VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV GEODÉZIE

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF GEODESY

TESTOVÁNÍ SYSTÉMU PRO ASTRONOMICKÉ URČOVÁNÍ POLOHY MAAS-1

TESTING OF ASTRONOMICAL POSITION SYSTEM MAAS-1

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. CHRISTIAN KREMSER
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. RADOVAN MACHOTKA, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2013

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3646 Geodézie a kartografie
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3646T003 Geodézie a kartografie
Pracoviště	Ústav geodézie

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Kremser Christian
Název	Testování systému pro astronomické určování polohy MAAS-1
Vedoucí diplomové práce	Ing. Radovan Machotka, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	30. 11. 2012
Datum odevzdání diplomové práce	24. 5. 2013

V Brně dne 30. 11. 2012

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ Fakulta stavební DĚKANAT

.....	.....
doc. Ing. Josef Weigel, CSc.	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Vedoucí ústavu	Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

KABELÁČ, J., KOSTELECKÝ J.: Geodetická astronomie 10, Praha 1998
MACHOTKA, R., Určování astronomických souřadnic - Metoda párů stejné výšky, Geodetický a kartografický obzor, Vesmír, Praha, 2005
MACHOTKA, R.; VONDRÁK, J., Využití motorizované totální stanice pro automatizaci astronomických měření, Geodetický a kartografický obzor, Vesmír, Praha, 2009
JALOVECKÝ, M.; Analýza přesnosti výsledků astronomického určení polohy. Diplomová práce. Brno, 2011.

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Proveďte staniční testování Mobilního automatizovaného astronomického systému č. 1 (MAAS-1). Simulujte terénní měření a vyhodnoťte přesnost či přesněji řečeno opakovatelnost výsledků měření. Vyhodnoťte také vliv nestability CCD snímače na výsledky.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....

Ing. Radovan Machotka, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá testováním astronomického měřícího systému MAAS-1, který byl vyvinut na Ústavu geodézie Fakulty stavební VUT v Brně. Během tohoto testování bylo provedeno několik referenčních měření na terase budovy B Fakulty stavební VUT v Brně. Získaná data byla zpracována do podoby astronomických zeměpisných souřadnic φ a λ. Tyto souřadnice, společně s atmosférickými podmínkami a kalibračním měřením, tvoří podklad pro vyhodnocení. V rámci tohoto testování se snažím odhalit vliv konstrukce uchycení CCD snímače na přesnost finálních dat a posoudit, zda je třeba tuto konstrukci upravit.

Abstract

This thesis deals with testing of astronomical measurement system MAAS-1, which was developed at the Institute of Geodesy, Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology. Several reference measurements were done on the terrace of B building Faculty of Civil Engineering during this testing. The data obtained were processed into astronomical geographic coordinates φ and λ. These coordinates, as well as atmospheric conditions and calibration measurements, are basis for evaluation. In this test I try to detect the influence of the CCD sensor mounting of the accuracy on the final data and to assess if the construction needs to be modified.

Klíčová slova

Geodetická astronomie, astronomická zeměpisná šířka, astronomická zeměpisná délka, kalibrace, CCD snímač, záměrná přímka, atmosférické podmínky.

Keywords

Geodetic astronomy, astronomical latitude, astronomical longitude, calibration, CCD sensor, line of sight, atmospheric conditions.

Bibliografická citace VŠKP

KREMSER, Christian. *Testování systému pro astronomické určování polohy MAAS-1.* Brno, 2013. 60 s., 12 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce Ing. Radovan Machotka, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 20. 5. 2013

……

podpis autora

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu diplomové práce Ing. Radovanu Machotkovi, Ph.D. za trpělivost při školení a jeho cenné rady a připomínky. Díky patří také mým blízkým za vytvoření vhodného zázemí při studiu.

V Brně, dne 20. května 2013

OBSAH

1 ÚVOD 8

2 HISTORICKÝ VÝVOJ GEODETICKÉ ASTRONOMIE A JEJÍ APLIKACE 9

2.1 ANALOGOVÉ SYSTÉMY 9
2.2 DIGITÁLNÍ SYSTÉMY 10
2.3 APLIKACE GEODETICKÉ ASTRONOMIE V PRAXI 12

3 METODY MĚŘENÍ ASTRONOMICKÝCH ZEMĚPISNÝCH SOUŘADNIC 14

3.1 URČENÍ POLOHY ZENITU Z POMOCÍ VODOROVNÝCH SMĚRŮ 15
3.2 URČENÍ POLOHY ZENITU Z POMOCÍ ZENITOVÝCH VZDÁLENOSTÍ 15
3.3 VLIV NÁHODNÝCH A SYSTEMATICKÝCH CHYB 16
3.3.1 Systematické chyby u metod využívajících horizontálních směrů 16
3.3.2 Systematické chyby u metod využívajících zenitových úhlů 17

4 SYSTÉM PRO ASTRONOMICKÉ URČOVÁNÍ POLOHY MAAS - 1 19

4.1 METODA PÁRŮ STEJNÉ VÝŠKY 19
4.1.1 Popis metody 19
4.1.2 Podmínky pro výběr hvězdných párů 20
4.2 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ MAAS - 1 21

5 URČENÍ POLOHY ZÁMĚRNÉ PŘÍMKY NA SNÍMKU 24

5.1 TESTOVACÍ MĚŘENÍ 24
5.2 VYHODNOCENÍ SNÍMKŮ 25

6 MĚŘENÍ 28

6.1 LOKALITA 28
6.2 POZOROVACÍ PROGRAM 29
6.3 URČENÍ POLOHY ZÁMĚRNÉ PŘÍMKY NA SNÍMKU 30
6.4 MĚŘENÍ HVĚZDNÝCH PÁRŮ 30
6.5 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT 32

7 VLIV ZMĚNY POLOHY CCD SNÍMAČE NA OPAKOVATELNOST VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ 34

7.1 MECHANICKÉ VLIVY 34
7.1.1 Střední chyby 40
7.2 VLIVY ATMOSFÉRICKÝCH PODMÍNEK NA ZMĚNU POLOHY ZÁMĚRNÉ PŘÍMKY 41
7.2.1 Vliv tlaku 42
7.2.2 Vliv teploty 45
7.2.3 Vliv rychlosti větru 48

8 ZÁVĚR 51

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A LITERATURY 53

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ 55

11 SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ 58

12 SEZNAM TIŠTĚNÝCH A ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH 60

1 ÚVOD

Historicky bylo na našem území započato s měřením astronomických zeměpisných souřadnic a azimutů již v roce 1863, při tvorbě Astronomicko-geodetické sítě (AGS). Měření zeměpisné délky, vztažená k základnímu poledníku, byla všeobecně započata až v období existence rádiových časových signálů. K určení obou souřadnic byl používán astronomický univerzál Sterneckův, pasážník Secretán a cirkumzenitál. Od roku 1947 astronomický univerzál Wild T4 a od 70. let analogové zenitové kamery. [1]

Na začátku 90. let, s vývojem družicových systémů, klesla potřeba geodetické astronomie a tím i vývoj přístrojového vybavení. Kontrolu nad podstatnou částí úkolů, které do té doby spadaly téměř výhradně do tohoto podoboru astronomie, převzaly již zmíněné družicové systémy.

S vynálezem CCD (Charge-Coupled Device) snímače, a tím nahrazení analogové fotografie digitální, přichází revoluční změna jak v postupech měření, tak ve zpracování. Příkladem vývoje mohou být Institut für Erdmessung, University of Hannover a Geodesy and Geodynamics Laboratory, ETH Zürich, kde přepracovali již existující analogové zenitové kamery na digitální. Tyto systémy dosahují vysoké přesnosti, jejich konstrukce jsou ale velice nákladné a velikost omezuje mobilitu. [2]

Ústav geodézie Fakulty stavební VUT v Brně nezůstává v tomto vývoji nikterak pozadu. Pod vedením Ing. Radovana Machotky Ph.D. zde byl zkonstruován Mobilní automatizovaný astronomický systém - 1 (MAAS-1), který umožňuje měření astronomických zeměpisných souřadnic s použitím CCD snímače. V průběhu let byl systém zdokonalován a testován na nejrůznější činitele ovlivňující jeho přesnost.

S ohledem na to, že se s podobným systémem v běžné geodetické praxi téměř nesetkáme, věnuji pozornost také popisu jednotlivých částí systému včetně programového vybavení.

Cílem této práce je odhalit, zda se konstrukce upevnění kamery nesoucí CCD snímač pohybuje, určit zda tyto rušivé pohyby mají vliv na opakovatelnost výsledků měření a jsou-li ovlivněny teplotní roztažností materiálů konstrukce. K tomuto účelu bylo provedeno několik testovacích měření na terase budovy B areálu VUT FAST.

2 HISTORICKÝ VÝVOJ GEODETICKÉ ASTRONOMIE A JEJÍ APLIKACE

Geodetická astronomie (GA) je podle [1] jedním z podoborů astronomie, který slouží geodézii. Spadá do tzv. poziční astronomie a jejím obsahem je popis, teorie a použití přístrojů a metod pro zjišťování astronomického azimutu a astronomických zeměpisných souřadnic. Přibližně do poloviny minulého století byla GA jedinou disciplínou, která umožňovala určení astronomické zeměpisné délky a šířky vzhledem ke globálnímu souřadnicovému systému. Sloužila k námořní navigaci, podílela se na stanovení rozměrů Země a umožňovala například orientaci geodetických sítí a sledování parametrů orientace Země. S vývojem družicových navigačních systémů (GPS, Glonass, atd.) byla výrazná část úkolů GA převzata právě těmito technikami. Při určování parametrů orientace Země byly optické astronomické metody do konce 90. let 20. století nahrazeny prostorovými geodetickými technikami (VLBI, SLR, LLR a GPS). [2]

2.1 Analogové systémy

Mezi první přístroje speciálně vyvinuté pro potřeby určování zeměpisných souřadnic můžeme řadit Astroláb (150 př. n. l.) nebo Sextant, který byl používán již před 200 lety k námořní navigaci. Společně s technologickým pokrokem procházely vývojem i přístroje pro měření astronomických zeměpisných souřadnic.

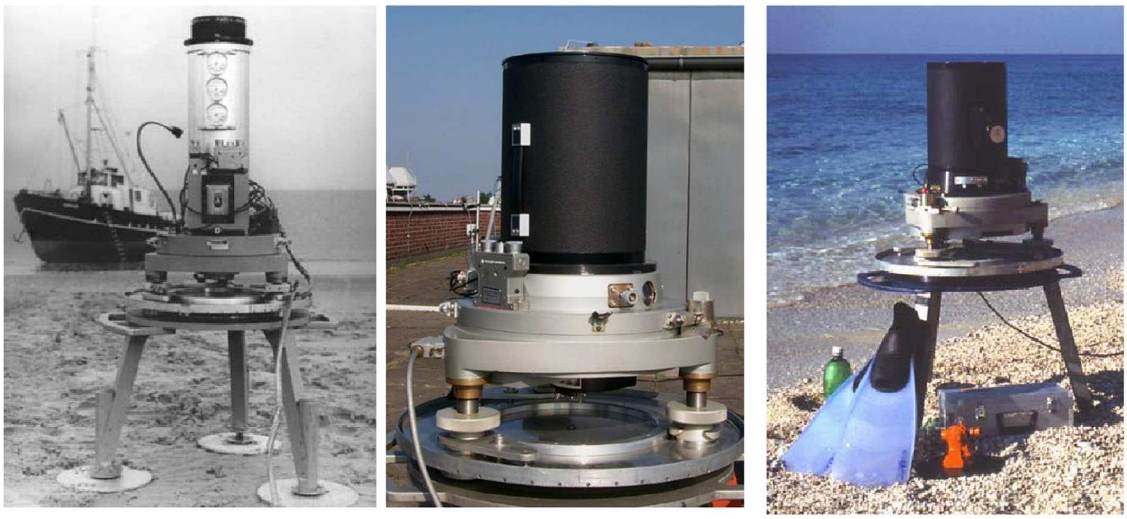
Dříve než byly k dispozici přesné teodolity se skleněnými kruhy, používaly se pro měření v AGS upravené astronomické univerzály s kovovými kruhy. Pro práce nižší přesnosti se daly využít i teodolity z běžné geodetické praxe, vybavené speciálními přídavnými zařízeními.

V posledních desetiletích byly vyvinuty pro účely měření v GA speciální přístroje. Jejich příkladem mohou být astronomický univerzál Wild T4, Kern DKM 3-A nebo astronomický univerzál Zeiss Theo 003. Přesností vyhovovaly podmínkám pro zjišťování astronomických azimutů a souřadnic na bodech I. řádu AGS. [1]

V 70. letech 20. století došlo k dalšímu zdokonalení nasazením přenosných fotografických zenitových kamer. Mezi tyto konstrukce řadíme například zenitové kamery

TZK1, 2 a 3, viz Obr. 2.1, které byly navrženy a sestaveny na Univerzitě v Hannoveru. Díky plné automatizaci registrace expozice epoch byl do značné míry odstraněn vliv osobních chyb měřiče. Navíc se ve srovnání s klasickými metodami výrazně zrychlil a zjednodušil postup pozorování.

Nevýhody zenitových kamer, ve srovnání se současným vývojem, byly zejména ve způsobu získání souřadnic hvězdy. Toto zpracování bylo provedeno ručně, nebo částečně automatizovaně pomocí komparátoru. Doba strávená nad zpracováním jedné stanice byla 3-5 hodin a vyžadovala proškolenou obsluhu. Díky tomu byly náklady na měření vysoké. S rostoucím počtem dostupných družicových dat v 90. letech význam těchto systémů klesá. [2]



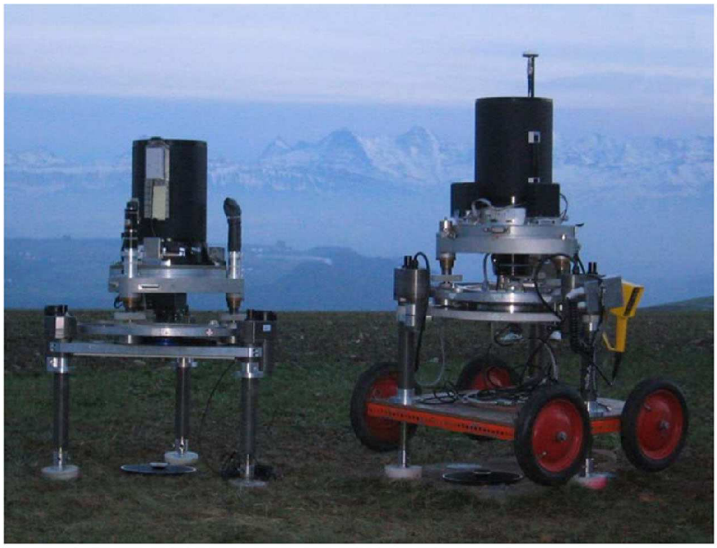
Obr. 2.1 Zenitové kamery TZK 1, 2, 3 [2]

2.2 Digitální systémy

Na začátku 21. století proběhla v GA výrazná technologická změna. Využití senzorů CCD v digitální fotografii zvýšilo míru automatizace, účinnost a přesnost metod GA pro zjišťování zeměpisných souřadnic.

