čas [r/m/den UT]	α_T [hh:mm:ss]	δ_T [°:':"]
(152895)	2007/04/12.83440	11:02:31,41	+10:38:53,102
(152895)	2007/04/12.86586	11:02:35,04	+10:37:54,416
(145656)	2007/04/12.95398	13:58:14,05	+3:36:07,584
(145656)	2007/04/12.96238	13:58:13,96	+3:36:21,679

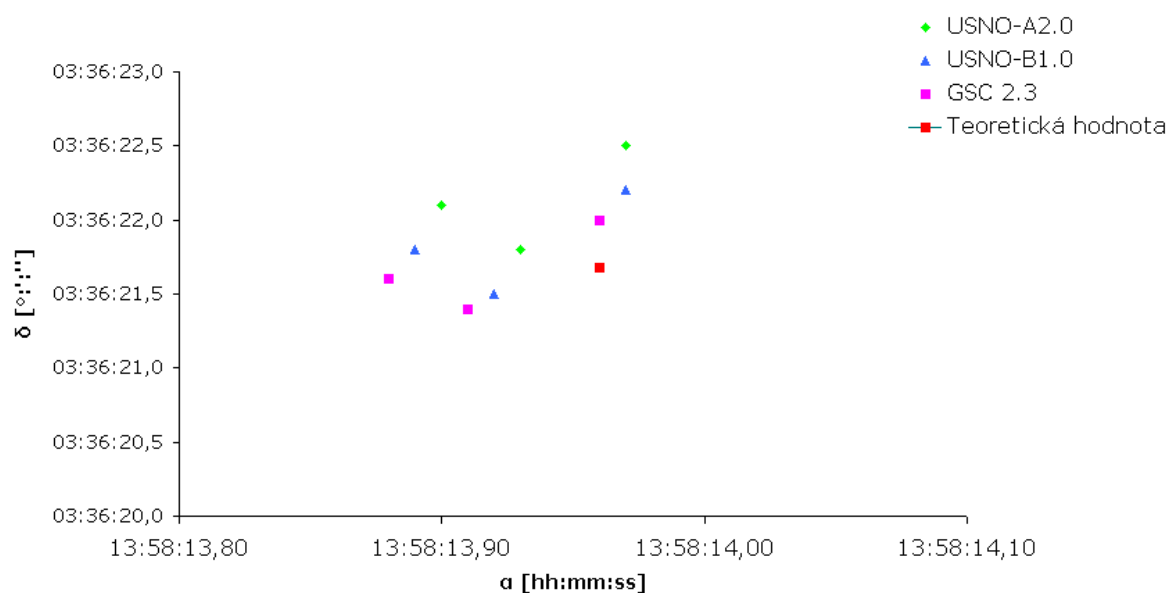
Tabulka 4.6: Teoretické souřadnice planetek

V následujících grafech jsou vyneseny spočtené rovníkové souřadnice (II. druhu) planetek pro vybrané katalogy a pozorovací čas. Společně s těmito hodnotami byla vynesena i hodnota teoretická příslušející dané planetce v uvedený čas měření. Kvůli přehlednosti nebyly body odpovídající jednotlivým boxům odlišovány. Snadno je však odhalíme nahlednutím do příslušné tabulky. Poznamenejme, že teoretická hodnota polohy planetky se vztahuje k času začátku expozice, ke kterému je připočtena polovina délky expozice. Ve vybraných grafech je vidět, jak některé body z různých katalogů splývají v bod jediný. To jest dáno velmi malou odchylkou v měření od různých katalogů. Nyní tedy následují již slíbené grafy.