Mezi prvními plně funkčními systémy s CCD senzory byly přepracované analogové zenitové kamery TZK2 a TZK3. Na Institut für Erdmessung, University of Hannover vznikl přístroj s názvem Transportable Zenit-kamera 2 – Digitalsystem (TZK2-D). Geodesy and Geodynamics Laboratory, ETH Zürich vytvořila vlastní systém s názvem Digital Astronomical Deflection Measuring System (DIADEM). Znázorněny jsou na Obr. 2.2. U obou systémů jsou použity zenitové kamery o průměru vstupní apertury

20 cm s citlivým CCD senzorem, který dokáže zachytit i velmi slabé hvězdy (14mag). Tato citlivost je nutná z důvodu záběru jen velmi malé částí hvězdné oblohy. Přesnost jejich měření je udávaná v rozmezí 0,05-0,1´´. Vývoj podobných digitálních zenitových kamerových systémů probíhal paralelně i jinde ve světě.



Obr 2.2 Digitální zenitové kamerové systémy DIADEM a TZK2-D

Digitální zenitové kamery nejsou jediným způsobem konstrukce přístrojů s CCD snímačem pro určování astronomických zeměpisných souřadnic. Na univerzitě v Curychu byl vyvinut systém ICARUS, který umožňuje téměř plně automatizované měření. Na podobném principu je založen i MAAS-1, který je podrobněji popisován v kapitole 4.

Zařízení ICARUS se skládá z motorizované totální stanice TCA 1800 Leica Geosystem, malého GPS přijímače pro načasování a určení polohy, polního počítače a online softwaru ICARUS/AZIMUT pro zpracování. Po orientaci přístroje se dalekohled automaticky natáčí ke hvězdám. Poslední projekty jsou zaměřeny na náhradu lidského oka CCD snímačem. Výhodou tohoto systému je jeho větší mobilnost a běžně dosažitelná technologická náročnost jednotlivých komponentů systému. Díky automatickému natáčení dalekohledu směrem k měřené hvězdě není přístroj omezen jen na určitou část hvězdné oblohy a k měření lze používat jasnější hvězdy (5-6mag). Nároky na optickou soustavu systému nejsou tedy tak vysoké a lze použít běžně dostupnou totální stanici. Při observaci je potřeba měřit zenitové úhly na hvězdy v párech, což zvětšuje potřebný volný obzor a snižuje přesnost měření. Udávaná přesnost systému ICARUS je 0,5´´. [2]

2.3 Aplikace geodetické astronomie v praxi

V řadě výzkumných oblastí, jako jsou např. geodézie, geofyzika, hydrologie atd., je potřeba znát přesné polohové i výškové souřadnice. Tyto souřadnice bývají nejčastěji obstarávány metodami GNSS (Global Navigation Satellite System) a jsou doplňovány o metody klasické geodézie, které však např. u výšek poskytují údaje v návaznosti na kvazigeoid. Metody GA lze využít nejen při určování astronomických zeměpisných souřadnic a azimutů, ale i pro zjišťování velikosti tížnicových odchylek, které vede ke zpřesňování tvaru geoidu hlavně v horských oblastech. Pro aplikace, které vyžadují přesné informace o místním gravitačním poli, jako jsou např. vodohospodářství nebo geofyzikální průzkum, význam geodetické astronomie stoupá.

V následujících odstavcích krátce popisuji některé aplikace GA v posledních letech. Více informací o těchto i jiných projektech nalezneme např. ve [2] nebo [3].

Využití při tvorbě místních geodetických sítí

Při realizaci projektu Alp-Transit, jehož cílem je propojení hlavních evropských měst vysokorychlostním vlakem, byly využity metody GA. V nejsložitějším úseku celé trasy (57 km dlouhý tunel pod masivem St. Gotthard) byla potřeba, pro spolehlivé a bezpečné určení osy tunelu, detailní znalost průběhu geoidu a velikosti tížnicových odchylek. K měření v okolí pěti důležitých portálů tunelu byly využity společně digitální zenitové kamery DIADEM a TZK2-D. Při srovnání jednotlivých výsledků, byla zjištěna přesnost 0,1´´. K měření referenčního azimutu, sloužícího ke kalibraci přístrojů měřících v podzemí, zejména vysoce přesných gyroskopů, sloužil systém ICARUS. Opakovaná měření azimutu odhalila přesnost 0,5´´.

Nebeský systém určování polohy a námořní navigace

V současné době mají automatizované geodeticko astronomické systémy určování polohy poměrně velký vojenský význam v námořní navigaci. Díky své nezávislosti na GNSS může geodeticko astronomické určování polohy sloužit jako záloha v případě rušení nebo výpadku GNSS způsobených elektromagnetickými poruchami. Je vyvíjena

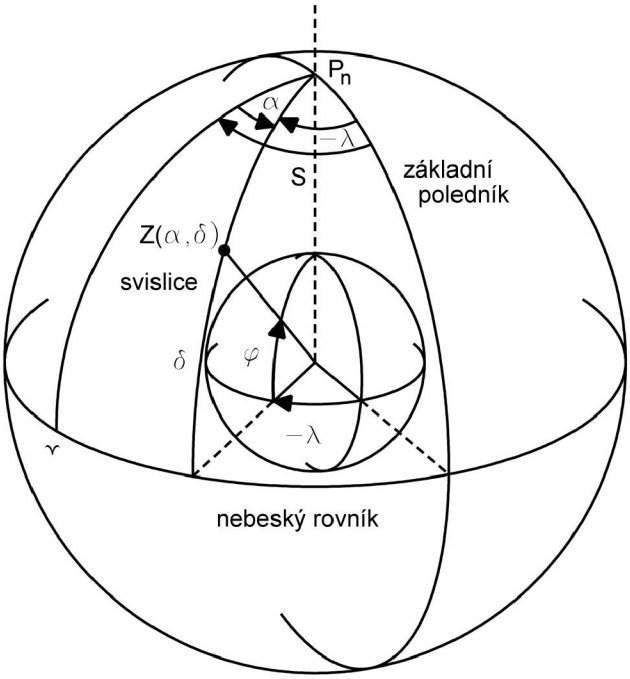
nová technologie s názvem SPACEI, od níž se očekává, že poskytne údaje o poloze na lodích a letadlech. Systém musí být vyvinut tak, aby ho bylo možné použít jak ve dne, tak v noci. Cílová přesnost by měla být 1´´.

Astronomicko-Geodeticko-Nivelační Experimentální Síť (AGNES)

Výsledné astronomické souřadnice (jsou vztaženy k místní tížnici) lze využít například pro výpočet astronomicko-geodetických tížnicových odchylek. Tížnicová odchylka je úhel mezi tížnicí a normálou k elipsoidu. Souřadnice měřené technologií GNSS jsou v systému ETRS, který využívá elipsoid GRS80, proto i tížnicové odchylky počítané jako rozdíl astronomických souřadnic a souřadnic určených technologií GNSS jsou vztaženy k tomuto elipsoidu. Z astronomických tížnicových odchylek lze dále astronomickou nivelací určit lokální model kvazigeoidu, což je vztažná plocha pro normální výšky (podle Moloděnského teorie výšek), které se u nás používají v rámci výškového systému Bpv. Kombinace použití technologie GNSS pro určení prostorové polohy bodů a lokálního modelu kvazigeoidu pro převod elipsoidických výšek na normální je výhodná, neboť není potřeba připojovat určované body nivelací, což může být v izolovaných lokalitách náročná geodetická úloha.

3 METODY MĚŘENÍ ASTRONOMICKÝCH ZEMĚPISNÝCH SOUŘADNIC

Cílem metod měření astronomických zeměpisných souřadnic je určení astronomické zeměpisné šířky φ a astronomické zeměpisné délky λ. Tyto souřadnice se zároveň dají popsat jako směr svislice t procházející stanoviskem vzhledem k souřadné soustavě, která je určena osou zemské rotace procházející pólem P_n a rovinou základního poledníku. [1]



Obr. 3.1 Určení zeměpisných souřadnic

Jak je patrné z Obr. 3.1, lze úlohu převést na určení rovníkových souřadnic α a δ zenitu Z v okamžiku S greenwichského hvězdného času pomocí jednoduchých vztahů.

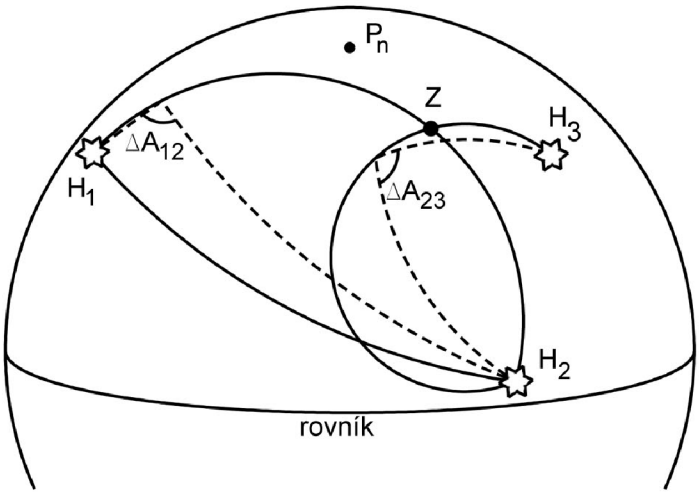
$$\varphi=\delta \tag{3.1}$$

$$\lambda=\alpha-S \tag{3.2}$$

Z rovnic *3.1* a *3.2* lze souřadnice φ a λ určit přímo, je však nutné znát polohu zenitu Z vůči pólu P_n a základnímu poledníku. Tento výpočet může proběhnout podle [1] nepřímo dvěma metodami:

- **pomocí vodorovných směrů a časů**
- **pomocí zenitových vzdáleností a časů**

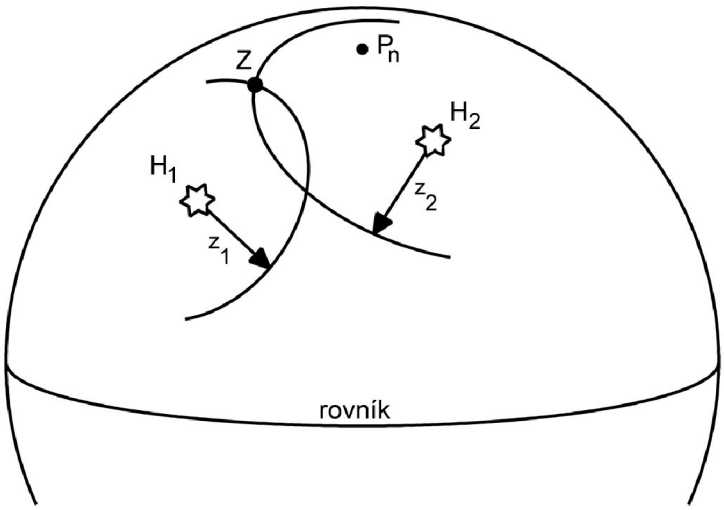
3.1 Určení polohy zenitu Z pomocí vodorovných směrů



Obr. 3.2 Určení polohy zenitu Z pomocí vodorovných směrů

Na daném stanovisku o zenitu *Z* měříme na tři hvězdy H_1, H_2, H_3. Z měření získáme rozdíly čtení vodorovného kruhu K_2-K_1 a K_3-K_2, které se rovnají rozdílům jejich astronomických azimutů ΔA_{12} a ΔA_{23}. Sestrojíme-li na jednotkové kouli nad spojnicemi H_1 - H_2 a H_2 - H_3 geometrická místa stejných úhlů ΔA_{12} a ΔA_{23}, pak se tato místa protínají v hledaném zenitu *Z*, viz Obr. 3.2.

3.2 Určení polohy zenitu Z pomocí zenitových vzdáleností



Obr. 3.3 Určení polohy zenitu *Z* pomocí zenitových vzdáleností

Promítneme-li hvězdy H_1 a H_2 o známých souřadnicích α_1, δ_1 a α_2, δ_2 na nebeskou sféru a z_1, z_2 jsou jejich zenitové vzdálenosti naměřené ze stanoviska o zenitu Z, pak tento zenit leží v průsečíku kružnic o poloměrech z_1 a z_2, opsaných kolem bodů H_1 a H_2 na jednotkové kouli, viz Obr. 3.3.

3.3 Vliv náhodných a systematických chyb

Náhodné a systematické chyby svými vlivy nepříznivě ovlivňují výsledky a přesnost měření. Náhodné chyby se z velkého souboru měření svým charakterem do značné míry samy eliminují. Vliv systematických chyb však není zanedbatelný, jejich eliminace je jedním ze zásadních předpokladů pro získání kvalitních výsledků.

Systematické chyby při astronomickém určování polohy mají několik zdrojů. Jsou to chyby pocházející z přístroje, atmosféry, měření času a použitého matematického modelu. Vhodně zvolenou metodou lze do jisté míry odstranit vliv systematických chyb přístrojových, chyb atmosféry a chyb matematického modelu. Podklady pro tuto kapitolu jsou čerpány ze [4].

3.3.1 Systematické chyby u metod využívajících horizontálních směrů

Na horizontální směry mají vliv ***sklon klopné osy dalekohledu i*** a ***kolimační chyba c***, které se dají vyjádřit vztahy:

$$\Delta i = i \cot gz \tag{3.3}$$

$$\Delta c = \frac{c}{\sin z}, \tag{3.4}$$

kde z je zenitový úhel.

Obě chyby se vyloučí měřením ve dvou polohách dalekohledu, avšak pouze za předpokladu, že zenitový úhel z a sklon klopné osy dalekohledu i, případně z a c se v průběhu měření nemění. Tento předpoklad však bývá zřídkakdy splněn, a proto je nutné zavádět početní korekce pro jejich odstranění. Určení náklonu přístroje a velikosti přístrojových chyb v okamžiku měření je však problematické, a proto nelze nikdy plně eliminovat jejich vlivy.

Na výsledky měření horizontálních směrů působí i ***stáčení pozorovacího pilíře/stativu*** či přístroje obecně. Chyby vzniklé tímto způsobem lze jen těžko korigovat.

Výsledky při měření na hvězdy pod velkým zenitovým úhlem ovlivňuje ***horizontální refrakce***, způsobená nehomogenitou atmosféry v okolí stanoviska a je nutno s tímto vlivem počítat.

Do výpočtu u této metody vstupují úhly, které jsou získány jako rozdíly dvou směrů. Ze ***zákona hromadění středních chyb*** vyplývá, že výsledné chyby nabudou hodnoty $\sqrt{2}$ -krát větší, než jsou chyby směrů.

3.3.2 Systematické chyby u metod využívajících zenitových úhlů

Zenitové úhly mají jedno rameno fyzikálně definované, je jím tečna k místní tížnici, lze je tedy měřit přímo, na rozdíl od úhlů vodorovných. Fyzikálně definované rameno je v přístroji realizováno pomocí libely, kapalinového horizontu nebo kyvadlovým kompenzátorem. Je tedy nutné počítat s chybami, které jsou způsobeny konstrukcí těchto zařízení a nepříznivě ovlivňují výsledek měření.

Indexová chyba se projeví do výsledku svou plnou hodnotou, vliv této chyby je na velikosti zenitového úhlu nezávislý a za předpokladu neměnnosti se chyba vyloučí měřením ve dvou polohách dalekohledu.

Vliv ***sklonu klopné osy i*** na zenitový úhel vypočteme ze vzorce:

$$\Delta z_i = \frac{1}{2} i^2 \cot gz\,, \qquad (3.5)$$

kde z je zenitový úhel.

Chyba je vždy kladná, nelze vyloučit měřením ve dvou polohách, ale za běžných podmínek je velice malá. Pro hodnoty z=30° a i=20´´ je chyba Δz=0,002´´, což je výrazně méně než odpovídající chyba u vodorovných úhlů Δi=35´´.

Vliv ***kolimační chyby*** je obdobný jako vliv sklonu klopné osy. Vypočteme jej ze vzorce:

$$\Delta z_c = \frac{1}{2} c^2 \cot gz\,, \qquad (3.6)$$

kde c je úhlová velikost kolimační chyby.

Chyba je vždy kladná, nelze ji vyloučit měřením ve dvou polohách, ale za běžných podmínek je velikost chyby vzhledem k přesnosti přístroje zanedbatelná.

Nejvýraznější vliv na přesnost zenitových úhlů má ***astronomická refrakce***. Je funkcí zenitového úhlu, teploty a tlaku vzduchu po celé délce dráhy paprsku v atmosféře. Její vliv je největší u záměr blízkých rovině horizontu a nejmenší v blízkosti zenitu. Tato chyba se dá do jisté míry odstranit vhodně zvoleným matematickým modelem atmosféry. V praxi se však používá metoda měření ve vhodně sestavených párech. Hvězdy v páru musí být uspořádány tak, aby byl jejich zenitový úhel stejný a azimuty se lišily o 180°. Typickým příkladem tohoto přístupu je Horrebow – Talcottova metoda.

4 SYSTÉM PRO ASTRONOMICKÉ URČOVÁNÍ POLOHY MAAS - 1

Klasické metody GA pro určování zeměpisných souřadnic vycházely z konstrukce přístrojů, které byly k těmto účelům vyvinuty. S nástupem kosmické geodézie poklesl význam GA a s ním i vývoj nových přístrojů a metod měření. I přesto existují případy, kdy metody GA pro určování zeměpisných souřadnic naleznou uplatnění i dnes. Příkladem může být určování tížnicových odchylek v experimentálních sítích nebo aplikace astronomické nivelace. Popis metody i podmínky pro výběr hvězdných párů jsou převzaty ze [4].

4.1 Metoda párů stejné výšky

Moderní geodetické přístroje nejsou technicky vybaveny k tomu, aby byly využity pro klasické metody GA. Výhodou je, že jsou vybaveny elektronickým odečítáním kruhů a senzory náklonu a tím umožňují efektivnější sběr dat, na rozdíl od klasických přístrojů. Zvýšení počtu pointací lze dosáhnout pohybem celého dalekohledu tak, aby hvězda procházela opakovaně ryskou záměrného obrazce dalekohledu. S ohledem na výše zmíněná fakta vyvinul Ing. Radovan Machotka Ph.D. metodu, která splňuje tato kritéria:

- Přesnost určení astronomických zeměpisných souřadnic je lepší než 0,5´´
- Určování obou souřadnic (φ, λ) z jednoho měření
- Vysoká produktivita a operativnost měření
- Použitelnost v nepřístupném terénu

4.1.1 Popis metody

Z kapitoly 3 vyplývá, že pro automatizované měření je mnohem přijatelnější metoda využívající měření zenitových úhlů, a to především z důvodů menšího vlivu systematických chyb. Metoda párů stejné výšky se od obecné metody zenitových vzdáleností a času liší měřením hvězd v párech pro eliminaci proměnlivého vlivu refrakce a indexové chyby přístroje. Hvězdné páry musí splňovat dané geometrické a časové podmínky, viz níže. Naopak nevyžaduje měření meteorologických dat a umožňuje současné určení obou zeměpisných souřadnic. Výsledné souřadnice jsou počítány z naměřených dat vyrovnáním.

4.1.2 Podmínky pro výběr hvězdných párů

Předpokladem vysoké operativnosti měření je existence dostatečného množství hvězdných párů splňujících podmínky zvolené metody. Pro zvýšení počtu vyhovujících hvězdných párů byly kladeny pouze nezbytné požadavky:

- Pro splnění neměnnosti podmínek při měření (stav přístroje a atmosféry) je nutné, aby **časová prodleva mezi hvězdami v páru i mezi jednotlivými páry byla minimální**, co nejbližší času nutnému k přestavení stroje pro měření další hvězdy.
- Snížení vlivu proměnlivosti podmínek při měření lze také dosáhnout **měřením více párů v téže vertikální rovině** se střídáním počátečního směru.
- **Rozmezí zenitových úhlů hvězd <20°;35°>**. Hvězdy v zenitovém úhlu <20° jsou více ovlivněny systematickými chybami a výrazně se mění jejich azimut a rychlost pohybu v zenitovém úhlu. Záměry s většími zenitovými úhly jsou více ovlivňovány horizontální refrakcí a v terénních podmínkách se mohou vyskytnout překážky.
- Výpočet polohy vyžaduje alespoň dva hvězdné páry, jejichž **vertikální roviny se protínají pod úhlem blížícím se pravému**. Ke splnění této podmínky se nabízí dvě přirozené roviny, jimiž jsou rovina místního poledníku a prvního vertikálu. Takovéto uspořádání je méně náchylné na výpadek některého páru a umožňuje opakovatelnost měření v dané vertikální rovině.
- **Odchylka vertikální roviny páru** od zvolené základní roviny není na závadu, pokud nenarušuje celkovou konfiguraci měření. Odchylky do 10° lze považovat za přijatelné.
- V rámci každého páru by měly být splněny podmínky **rovnosti zenitových úhlů a opačnosti azimutů**. V praxi je teoreticky i prakticky přesné splnění podmínek nemožné. Jako primární byla zvolena podmínka totožnosti zenitových úhlů, která je důležitá zejména z hlediska eliminace nepříznivých vlivů refrakce. Pár ji musí splňovat přesně. Pro podmínku opačnosti azimutů je přípustná odchylka v řádu stupňů.

4.2 Technické řešení MAAS - 1

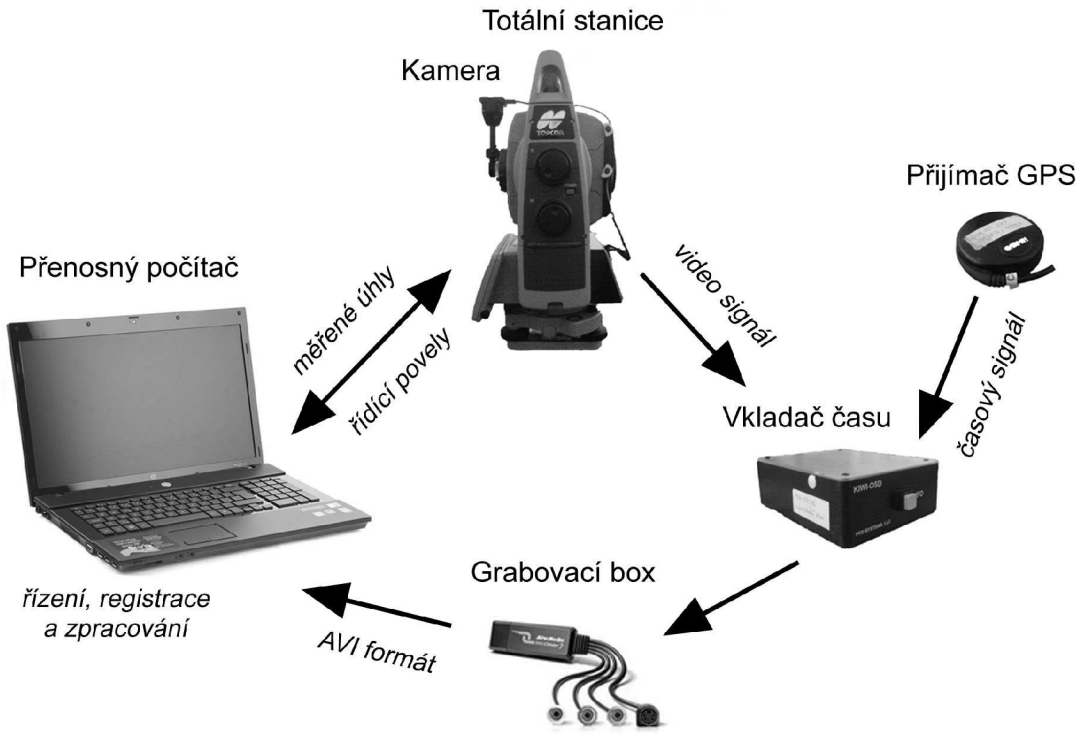
Systém je založen na motorizované totální stanici doplněné o senzor CCD, časovou základnu a přenosný počítač. Proces měření je plně automatizován a dokáže bez nutnosti zásahu pracovat po dobu celé observační noci. Návrh tohoto systému vychází ze standardně vyráběného a prodávaného vybavení, ať už se jedná o geodetické, astronomické či jiné pomůcky. Důraz byl kladen na minimalizaci počátečních nákladů a investic spojených s budoucí modernizací systému. Využití totální stanice není omezeno pouze na astronomický měřící systém, ale lze ji využívat k jiným geodetickým účelům.[5]

Konstrukce systému

Základem systému MAAS – 1 je motorizovaná totální stanice Topcon GPT 9001A (Obr. 4.1). Časovou základnu tvoří křemenné hodiny průběžně řízené sekundovými impulsy z GPS přijímače s časovým výstupem. Automatizace registrace času byla vyřešena náhradou lidského oka CCD snímačem. Místo okuláru dalekohledu byla nainstalována miniaturní kamera (Obr. 4.1), která snímá zorné pole dalekohledu. Do každého snímku výstupního videosignálu je speciálním zařízením KIWI-OSD vložen údaj o přesném čase expozice. Na Obr. 4.2 můžeme vidět schéma zapojení jednotlivých součástí systému.

Snímky jsou pořizovány kamerou o rozlišení 720 x 576 pixelů s frekvencí 25 snímků za sekundu. V současném stavu dokáže systém zaznamenávat měřické snímky s frekvencí 5 Hz. Je tedy možné měřit úhlovou polohu cíle 5 krát za sekundu. Čas je k jednotlivým snímkům přiřazen s přesností 1/50 s. Úhlová velikost pixelu je přibližně 3´´. Videokamera je odnímatelná, její opětovná instalace trvá několik minut. K měření je využita metoda párů stejné výšky, která je blíže popsána v kapitole 4.1.

Obr. 4.1 Totální stanice GPT 9001A s instalovanou kamerou



Obr. 4.2 Schéma zapojení

Řešení automatizace

Pro vyhodnocení snímků hvězd se využívá automatické zpracování. V první fázi se vyhledá obraz hvězdy, ve druhé fázi se určí střed tohoto obrazu tzv. subpixelovou metodou. Při použití tohoto postupu jsou určeny souřadnice středu s přesností mezi 1/3 a 1/4 pixelu. Pro vyhodnocení platí, že čím jasnější je hvězda, tím větší je její obraz a přesnost jejího vyhodnocení je vyšší.

Výsledkem zpracování jsou snímkové souřadnice obrazu v pixelech. Při známé úhlové velikosti jednoho pixelu jsou tyto souřadnice využity pro výpočet zenitového úhlu hvězdy společně se zenitovým úhlem naměřeným totální stanicí.

Čtení času je automatizované použitím korelační techniky. Jsou porovnávány jednotlivé číslice na vyhodnocovaném snímku, kam jsou vloženy zařízením KIWI-OSD, se vzory těchto číslic.

Ihned při měření dochází k průběžné kontrole, která se týká vyhodnocení obrazu hvězdy a vyhodnocení času. Rušivé vlivy mohou způsobit, že obraz hvězdy není kvalitní, nebo že číslice nejsou tak kontrastní, jak by bylo potřeba. Zpracování snímků musí být

co nejméně závislé na těchto vlivech a musí obsahovat mechanismy, které identifikují a vyloučí nesprávné výsledky vyhodnocení. Kontrola je tedy založena na dvou nezávislých vyhodnoceních dané veličiny a za správný je výsledek přijat jedině tehdy, když se oba dílčí výsledky shodují. Vyhodnocení probíhá během měření a výstupem je pouze zápisník v textovém souboru. Více podrobností o technickém vybavení systému lze nalézt v [5] nebo [8].

5 URČENÍ POLOHY ZÁMĚRNÉ PŘÍMKY NA SNÍMKU

Vlivem nejrůznějších činitelů (otřesy, teplota, tlak, vítr) se může poloha CCD snímače vzhledem k záměrné přímce dalekohledu totální stanice měnit. Při běžném měření se zjišťuje pouze po montáži kamery na totální stanici a během jednotlivých etap měření se považuje za neměnnou. Při řešení této diplomové práce byla určována před každým jednotlivým měřením z důvodů zjištění rozsahu pohybů CCD snímače a jejich vlivu na výsledky astronomického určení polohy.

5.1 Testovací měření

Testovací měření bylo prováděno na základně vytvořené k tomuto účelu. Základna byla realizována na jedné straně stativem s totální stanicí a na straně druhé odrazným hranolem umístěným na betonovém pilíři ve vzdálenosti cca 20 m. Hranol byl nasvícen a k zacílení na jeho střed byla používána funkce totální stanice „Automatické zacílení na hranol“.

Automatické zacílení bylo zvoleno proto, že totální stanice s instalovanou kamerou neumožňuje vizuální zacílení (nitkový kříž není na snímcích viditelný). Přesnost tohoto zacílení udávaná výrobcem je 2´´. Určení polohy záměrné přímky je potřeba vykonat s co největší přesností. Následujícím výpočtem ověříme, zda funkce totální stanice použitá při zacílení vyhovuje našim potřebám.