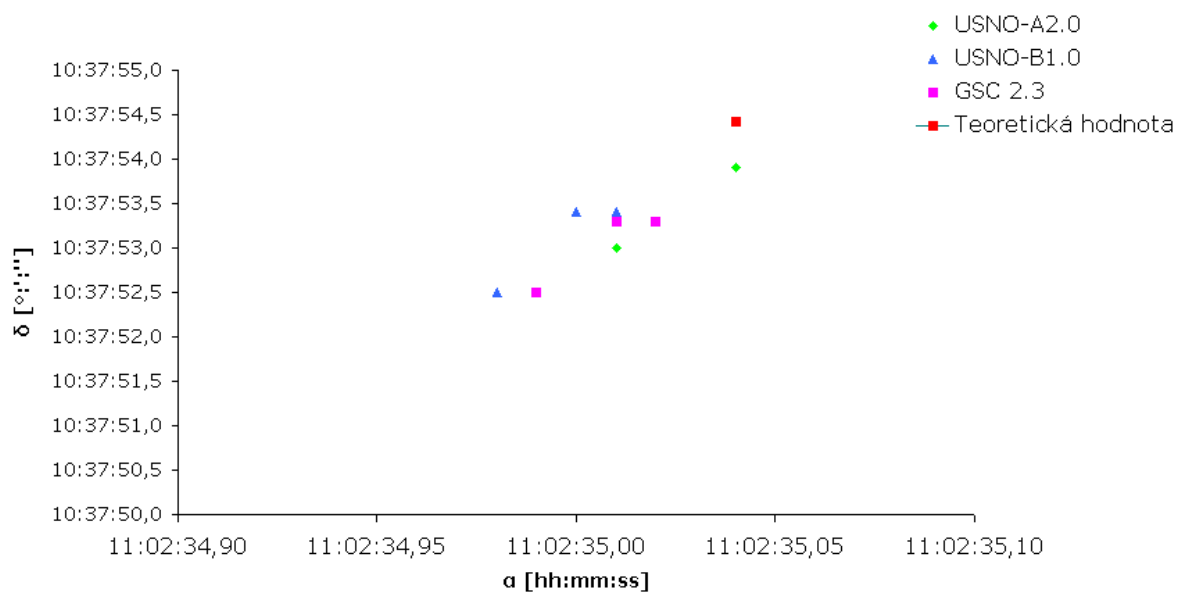
Obrázek 4.3: Data odpovídající tabulce (4.1)

Grafické srovnání naměřených souřadnic planety (145656) dle vybraných katalogů a teoretické hodnoty (12.4.2007, 23:05:50 UT, exp.120 s, Brno)



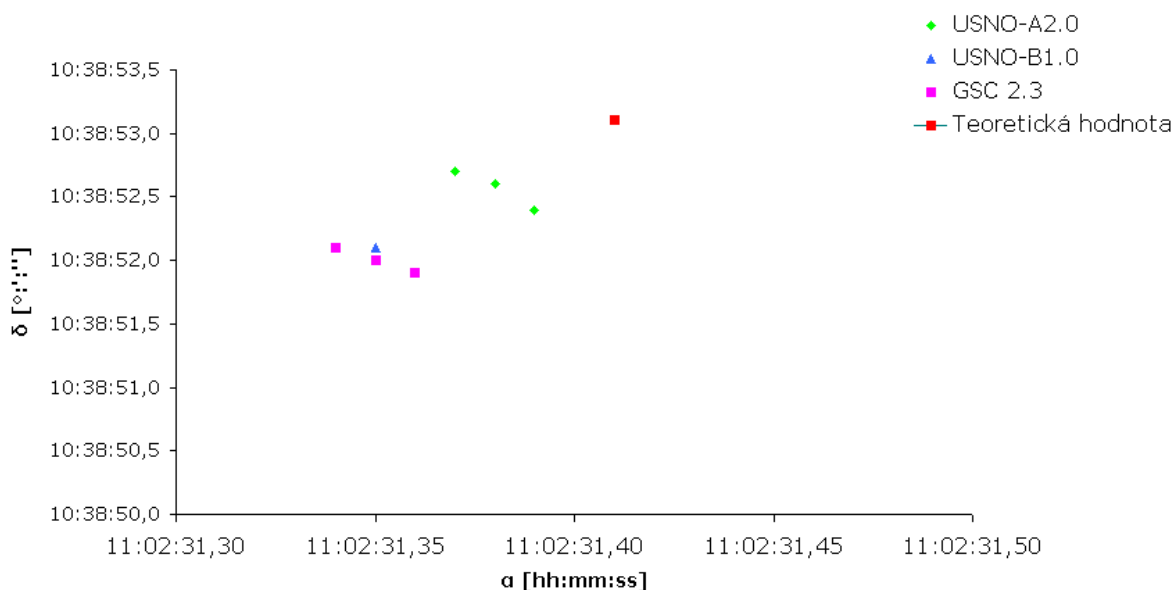
Obrázek 4.4: Data odpovídající tabulce (4.2)