Velikost příčné odchylky:

$$q = \frac{m_r}{\rho''} s \qquad (5.1),$$

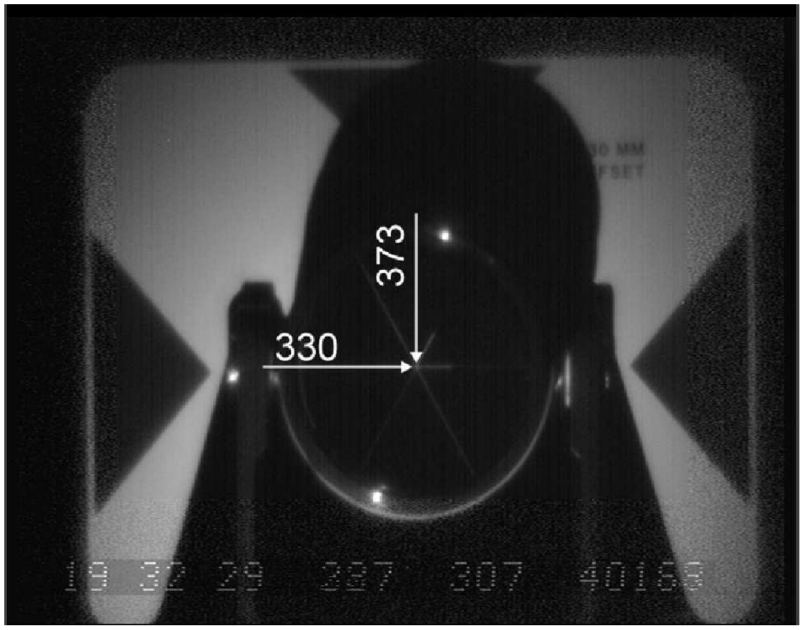
jestliže střední chyba zacílení $m_r = 2''$, délka základny $s = 20m$ a $\rho'' = 206265''$, pak $q = 0,00019m$.

Velikost příčné odchylky vycházející z nepřesnosti automatického cílení udávané výrobcem (2´´) na vzdálenost 20 m je tedy 0,19 mm. Této přesnosti bychom vizuálním zacílením dosáhli s obtížemi. Z [6] víme, že úhlová velikost pixelu v horizontálním směru je $7,47^{cc}$, ve vertikálním pak $8,15^{cc}$. Chyba při cílení se tedy na snímku projeví jako

0,83 pixelu ve vodorovném směru a 0,75 pixelu ve směru vertikálním. S ohledem na toto zjištění bylo rozhodnuto, že odečet bude probíhat z trojice snímků a výsledkem bude aritmetický průmět zjištěných hodnot.

5.2 Vyhodnocení snímků

Po automatickém zacílení na hranol byl pořízen jeho snímek. Tento postup byl opakován třikrát. Ze všech takto pořízených snímků byly v grafickém editoru vyhodnoceny souřadnice středu hranolu v pixelech. Všechny zjištěné souřadnice v osách *X* a *Y* jsou zaznamenány v Tab. 5.1 a 5.2. Aritmetickým průměrem těchto hodnot byla vypočtena konečná konvenční poloha záměrné přímky.



Obr. 5.1 Určení polohy záměrné přímky na snímku

Snímky pořízené kamerou připevněnou na totální stanici mají rozměr 720x576 pixelů. Jak je vidět na Obr. 5.1, záměrná přímka neprochází přesně středem snímků. Tato nepřesnost je způsobena montáží kamery. V příloze č. 8 je zobrazen průběh změny polohy záměrné přímky na snímku během testovacích měření, v El. příloze č. 7 jsou archivovány veškeré pořízené kalibrační fotografie.

Datum měření	Měření v rámci noci	souřadnice X_1 [pix]	souřadnice X_2 [pix]	souřadnice X_3 [pix]	Souřadnice X (průměr) [pix]
23. 8. 2012	1.	376	373	373	**374**
27. 8. 2012	1.	375	375	373	**374**
27. 8. 2012	3.	376	376	376	**376**
27. 8. 2012	4.	377	376	376	**376**
29. 8. 2012	1.	377	376	377	**377**
3. 10. 2012	1.	375	374	375	**375**
3. 10. 2012	2.	375	376	376	**376**
17. 10. 2012	1.	373	374	373	**373**
22. 10. 2012	1.	374	375	376	**375**
22. 10. 2012	2.	377	377	378	**377**
22. 10. 2012	3.	379	375	381	**378**
22. 10. 2012	4.	378	377	377	**377**
22. 4. 2013	1.	377	377	378	**377**
22. 4. 2013	2.	380	379	380	**380**
22. 4. 2013	3.	371	370	371	**371**
22. 4. 2013	4.	379	379	380	**379**
22. 4. 2013	6.	382	381	381	**381**
22. 4. 2013	7.	378	382	382	**381**

Tab. 5.1 Poloha záměrné přímky v ose X na snímku

Datum měření	Měření v rámci noci	souřadnice Y_1 [pix]	souřadnice Y_2 [pix]	souřadnice Y_3 [pix]	Souřadnice Y (průměr) [pix]
23. 8. 2012	1.	325	325	325	**325**
27. 8. 2012	1.	330	330	330	**330**
27. 8. 2012	3.	329	329	329	**329**
27. 8. 2012	4.	329	329	328	**329**
29. 8. 2012	1.	328	328	329	**328**
3. 10. 2012	1.	326	325	327	**326**
3. 10. 2012	2.	327	327	328	**327**
17. 10. 2012	1.	305	304	305	**305**
22. 10. 2012	1.	319	319	318	**319**
22. 10. 2012	2.	321	320	322	**321**
22. 10. 2012	3.	319	319	320	**319**
22. 10. 2012	4.	319	319	318	**319**
22. 4. 2013	1.	324	324	324	**324**
22. 4. 2013	2.	323	323	323	**323**
22. 4. 2013	3.	324	323	323	**323**
22. 4. 2013	4.	324	323	324	**324**
22. 4. 2013	6.	324	324	326	**325**
22. 4. 2013	7.	325	326	324	**325**

Tab. 5.2 Poloha záměrné přímky v ose Y na snímku

Určení excentricity záměrné přímky je velmi důležité pro správný výpočet. Na základě informací o poloze záměrné přímky na snímku ve formě souřadnic v pixelech v předem stanoveném souřadnicovém systému program vyhledává hvězdy v zorném poli dalekohledu. Ve své podstatě si stanoví pixel, ke kterému bude provádět veškerá měření. V případě chyby v těchto souřadnicích by byla již orientace totální stanice pomocí α Ursae Minoris (Polárka) do roviny místního poledníku chybná. Od této nepřesnosti by se odvíjely i chybné azimuty a zenitové úhly naměřené tímto způsobem. Při známé úhlové velikosti jednoho pixelu jsou totiž tyto souřadnice využity pro výpočet zenitového úhlu hvězdy společně se zenitovým úhlem naměřeným totální stanicí.

Souřadnice polohy záměrné přímky zjištěné testovacím měřením byly z výše zmíněných důvodů vloženy do souboru MSV3.ini, který slouží ke konfiguračnímu nastavení měření. Po tomto testování se mohlo přistoupit ke klasickému měření délkových a šířkových párů.

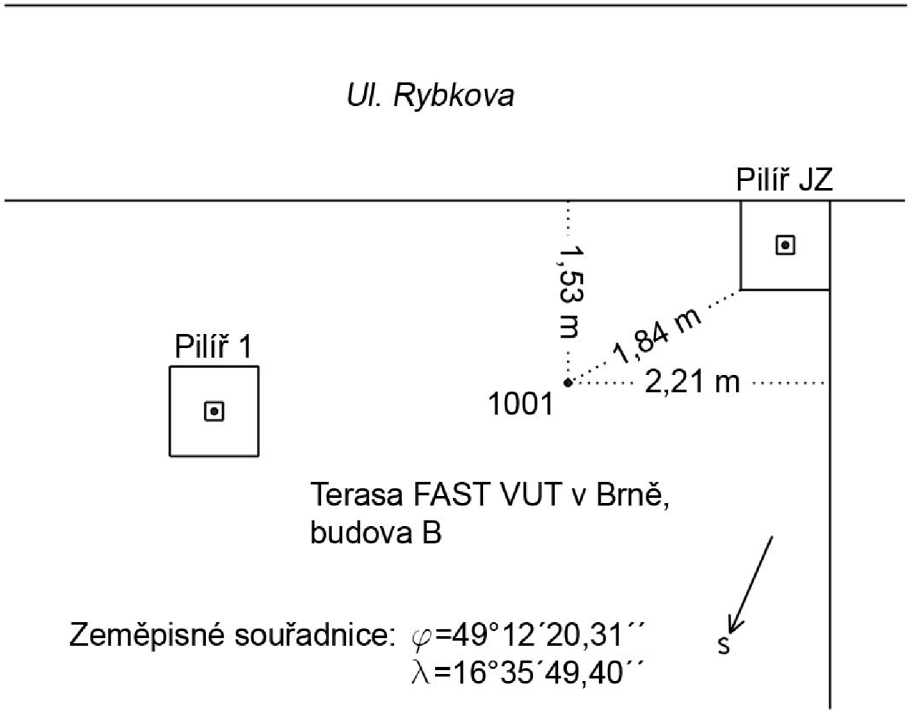
6 MĚŘENÍ

Měření probíhalo v noci 23. 8., 27. 8., 29. 8., 3. 10., 17. 10., 22. 10. a 22. 4. na terase budovy B Fakulty stavební VUT v Brně. Před každým měřením byla provedena kalibrace kamery, pro zjištění konvenční polohy záměrné přímky na snímku. K získání potřebného souboru dat byly zaměřeny čtyři délkové a čtyři šířkové páry. Vzhledem k tomu, že je možnost měření značně závislá na meteorologických podmínkách, nebylo vždy měřeno celou noc. V následujících kapitolách je přiblížen postup měření, včetně přípravy pozorovacího programu a zpracování.

6.1 Lokalita

Měření probíhalo na terase Fakulty stavební VUT v Brně, viz Obr. 6.1 převzatý z [7] o přibližných zeměpisných souřadnicích φ=16°35´50´´ a λ=49°12´20´´. Přes velké množství pilířů nacházejících se přímo na zmíněné terase bylo zvoleno postavení přístroje na stativ tak, aby byly simulovány podmínky terénního měření. Přístroj byl během všech měření centrován 2,21 m od jihozápadního a 1,53 m od jihovýchodního okraje jižní části terasy. Pro případnou rekonstrukci měření byl vytvořen místopis bodu (Obr. 6.2). Kalibrace byla před každým měřením prováděna na hranol umístěný na pilíři v severní části terasy ve vzdálenosti cca 20 m. Přímo na terase se nachází meteorologická stanice. Poskytovaná data z této stanice byla využita k testování změny polohy záměrné přímky v závislosti na teplotní roztažnosti a jejího vlivu na opakovatelnost měření. Podrobněji je tato problematika řešena v kapitole 7.2.

Obr. 6.1 Terasa Fakulty stavební VUT v Brně [7]



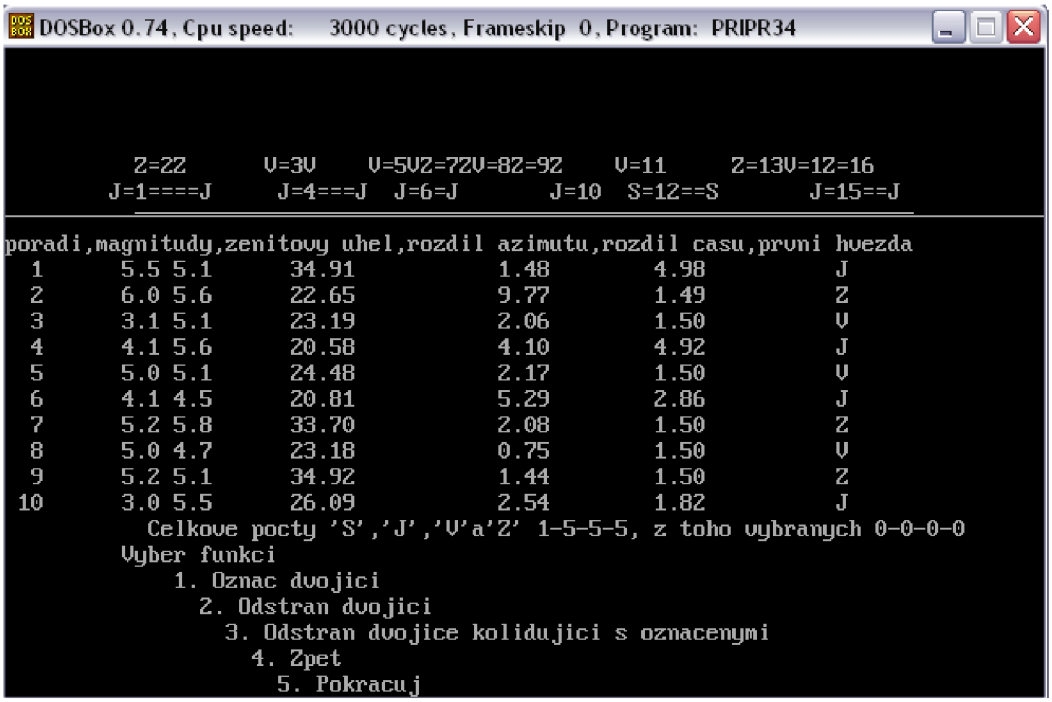
Obr. 6.2 Místopis bodu

6.2 Pozorovací program

Před každým měřením je nutné připravit pozorovací program. Na základě informací získaných ze souboru PPROGRAM.TXT uděluje MSV3VerzeA23.exe totální stanici pokyny k natáčení dalekohledu směrem k právě měřené hvězdě. K vytvoření pozorovacího programu slouží soubor PRIPR34.exe, viz Obr. 6.3.

Před samotným výběrem vhodných hvězdných párů je nutné zadat několik vstupních údajů, jimiž jsou: greenwichské datum měření včetně požadovaného začátku a konce měření ve formátu UTC, přibližné zeměpisné souřadnice stanoviště, minimální doba mezi hvězdami ve dvojici, maximální prodleva a minimální magnituda.

Program PRIPR34.exe automaticky provede selekci hvězdných párů, které odpovídají zadaným kritériím. Software umožňuje uživateli připravit program tak, aby do něj nemusel během noci zasahovat. V průběhu měření ale mohou nastat podmínky, které vyžadují změnu pozorovacího programu (oblačnost, nízký počet šířkových resp. délkových párů). Pro větší efektivitu je tedy lépe připravit pozorovací program pouze přibližně a operativně do něj zasahovat v průběhu měření.



Obr. 6.3 Příprava pozorovacího programu v PRIPR34.EXE

6.3 Určení polohy záměrné přímky na snímku

Před každým měřením bylo provedeno měření pro stanovení aktuální polohy záměrné přímky na snímku. Vyhodnocené výsledky byly zapsány do souboru MSV3.ini. Podrobně je postup určení polohy záměrné přímky popsán v kapitole 5.

6.4 Měření hvězdných párů

Po pečlivé horizontaci přístroje, zapojení všech potřebných komponentů, provedení kalibrace a přepsání hodnot konvenční polohy záměrné přímky v souboru MSV3.ini, je možné spustit program MSV3verzeA23.exe, který obsluhu přehledně provede celým měřením. Před začátkem měření je nutné vyplnit název výstupního souboru. Po jeho zadání se vytvoří soubory (*.prt) a (*.txt), do kterých se ukládají naměřená data.

První ze souborů (*.prt) ukládá informace o úspěšnosti zaměření dané hvězdy a vyskytnutých chybách. Druhý soubor (*.txt) slouží jako zápisník měření. Obsahuje hlavičku, ve které jsou údaje se záznamem data a času měření, přibližných souřadnic stanoviska, čísla bodu a rektascenze a deklinace Polárky. Na dalších řádcích je už záznam průběhu měření a provedené kalibrace kamery. Každá hvězda je vyhodnocena

z 21 snímků. U každého snímku jsou zaznamenávány všechny potřebné údaje k výpočtu astronomických zeměpisných souřadnic. Příklady obou protokolů jsou uvedeny v přílohách č. 1 a 2.

Hlavní okno programu, viz Obr. 6.4, nás informuje o postupu při měření a je ovládáno klávesami F1-F6. Příprava měření se skládá z níže uvedených částí.

V první řadě je třeba **připojit před měřením kameru** a zkontrolovat, zda se na obrazovce zobrazuje správně čas a snímaný obraz. Celý systém lze ovládat přímo z počítače s možností pořizovat snímky a ukládat je k pozdějšímu využití.

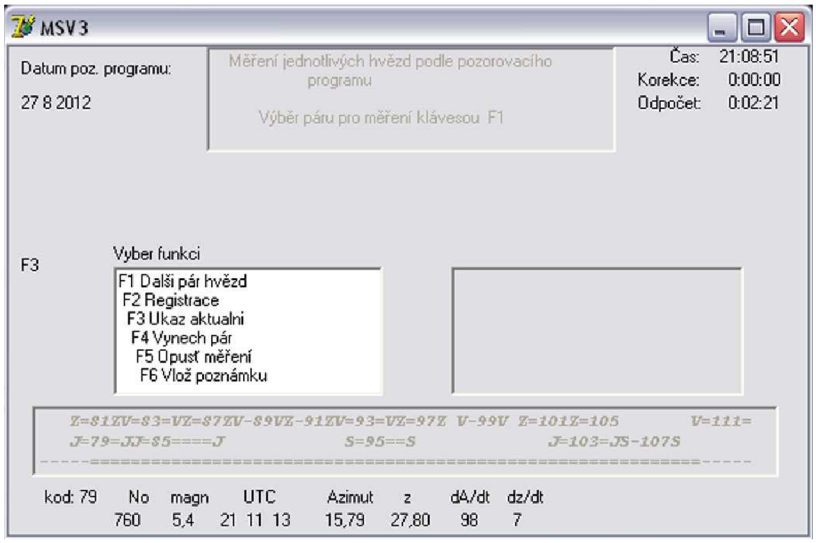
V dalším kroku je nutné **zadat celou hodnotu hodin časového údaje** sledovaného na obrazovce, aby ji mohl program srovnat s časovým údajem přímo ze systému počítače a zavést patřičné korekce.

Aby bylo horizontální čtení v jižním směru rovno nule je potřeba přístroj **orientovat do roviny místního poledníku**. K tomuto účelu slouží orientace na Polárku. Systém vypočte hodnotu zenitového úhlu ze stanoviska na Polárku a automaticky nakloní dalekohled pod tímto úhlem. Úkolem obsluhy je otáčet přístrojem, dokud se Polárka neobjeví uprostřed zorného pole. Zbývající část procesu obstará systém.

Minimálně jednou během noci musí být provedena **kalibrace kamery**. Tím se rozumí určení úhlové velikosti pixelu v horizontálním a vertikálním směru a stočení snímku vůči horizontu. Během kalibrace je Polárka postupně snímána na 17-ti různých místech na snímku. Z těchto snímků jsou vyhodnoceny výše zmíněné parametry. Při měření prováděném pro účely této práce byla kalibrace prováděna během noci několikrát, pro každé jednotlivé měření zvlášť.

Po provedení všech předchozích kroků je systém připraven k měření. V okně programu se objeví připravený pozorovací program a menu, jenž ho umožňuje dále upravovat podle potřeby. Časomíra odpočítává čas k nejbližší měřené hvězdě a v přehledné tabulce je zobrazen průběh měření s úspěšností vyhodnocení. Po zaměření se data ihned ukládají na pevný disk.

Výstupem měření jsou snímky hvězd (*.bmp) a dva výše popsané textové soubory.



Obr. 6.4 Okno programu MSV3verzeA23.exe

6.5 Zpracování naměřených dat

Při použití programu MSV3verzeA23.exe k měření bude výstupem potřebným pro zpracování zápisník ve formátu **.txt*. Ke zpracování takto uložených dat byla vyvinuta z praktických důvodů následující čtveřice programů.

Hrubé zpracování provede program ***HrubeZpracA6.exe***. V průběhu lze doplňovat do snímků, u kterých software nedokázal vyhodnotit čas, tento údaj ručně, pokud to kvalita snímku umožňuje. Po zpracování se vytvoří nový soubor s časovými údaji ve světovém čase **.tx1*, jeho příklad je uveden v příloze č. 3.

Ostatní tři soubory pro zpracování lze spustit dávkou pomocí programu VYROVNAN.BAT. Vstupním souborem je **.tx1*. K provedení výpočtu je potřeba znát hodnoty středních souřadnic pólu a DUT1. Tato data lze získat v publikaci Bulletin A, kterou vydává USNO (The United States Naval Observatory) pro IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service). Ve svých výpočtech používám data z [9].

První program ***EXPORT.EXE*** provede separaci dat a přípravu k výpočtu zdánlivých souřadnic hvězd. Výstupem tohoto prvního kroku jsou textové soubory HVEZDY.HVE a ZAPISNIK.HVE.

Další program ***P_ZDP5.EXE*** provede výpočet zdánlivých poloh hvězd, které jsou uloženy v souboru ZDPOLOHY.HVE.

Poslední fáze výpočtu probíhá v programu ***VYROV_34.EXE***. Výsledkem tohoto zpracování jsou astronomické zeměpisné souřadnice vyrovnané pomocí metody nejmenších čtverců. Všechny výsledky jsou uloženy do textového dokumentu VYSLEDKY.TXT. V tomto souboru jsou uloženy informace o datu měření, středních souřadnicích pólů, *DUT 1*, rozdílech posledních iterací $d\varphi$ a $d\lambda$, počtu hvězd a záměr vstupujících do výpočtu, opravě, střední jednotkové chybě m_0, zvoleném součiniteli konfidence t a o výsledných zeměpisných souřadnicích φ a λ.

Program VYROV_34.EXE nabízí ještě další dvě možnosti zpracování. Umožňuje vyřadit ze zpracování všechny délkové páry a počítat pouze zeměpisnou šířku, přičemž zeměpisná délka je fixní a naopak vyřadit ze zpracování všechny šířkové páry a počítat pouze zeměpisnou délku, přičemž zeměpisná šířka je fixní. Za fixní hodnoty zeměpisných souřadnic se volí hodnoty získané ze společného výpočtu. Tento způsob umožňuje spočítat výsledky jednotlivých párů zvlášť. Protokol o výpočtu se ukládá do souboru PARY.TXT. Měření pro účely této práce bylo zpracováno i tímto způsobem. Všechny výsledky včetně odchylek od průměrů jsou archivovány v příloze č. 4 a 5. Výstupy z jednotlivých zpracování a použité verze všech softwaru jsou uloženy v El. přílohách č. 1, 2, 3 a 5.

Podrobněji rozepsaný postup přípravy pozorovacího programu, měření i způsobu zpracování nalezneme např. v [8].

7 VLIV ZMĚNY POLOHY CCD SNÍMAČE NA OPAKOVATELNOST VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Při terénních měřeních je manipulace s celým systémem nutná. Při přípravě, vybalování a přenosu mezi jednotlivými měřenými body, může docházet mechanickými vlivy k pohybu kamery, která je k totální stanici připevněna pomocí šroubů. Toto upevnění má vliv na konvenční polohu záměrné přímky na snímku. Zkoumaným parametrem je změna polohy v osách *X* a *Y* a její vliv na opakovatelnost výsledků.

K pohybu kamery s CCD snímačem nemusí docházet pouze v důsledku mechanických vlivů, ale i vlivem teplotní roztažnosti použitých materiálů, které mohou způsobovat malé posuny v řádech několika pixelů. Jakou mírou nebo zda vůbec tyto podmínky ovlivňují měření, je řešeno v kapitole 7.2.

Při použití metody párů stejné výšky, by se měla největší část chyb způsobených pohybem CCD snímače odstranit. Ve výsledcích se však mohou projevit chyby vyšších řádů.

Veškeré grafy a tabulky z této kapitoly jsou archivovány v El. příloze č. 6.

7.1 Mechanické vlivy

Před každým měřením byla provedena kalibrace, viz kapitola. 5. Poloha záměrné přímky na snímku pro každé měření je zaznamenána v Tab. 7.1. Po zapsání hodnoty do souboru MSV3.ini byla provedena měření, z nichž byly zjištěny zeměpisné souřadnice, které jsou uvedeny v téže tabulce. Po měření byl celý systém sbalen a přenesen na druhou terasu pro simulaci terénního měření na jednotlivých zájmových bodech. Při přepravě a balení byl dodržován stanovený postup, při němž se totální stanice umisťovala do přepravní bedny, tak aby víko krabice nevyvíjelo tlak na konstrukci kamery. Následně se celý postup měření opakoval na stejném bodě.

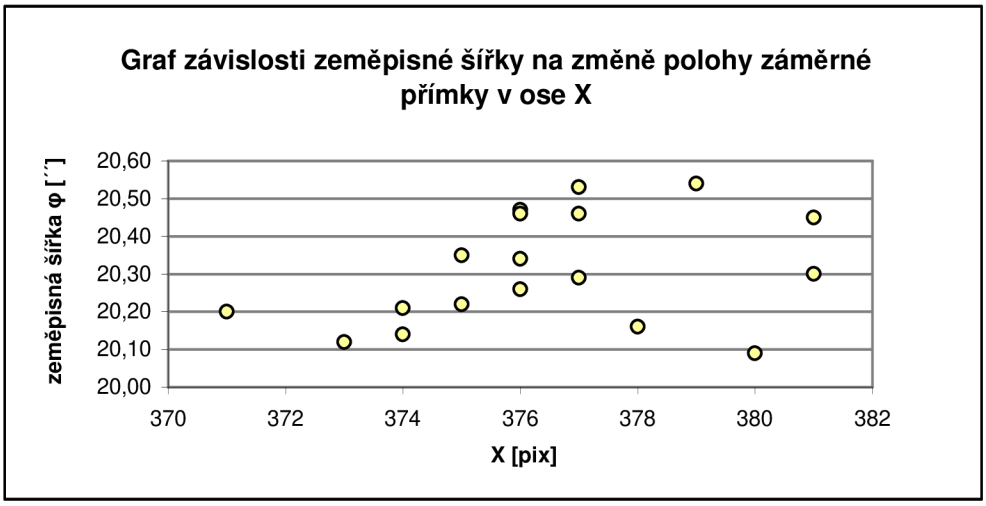
U zeměpisných souřadnic jsou pro přehlednost uváděny pouze šedesátinné vteřiny, které přísluší hodnotám 49°12´ u zeměpisné šířky a 16°35´ u zeměpisné délky. Veškeré naměřené souřadnice se liší pouze v desetinách vteřin.

Datum měření	Měření v rámci noci	Zeměpisná šířka [´´]	Zeměpisná délka [´´]	Konvenční poloha záměrné přímky na snímku	
				X [pix]	Y [pix]
23. 8. 2012	1.	20,14	49,28	**374**	**325**
27. 8. 2012	1.	20,21	49,79	**374**	**330**
27. 8. 2012	3.	20,26	49,14	**376**	**329**
27. 8. 2012	4.	20,47	49,52	**376**	**329**
29. 8. 2012	1.	20,46	49,34	**376**	**328**
3. 10. 2012	1.	20,35	49,89	**375**	**326**
3. 10. 2012	2.	20,34	49,57	**376**	**327**
17. 10. 2012	1.	20,12	49,73	**373**	**305**
22. 10. 2012	1.	20,22	49,40	**375**	**319**
22. 10. 2012	2.	20,29	49,25	**377**	**321**
22. 10. 2012	3.	20,16	49,61	**378**	**319**
22. 10. 2012	4.	20,46	49,35	**377**	**319**
22. 4. 2013	1.	20,53	49,15	**377**	**324**
22. 4. 2013	2.	20,09	48,96	**380**	**323**
22. 4. 2013	3.	20,20	49,46	**371**	**323**
22. 4. 2013	4.	20,54	49,16	**379**	**324**
22. 4. 2013	6.	20,45	49,38	**381**	**325**
22. 4. 2013	7.	20,30	49,22	**381**	**325**

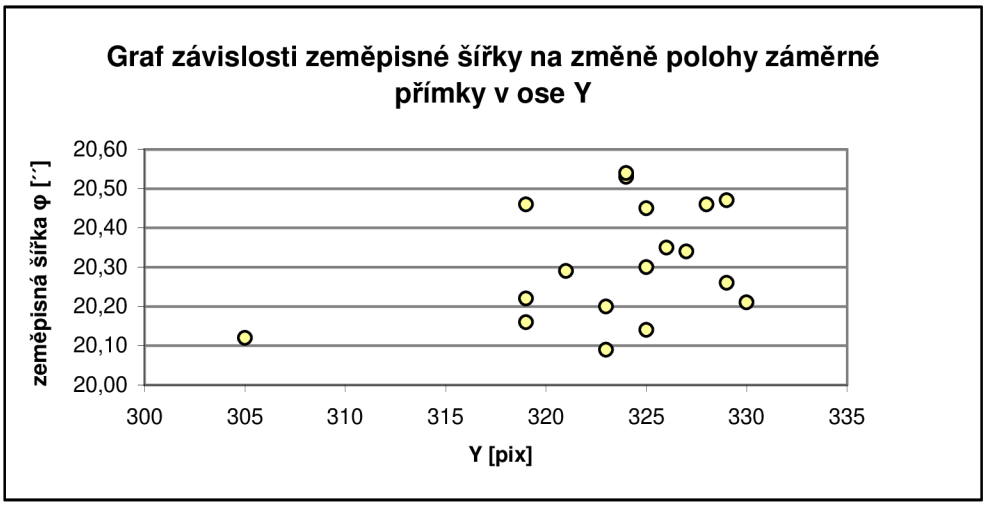
Tab. 7.1 Zeměpisné souřadnice a souřadnice záměrné přímky na snímku

Z Tab. 7.1 je patrné, že poloha záměrné přímky se v průběhu měření příliš neměnila. Rozdíl nejvyšší a nejnižší dosažené odchylky je 10 pixelů v ose *X*, resp. 25 pixelů v ose *Y*. Změna polohy záměrné přímky v ose *Y* při měření 17. 10. se výrazně odchyluje od zbývajících hodnot a mohla být způsobena tlakem přepravní krabice na konstrukci kamery. Z důvodu zhoršení viditelnosti v průběhu této noci bylo měřeno pouze jednou. Před ukončením měření byla poloha záměrné přímky kontrolně ověřena. Při tomto měření byly zjištěny souřadnice *X=374, Y=307*. Tyto hodnoty potvrzují předešlý výsledek a vylučují možnost omylu nebo hrubé chyby při odečítání souřadnic ze snímku. Z údajů získaných při následujícím měření 22. 10. je zřejmé, že se kamera v době před tímto měřením samovolně vracela do původní polohy. Mezi oběma observacemi nebylo s kamerou nikterak manipulováno. Závislosti změny zeměpisných souřadnic na změně polohy záměrné přímky na snímku znázorňují grafy 7.1, 7.2, 7.3 a 7.4.