Grafické srovnání naměřených souřadnic planety (152895) dle vybraných katalogů a teoretické hodnoty (12.4.2007, 20:46:50 UT, exp.120 s, Brno)



Obrázek 4.5: Data odpovídající tabulce (4.3)

Grafické srovnání naměřených souřadnic planety (152895) dle vybraných katalogů a teoretické hodnoty (12.4.2007, 20:01:32 UT, exp.120 s, Brno)



Obrázek 4.6: Data odpovídající tabulce (4.4)

Nyní přistoupíme k numerickému výpočtu, jež nám napomůže nahlédnout, jak si při našich pozorováních vedly katalogy USNO-A2.0, USNO-B1.0 a GSC 2.3. Postup byl v principu takový, že se spočítal součet vzdáleností bodů příslušejících danému katalogu od teoretické hodnoty. Data vycházející z katalogu, pro něž tento součet bude nejmenší, se pak nejlépe přimykají k teoretické hodnotě. Poznamenejme, že se při výpočtech převáděla rektascenze na stejné jednotky v nichž je uvedena deklinace. Vzdálenosti bodů pro daný katalog od teoretické hodnoty budou tedy v jednotkách úhlových vteřin. Výsledky shrnuje tabulka (4.7).

		USNO-A2.0	USNO-B1.0	GSC 2.3
Planetka	Čas [r/m/den UT]	$\sum_{i=1}^3 d_i ["]$	$\sum_{i=1}^3 d_i ["]$	$\sum_{i=1}^3 d_i ["]$
(152895)	2007/04/12.83440	2,160	4,215	4,291
(152895)	2007/04/12.86586	2,518	4,408	4,417
(145656)	2007/04/12.95398	2,274	2,859	3,445
(145656)	2007/04/12.96238	2,294	2,225	2,324

Tabulka 4.7: Součet odchylek souřadnic od teoretických hodnot

Závěr

V této práci jsem se zabýval studiem a následnou analýzou poloh planetek (145656) a (152895) na nebeské sféře. K tomu jsem použil teorii vycházející z měření poloh známých referenčních hvězd na snímku. Výsledky teorie astrometrie, jak se tento obor astronomie nazývá, matematicky převádí známé polohy objektů na snímku či fotografické desce na souřadnice rovníkové (II.druhu). Nutnou podmínkou pro určení souřadnic neznámého objektu je již výše zmiňovaná znalost souřadnic opěrných bodů snímku, jimiž jsou hvězdy.

Ze znalosti jejich poloh a postupů, které jsou v práci podrobně rozebrány, můžeme následně zjistit rovníkové souřadnice (II. druhu) vybraného objektu na snímku. Polohy hvězd jsou shrnuty ve hvězdných katalozích. Každý katalog však udává pro jednu a tu stejnou hvězdu poněkud rozdílné souřadnice, neboť jednotlivé hvězdné katalogy při své tvorbě vycházely kupříkladu z jiných pozorování, čítají méně či více hvězd, jsou omezeny hvězdnou velikostí, apod.

Já jsem se v práci zaměřil na to, který z katalogů se pro má měření nejvíce přibližuje k teoretickým hodnotám, resp., referenčním hvězdám jsem přiřadil souřadnice dle tří mnou vybraných katalogů a studoval jsem odchylky spočtených poloh od hodnoty teoretické. Ke studiu byly vybrány katalogy USNO-A2.0, USNO-B1.0 a GSC 2.3.