K vyhodnocení pohybů kamery v průběhu noci byly astronomické zeměpisné souřadnice spočteny z každého hvězdného páru a z nich vyhotoveny grafy. Tyto se nacházejí v příloze č. 6 pro zeměpisnou délku a v příloze č. 7 pro zeměpisnou šířku.



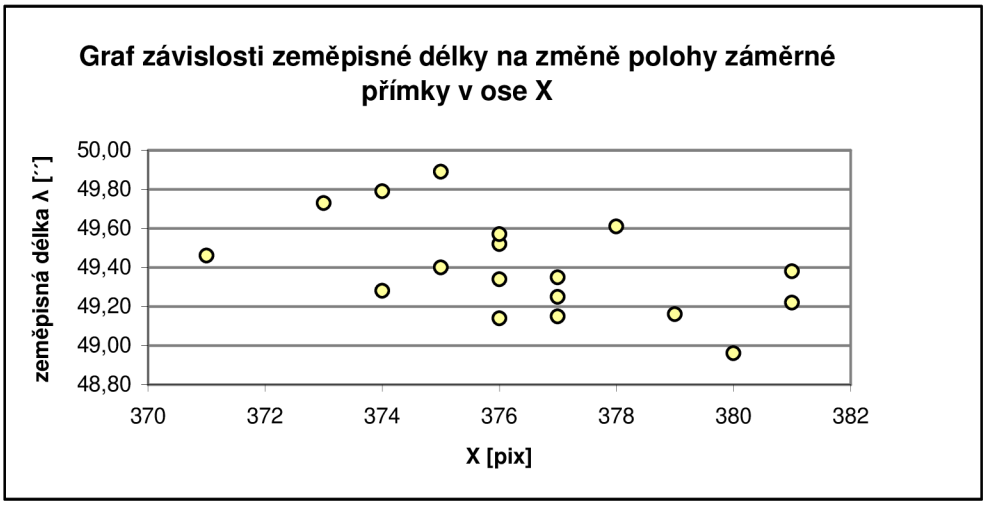
Graf 7.1



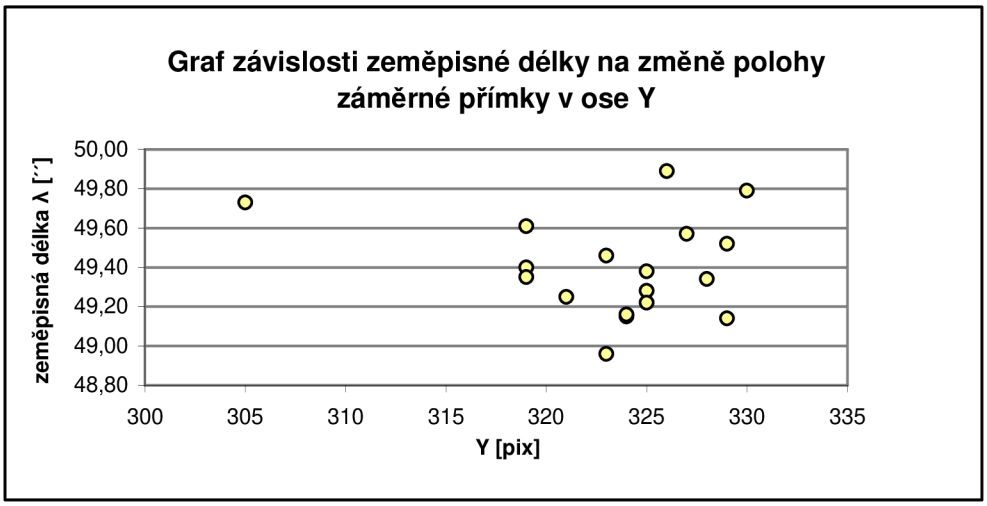
Graf 7.2

Korelační koeficient – Graf 7.1: $\rho_{x,y} = 0,3323$

Korelační koeficient – Graf 7.2: $\rho_{x,y} = 0,3607$



Graf 7.3



Graf 7.4

Korelační koeficient – Graf 7.3: $\rho_{x,y} = -0,5144$

Korelační koeficient – Graf 7.4: $\rho_{x,y} = -0,1516$

Ke každému grafu je doplněna hodnota korelačního koeficientu, který určuje míru vzájemné závislosti obou veličin. Uvedený vzorec je v obecném tvaru, každý korelační koeficient byl vypočten pro závislost veličin uvedených v grafu, ke kterému přísluší.

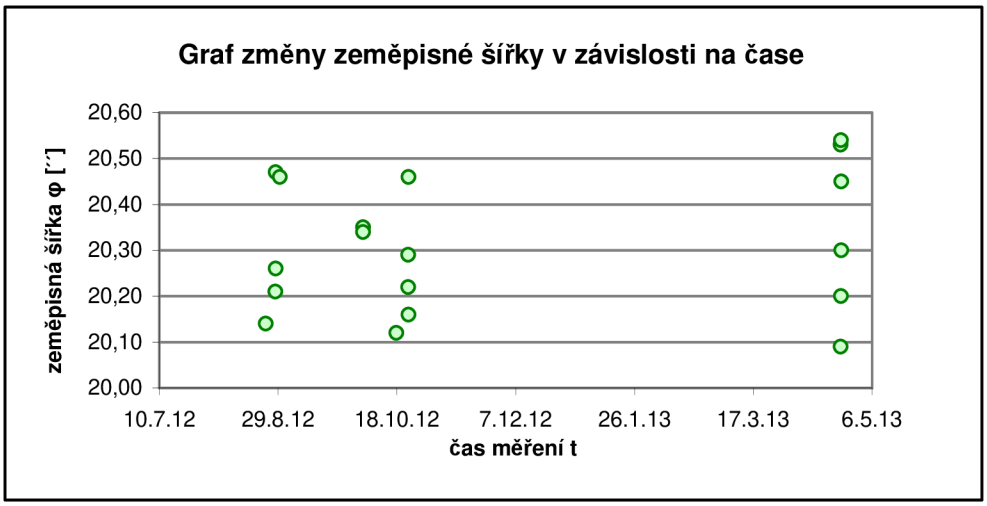
Korelační koeficient byl spočten podle vzorce:

$$\rho_{x,y} = \frac{\mathrm{cov}(X,Y)}{\sigma_x \sigma_y}, \qquad (7.1)$$

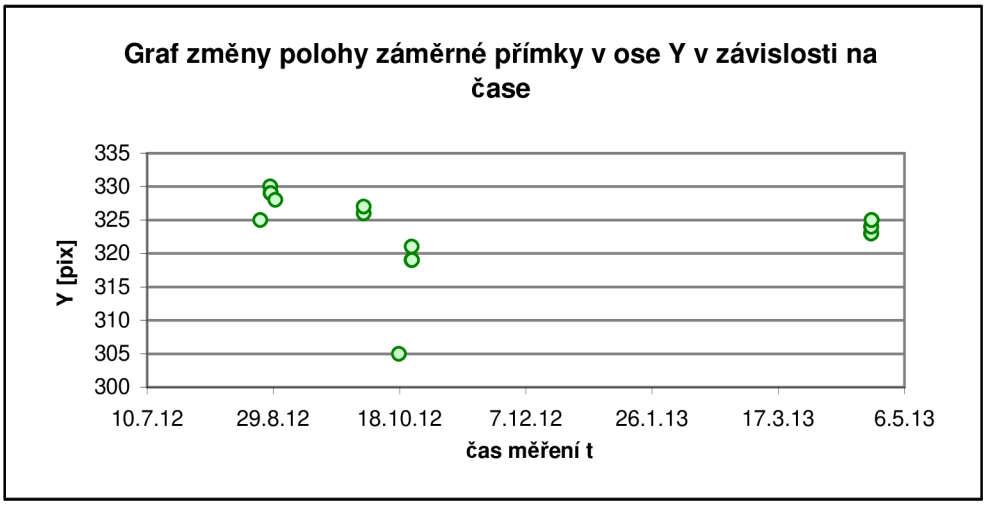
kde $-1 \le \rho_{x,y} \le 1$ a $\mathrm{cov}(X,Y) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)$.

V našem případě je největší dosažená hodnota korelačního koeficientu $\rho_{x,y} = 0{,}5144$, což prokazuje závislost. Nelze z toho však ještě usoudit, že by jedna z veličin musela být příčinou a druhá následkem. V grafech lze pozorovat, že se maximální hodnoty výkyvů polohy záměrné přímky neprojevují na zjištěných zeměpisných souřadnicích jako extrémní hodnoty zeměpisné délky nebo šířky, ale spadají spíše do průměrných hodnot.

V následujících grafech 7.5 a 7.6 je zobrazena změna zeměpisné šířky a polohy záměrné přímky v ose *Y* ze všech provedených měření. Při porovnání obou grafů je patrné, že jak posuny kamery, tak změny zeměpisné šířky nejsou zatíženy systematickým vlivem. Nejvíce by se měla chyba projevit na zenitovém úhlu v případě posunu ve směru osy *Y* a to celou svou velikostí. Zeměpisná šířka byla zvolena, protože se na ní více projeví případná chyba určení souřadnice. Na našem území odpovídá 1´´ zeměpisné šířky vzdálenosti 30 m, zatímco u zeměpisné délky pouze 20 m.



Graf 7.5



Graf 7.6

V Tab. 7.2, jsou porovnány a barevně zvýrazněny odchylky zjištěných souřadnic od průměru. Při kladných i záporných změnách zeměpisných souřadnic se poloha záměrné přímky měnila v obou osách náhodným směrem a nelze prokázat systematický vliv.

Datum měření	Měření v rámci noci	Δλ [´´]	Δφ [´´]	ΔX [pix]	ΔY [pix]
23. 8. 2012	1.	0,12	0,17	2,4	-1,6
27. 8. 2012	1.	-0,39	0,10	2,4	-6,6
27. 8. 2012	3.	0,26	0,05	0,4	-5,6
27. 8. 2012	4.	-0,12	-0,16	0,4	-5,6
29. 8. 2012	1.	0,06	-0,15	0,4	-4,6
3. 10. 2012	1.	-0,49	-0,04	1,4	-2,6
3. 10. 2012	2.	-0,17	-0,03	0,4	-3,6
17. 10. 2012	1.	-0,33	0,19	3,4	18,4
22. 10. 2012	1.	0,00	0,09	1,4	4,4
22. 10. 2012	2.	0,15	0,02	-0,6	2,4
22. 10. 2012	3.	-0,21	0,15	-1,6	4,4
22. 10. 2012	4.	0,05	-0,15	-0,6	4,4
22. 4. 2013	1.	0,25	-0,22	-0,6	-0,6
22. 4. 2013	2.	0,44	0,22	-3,6	0,4
22. 4. 2013	3.	-0,06	0,11	5,4	0,4
22. 4. 2013	4.	0,24	-0,23	-2,6	-0,6
22. 4. 2013	6.	0,02	-0,14	-4,6	-1,6
22. 4. 2013	7.	0,18	0,01	-4,6	-1,6

Tab. 7.2 Odchylky souřadnic od průměru

7.1.1 Střední chyby

Z výsledků měření byly vypočteny průměrné souřadnice a z odchylek od průměru pak empirická střední chyba určení souřadnic m_λ a m_φ podle vzorce:

$$m_{\lambda(\varphi)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} v_i v_i}{n-1}} \tag{7.2}$$

Výsledné souřadnice zjištěné měřením společně s odchylkami od průměru jsou vypsány v Tab. 7.3 a 7.4. Extrémní odchylky od průměru jsou zvýrazněny červeně, resp. žlutě.

Datum měření	Měření v rámci noci	Zeměpisná šířka [´´]	Odchylky od průměru [´´]
23. 8. 2012	1.	20,14	0,17
27. 8. 2012	1.	20,21	0,10
27. 8. 2012	3.	20,26	0,05
27. 8. 2012	4.	20,47	-0,16
29. 8. 2012	1.	20,46	-0,15
3. 10. 2012	1.	20,35	-0,04
3. 10. 2012	2.	20,34	-0,03
17. 10. 2012	1.	20,12	0,19
22. 10. 2012	1.	20,22	0,09
22. 10. 2012	2.	20,29	0,02
22. 10. 2012	3.	20,16	0,15
22. 10. 2012	4.	20,46	-0,15
22. 4. 2013	1.	20,53	-0,22
22. 4. 2013	2.	20,09	0,22
22. 4. 2013	3.	20,20	0,11
22. 4. 2013	4.	20,54	-0,23
22. 4. 2013	6.	20,45	-0,14
22. 4. 2013	7.	20,30	0,01
	průměr:	**20,31**	

Tab. 7.3 Zeměpisná šířka a odchylky od průměru

Empirická střední chyba určení zeměpisné šířky: $\mathbf{m_\varphi = 0{,}146''}$

Datum měření	Měření v rámci noci	Zeměpisná délka [´´]	Odchylky od průměru [´´]
23. 8. 2012	1.	49,28	0,12
27. 8. 2012	1.	49,79	-0,39
27. 8. 2012	3.	49,14	0,26
27. 8. 2012	4.	49,52	-0,12
29. 8. 2012	1.	49,34	0,06
3. 10. 2012	1.	49,89	-0,49
3. 10. 2012	2.	49,57	-0,17
17. 10. 2012	1.	49,73	-0,33
22. 10. 2012	1.	49,40	0,00
22. 10. 2012	2.	49,25	0,15
22. 10. 2012	3.	49,61	-0,21
22. 10. 2012	4.	49,35	0,05
22. 4. 2013	1.	49,15	0,25
22. 4. 2013	2.	48,96	0,44
22. 4. 2013	3.	49,46	-0,06
22. 4. 2013	4.	49,16	0,24
22. 4. 2013	6.	49,38	0,02
22. 4. 2013	7.	49,22	0,18
	průměr:	**49,40**	

Tab. 7.4 Zeměpisná délka a odchylky od průměru

Empirická střední chyba určení zeměpisné délky: $\mathbf{m_\lambda = 0{,}248''}$

Hodnocení:

Ze zpracovaných dat vyplývá, že při dodržování stanovených zásad při měření a přepravě (minimalizace otřesů, správné uložení přístroje do přepravní krabice, jemné zacházení při přeostřování, atd.), nedochází k tak velkým změnám polohy záměrné přímky, aby měly nepříznivý vliv na výsledky měření. Rozdíly získaných zeměpisných souřadnic mohou být způsobeny jinými příčinami, případně nahromaděním náhodných chyb stejného znaménka.

7.2 Vlivy atmosférických podmínek na změnu polohy záměrné přímky

Změnou atmosférických podmínek může docházet v konstrukci celého systému k pnutím, která způsobují malé změny v poloze záměrné přímky. Celý soubor měření byl získán na terase budovy B Fakulty stavební jen několik metrů od umístěné meteorologické

stanice. Při zpracování byla využita data z [10]. Jednalo se o soubory obsahující hodnoty teploty, atmosférického tlaku vzduchu a síly větru v době měření, kompletně jsou uvedeny v El. příloze č. 4.