Ke zpracování byly pořízeny ke každé z planetek dva snímky v různých časech. Při analýze jsem bral v úvahu i velikost boxu, ze kterého se teoreticky počítá na snímku střed hvězdy. Byly užity boxy o velikosti 5x5, 7x7 a 9x9 pixelů.

Mnou spočtená data byla poté Milošem Tichým poslána do [8] a [15] ke zpracování společně s dalšími již staršími pozorováními jiných observatoří. Data byla vyhodnocena jako správná a zahrnuta do statistiky. Obratem nám byla poskytnuta odchylka našich měření od teoretické polohy.

V grafech v poslední kapitole jsou pak vyneseny spočtené souřadnice pro každý katalog a teoretická souřadnice planety. Abychom zjistili, který katalog si při astrometrii vedl nejlépe, postupoval jsem takovým způsobem, že jsem pro každý graf spočetl součet vzdáleností bodů, příslušejících danému katalogu, od teoretické hodnoty. Ze závěrečné tabulky (4.7) je vidět, že nejlépe si vedl katalog USNO-A2.0, poté katalog USNO-B1.0 a nejhůře dopadl katalog GSC 2.3. Tento výsledek je však na první pohled v rozporu s tím, který ze tří zmiňovaných katalogů má nejmenší astrometrickou chybu.

Tím je USNO-B1.0. Na tomto místě je však důležité zmínit, že dráhové elementy získané z NeoDys jsou spočteny na základě astrometrie dělané převážně s použitím USNO-A2.0. Díky tomuto poznatku můžeme obhájit výše uvedené výsledky.

Je třeba však výsledky brát jako výsledky orientační, neboť pro pořádnou analýzu by bylo třeba mít opravdu velmi velké množství pozorování ve velmi kvalitních pozorovacích podmínkách. I tak jsou ale odchylky vybraných katalogů v řádech jednotek úhlových vteřin, což s přihlédnutím k seeingu na observatoři, kde byla data získána, hraje poměrně zanedbatelnou roli.

Literatura

- [1] Blažko S. N.: Praktická astronomie, český překlad Holub S., Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1956.
- [2] Hroch F.: Studijní materiály k předmětu astronomické praktikum, Brno 2006.
<http://www.physics.muni.cz/~hroch/apraktik.pdf>
- [3] Hyna I., Partl H., Oetiker T., Schlegl E., Kočer M., Sýkora P.:
Ne příliš stručný úvod do systému Latex (cz-0.9 - Beta), 1998.
<http://www.penguin.cz/~kocer/texty/lshort2e/lshort2e-cz.pdf>
- [4] Kleczek J.: Velká encyklopedie vesmíru, Academia, Praha 2002.
- [5] Lomtadze L., Plch R.: Sázíme v Latexu diplomovou práci z matematiky, Brno 2003.
- [6] Long P. J. G.: Introduction to Octave, University of Cambridge 2005.
<http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/CD/engapps/octave/octavetut.pdf>
- [7] McAlister H. A.: Astrometry: Revealing the Other Two Dimensions of Velocity Space
<http://msc.caltech.edu/workshop/2005/presentations/McAlister.pdf>
- [8] Minor Planet Center: <http://cfa-www.harvard.edu/iau/mpc.html>
- [9] Procházka J.: Sférická astronomie, Naše vojsko, Praha 1953.
- [10] Smart W. M.: Textbook on Spherical Astronomy (Sixth Edition), revised by Green R. M., Cambridge University Press, 1977.
- [11] Taff L. G.: Computational Spherical Astronomy, J. Wiley and Sons, New York 1981.
- [12] Vanýsek V.: Základy astronomie a astrofyziky, Academia, Praha 1980.
- [13] <http://www.astrometry.org>

[14] <http://cs.wikipedia.org/wiki/CCD>

[15] <http://newton.dm.unipi.it/cgi-bin/neodys/neoibo?sites:616> (data z NeoDys).

[16] <http://www.cfa.harvard.edu/mpec/K07/K07J48.html>

[17] <http://www.octave.cz>

[18] <http://www.planetky.cz>

Tato bakalářská práce byla vysázena typografickým systémem Latex.