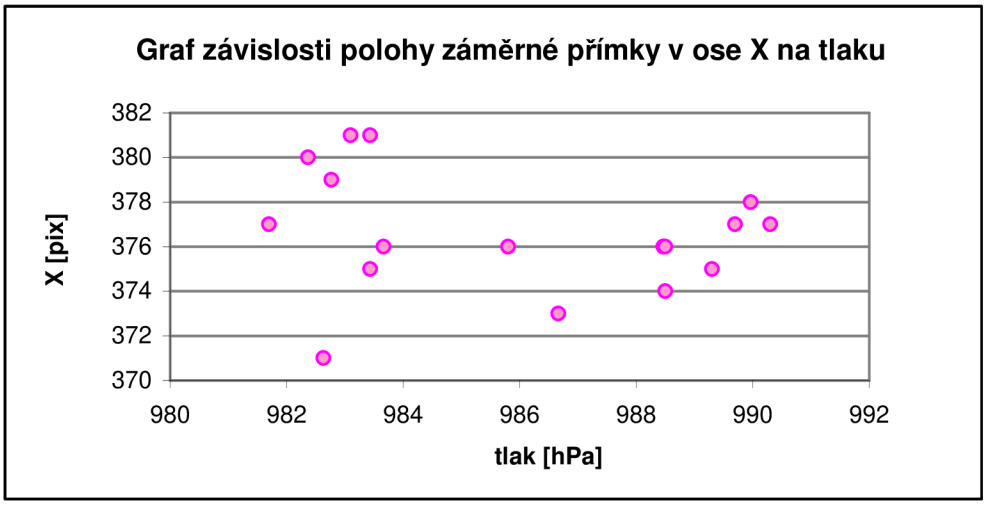
7.2.1 Vliv tlaku

Zkoumanou veličinou je v tomto případě atmosférický tlak, jehož výkyvy by mohly způsobit změnu v souřadnicích záměrné přímky a tím ovlivnit konečnou hodnotu zeměpisných souřadnic. Pro každé měření byl výsledný tlak počítán jako průměrná hodnota ze začátku, středu a konce měření, viz Tab. 7.5.

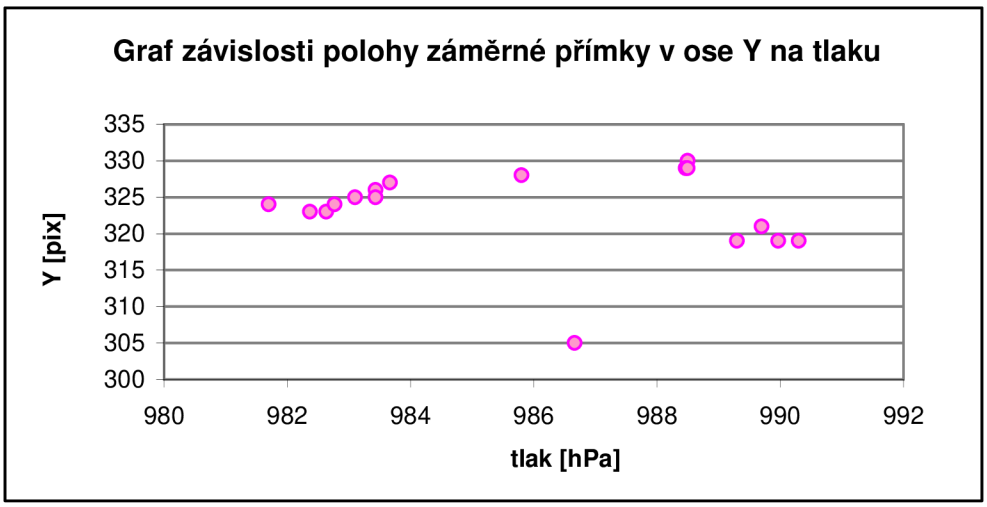
Datum měření	Měření v rámci noci	Tlak - P1 [hPa]	Tlak - P2 [hPa]	Tlak - P3 [hPa]	Tlak - P (průměr) [hPa]
27. 8. 2012	1.	988,9	988,2	988,4	**988,5**
27. 8. 2012	3.	988,4	988,5	988,5	**988,5**
27. 8. 2012	4.	988,4	988,2	988,9	**988,5**
29. 8. 2012	1.	985,7	985,7	986,0	**985,8**
3. 10. 2012	1.	983,9	983,2	983,2	**983,4**
3. 10. 2012	2.	983,2	983,9	983,9	**983,7**
17. 10. 2012	1.	986,2	986,9	986,9	**986,7**
22. 10. 2012	1.	989,2	989,2	989,5	**989,3**
22. 10. 2012	2.	989,7	989,7	989,7	**989,7**
22. 10. 2012	3.	990,0	989,9	990,0	**990,0**
22. 10. 2012	4.	990,0	990,0	990,9	**990,3**
22. 4. 2013	1.	981,9	981,5	981,7	**981,7**
22. 4. 2013	2.	982,0	982,9	982,2	**982,4**
22. 4. 2013	3.	982,5	982,7	982,7	**982,6**
22. 4. 2013	4.	982,7	982,9	982,7	**982,8**
22. 4. 2013	6.	982,9	983,2	983,2	**983,1**
22. 4. 2013	7.	983,2	983,4	983,7	**983,4**

Tab. 7.5 Průměrné hodnoty atmosférického tlaku

Z výsledků měření tlaku a kalibračního měření byly sestaveny grafy 7.7 a 7.8 znázorňující vzájemnou závislost změny polohy záměrné přímky obrazu a atmosférického tlaku. V grafech 7.9 a 7.10 je znázorněna změna zeměpisných souřadnic opět v závislosti na atmosférickém tlaku. Mezi všemi veličinami byla spočtena hodnota korelačního koeficientu podle vzorce *7.1*.



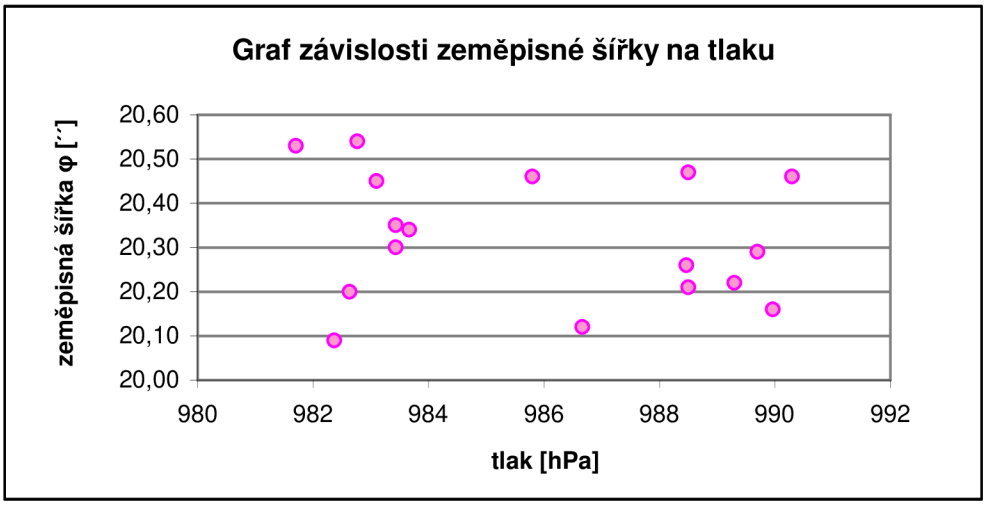
Graf 7.7



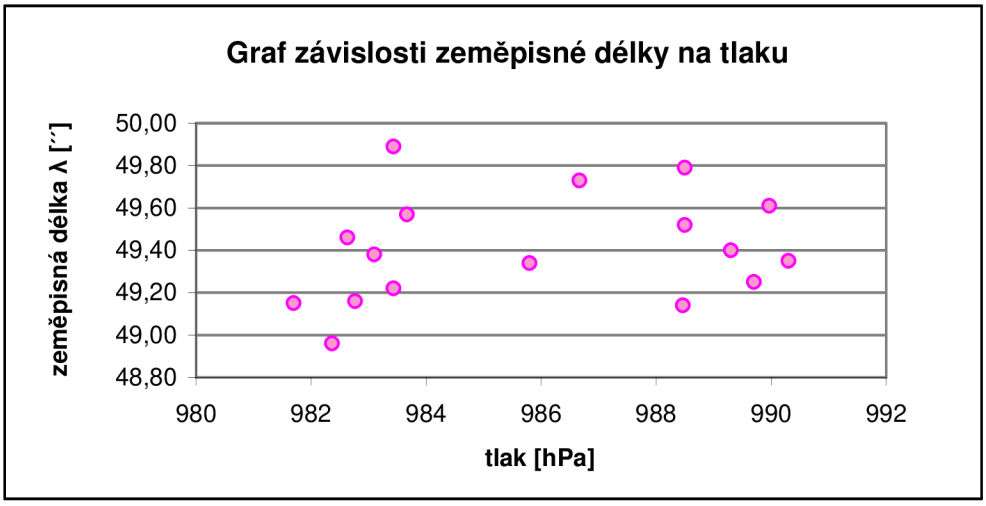
Graf 7.8

Korelační koeficient – Graf 7.7: $\rho_{x,y} = -0,2201$

Korelační koeficient – Graf 7.8: $\rho_{x,y} = -0,1834$



Graf 7.9



Graf 7.10

Korelační koeficient – Graf 7.9: $\rho_{x,y} = -0,2077$

Korelační koeficient – Graf 7.10: $\rho_{x,y} = -0,2388$

Hodnocení:

Z výše uvedených grafů lze vyvodit závěr, že změna atmosférického tlaku neovlivňuje systematickými vlivy konvenční polohu záměrné přímky obrazu. Korelační koeficienty svou velikostí rovněž prokazují, že se jedná spíše o velmi slabou až minimální závislost.

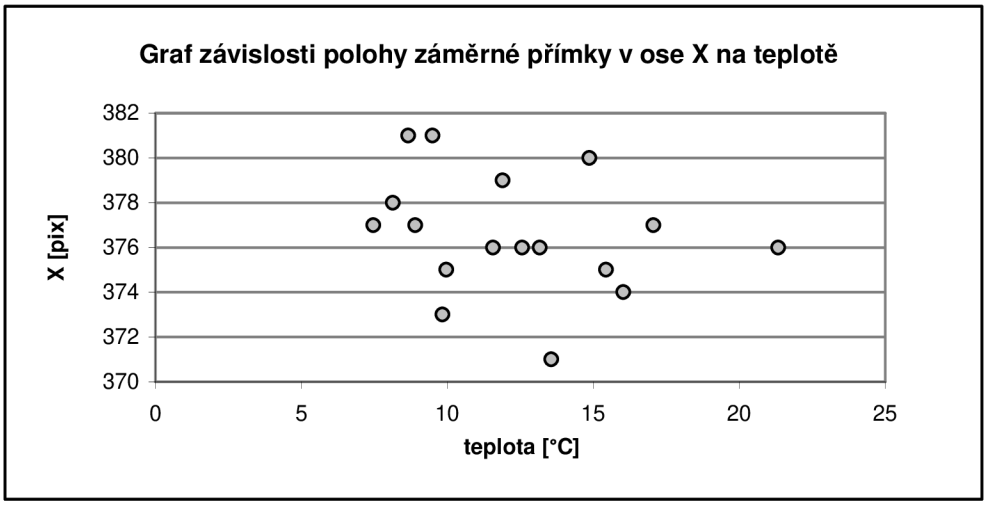
7.2.2 Vliv teploty

Zkoumanou veličinou je v tomto případě teplota, jejíž výkyvy by mohly stejně jako u atmosférického tlaku způsobit změnu v souřadnicích záměrné přímky a tím ovlivnit konečnou hodnotu zeměpisných souřadnic. Pro každé měření byla výsledná teplota počítána jako průměrná hodnota ze začátku, středu a konce měření, viz Tab. 7.6.

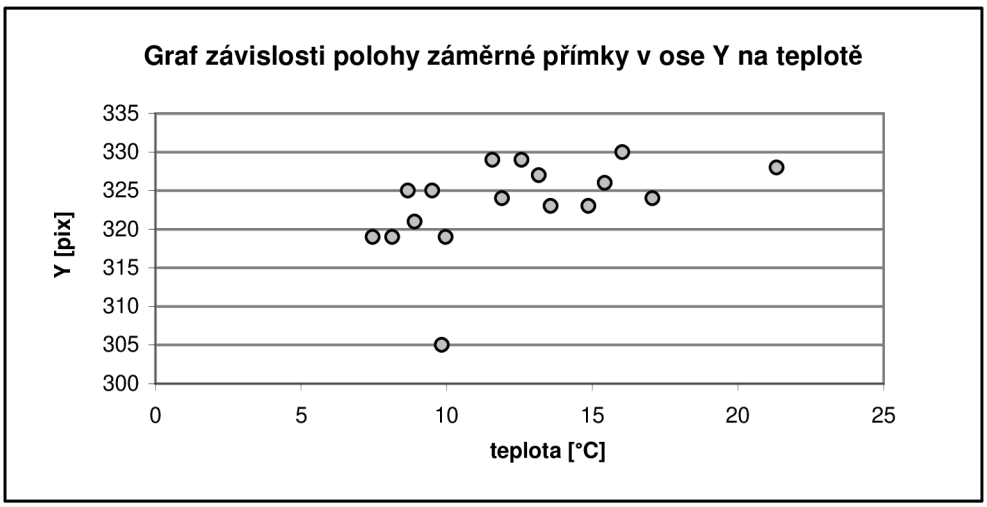
Datum měření	Měření v rámci noci	Teplota - T1 [°C]	Teplota - T2 [°C]	Teplota - T3 [°C]	Teplota - T (průměr)[°C]
27. 8. 2012	1.	16,7	16,3	15,1	**16,0**
27. 8. 2012	3.	12,8	12,6	12,3	**12,6**
27. 8. 2012	4.	11,8	11,6	11,3	**11,6**
29. 8. 2012	1.	22,7	21,3	20,0	**21,3**
3. 10. 2012	1.	16,0	15,5	14,8	**15,4**
3. 10. 2012	2.	13,8	13,1	12,6	**13,2**
17. 10. 2012	1.	10,1	9,8	9,6	**9,8**
22. 10. 2012	1.	10,3	10,0	9,6	**10,0**
22. 10. 2012	2.	9,1	8,8	8,8	**8,9**
22. 10. 2012	3.	8,3	8,1	8,0	**8,1**
22. 10. 2012	4.	7,8	7,5	7,1	**7,5**
22. 4. 2013	1.	18,2	17,0	16,0	**17,1**
22. 4. 2013	2.	15,3	15,0	14,3	**14,9**
22. 4. 2013	3.	13,8	13,6	13,3	**13,6**
22. 4. 2013	4.	12,6	12,0	11,1	**11,9**
22. 4. 2013	6.	9,6	9,6	9,3	**9,5**
22. 4. 2013	7.	8,6	8,8	8,6	**8,7**

Tab. 7.6 Průměrné hodnoty teploty

Z výsledků měření teploty a kalibračního měření byly sestaveny grafy 7.11 a 7.12 znázorňující vzájemnou závislost změny polohy záměrné přímky obrazu a teploty. V grafech 7.13 a 7.14 je znázorněna změna zeměpisných souřadnic opět v závislosti na teplotě. Mezi všemi veličinami byla spočtena hodnota korelačního koeficientu podle vzorce *(7.1)*.



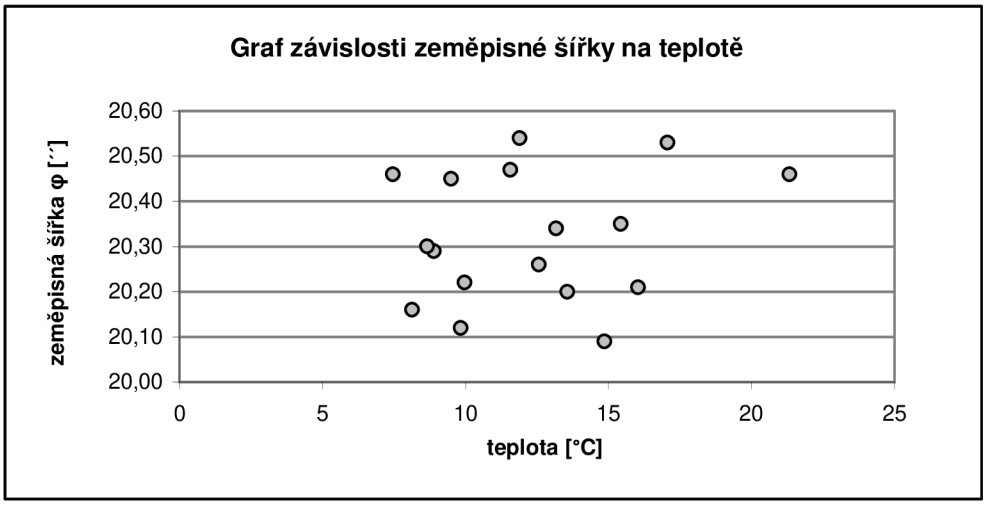
Graf 7.11



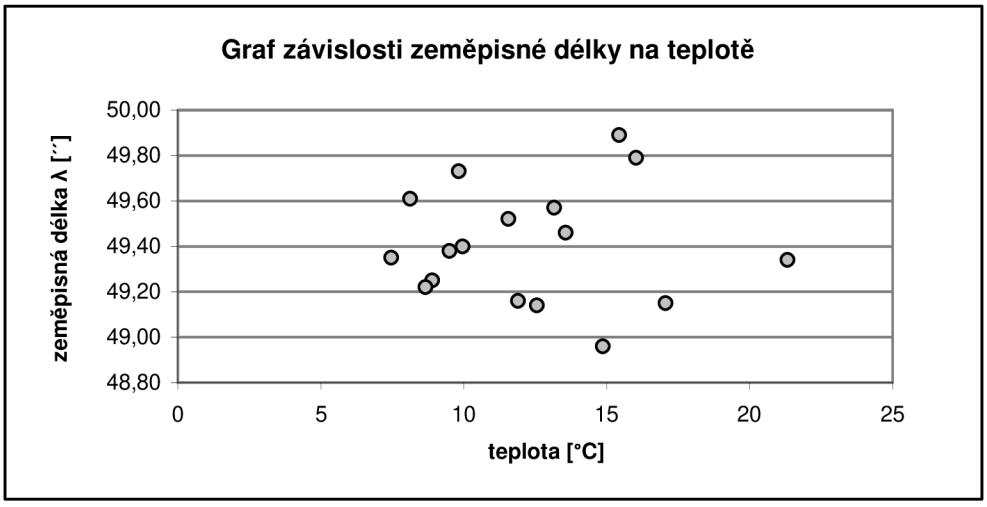
Graf 7.12

Korelační koeficient – Graf 7.11: $\rho_{x,y} = -0,2650$

Korelační koeficient – Graf 7.12: $\rho_{x,y} = 0,4810$



Graf 7.13



Graf 7.14

Korelační koeficient – Graf 7.13: $\rho_{x,y} = 0,1787$

Korelační koeficient – Graf 7.14: $\rho_{x,y} = 0,0037$

Hodnocení:

Z výše uvedených grafů lze stejně jako u atmosférického tlaku vyvodit závěr, že změna teploty neovlivňuje systematickými vlivy konvenční polohu záměrné přímky obrazu. Korelační koeficienty, kromě případu závislosti v grafu č. 7.12, svou velikostí rovněž prokazují, že se jedná spíše o velmi slabou závislost.

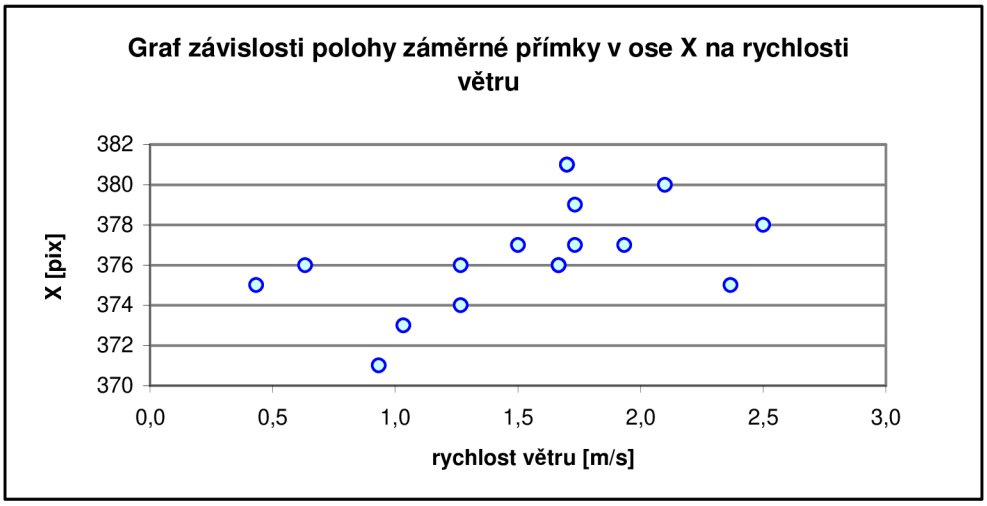
7.2.3 Vliv rychlosti větru

Zkoumanou veličinou je v tomto případě rychlost větru, jehož výkyvy by mohly způsobit změnu v souřadnicích záměrné přímky a tím ovlivnit konečnou hodnotu zeměpisných souřadnic. Pro každé měření byla výsledná rychlost větru počítána jako průměrná hodnota ze začátku, středu a konce měření, viz Tab. 7.7.

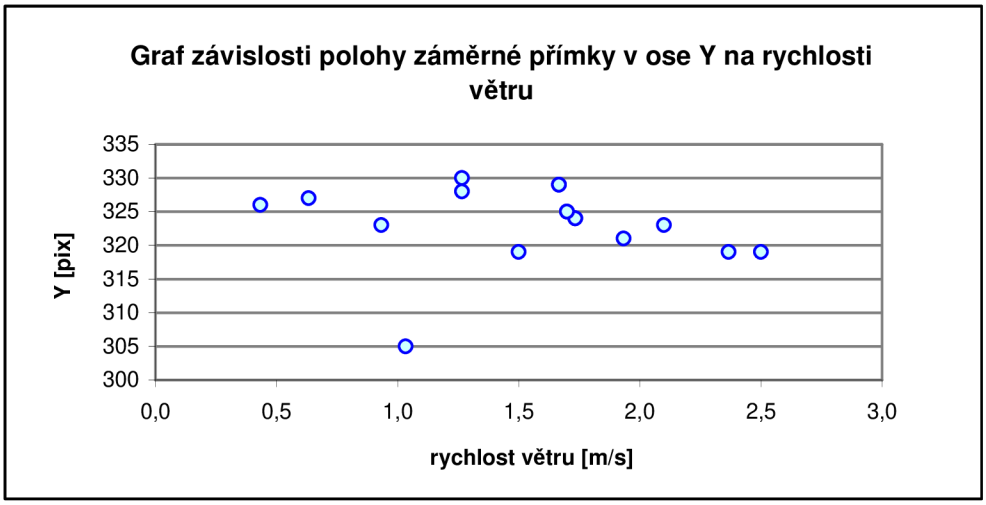
Datum měření	Měření v rámci noci	Síla větru - S1 [m/s]	Síla větru - S2 [m/s]	Síla větru - S3 [m/s]	Síla větru - S (průměr) [m/s]
27. 8. 2012	1.	1,1	0,9	1,8	**1,3**
27. 8. 2012	3.	2,7	0,8	1,5	**1,7**
27. 8. 2012	4.	1,7	1,1	2,2	**1,7**
29. 8. 2012	1.	0,8	1,1	1,9	**1,3**
3. 10. 2012	1.	0,2	0,4	0,7	**0,4**
3. 10. 2012	2.	0,6	0,4	0,9	**0,6**
17. 10. 2012	1.	1,4	1,2	0,5	**1,0**
22. 10. 2012	1.	2,0	2,2	2,9	**2,4**
22. 10. 2012	2.	2,0	2,5	1,3	**1,9**
22. 10. 2012	3.	2,2	2,8	2,5	**2,5**
22. 10. 2012	4.	1,7	1,5	1,3	**1,5**
22. 4. 2013	1.	1,1	2,3	1,8	**1,7**
22. 4. 2013	2.	2,4	2,0	1,9	**2,1**
22. 4. 2013	3.	1,3	0,4	1,1	**0,9**
22. 4. 2013	4.	1,7	1,5	2,0	**1,7**
22. 4. 2013	6.	2,0	1,3	1,8	**1,7**
22. 4. 2013	7.	1,9	1,8	1,4	**1,7**

Tab. 7.7 Průměrné hodnoty síly větru

Z výsledků měření síly větru a kalibračního měření byly sestaveny grafy 7.15 a 7.16 znázorňující vzájemnou závislost změny polohy záměrné přímky obrazu a síly větru. V grafech 7.17 a 7.18 je znázorněna změna zeměpisných souřadnic v závislosti na síle větru. Mezi všemi veličinami byla spočtena hodnota korelačního koeficientu podle vzorce *(7.1)*.



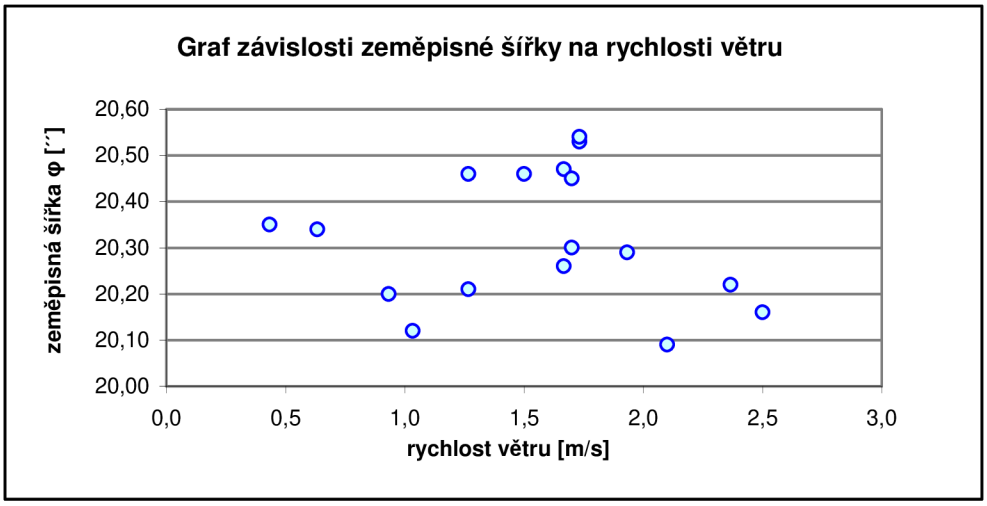
Graf 7.15



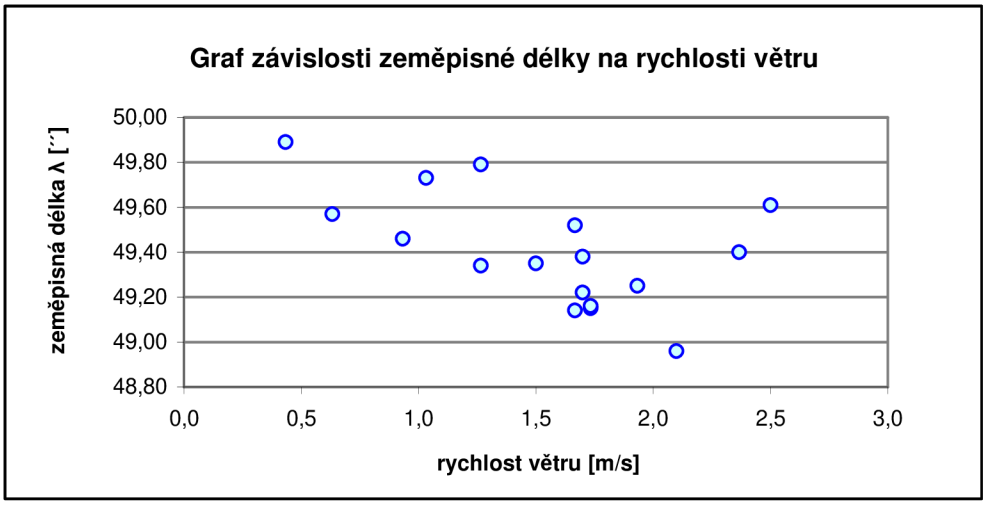
Graf 7.16

Korelační koeficient – Graf 7.15: $\rho_{x,y} = 0,5067$

Korelační koeficient – Graf 7.16: $\rho_{x,y} = -0,1196$



Graf 7.17



Graf 7.18

Korelační koeficient – Graf 7.17: $\rho_{x,y} = -0{,}1202$

Korelační koeficient – Graf 7.18: $\rho_{x,y} = -0{,}5409$

Hodnocení:

Z výše uvedených grafů lze stejně jako u atmosférického tlaku a teploty vyvodit závěr, že změna síly větru neovlivňuje systematickými vlivy konvenční polohu záměrné přímky obrazu. Korelační koeficienty, kromě případu závislosti v grafu 7.15 a 7.18, svou velikostí rovněž prokazují, že se jedná spíše o slabou závislost.

8 ZÁVĚR

Z výsledků testovacího měření je zřejmé, že k pohybům kamery uchycené na totální stanici dochází. V rámci noci jsou tyto pohyby řádově v jednotkách pixelů. Mezi jednotlivými nocemi jsou prokazatelně výraznější, ale jen v extrémních případech překračují hodnotu 10pixelů. Příloha č. 8 obsahuje grafické znázornění pohybu CCD snímače a tím i polohy záměrné přímky v průběhu testování.

Podle vyhotovených grafů nejsou astronomická zeměpisná šířka ani délka systematicky ovlivněny mechanickými vlivy. Korelační koeficient u grafu 7.3 nabývá hodnoty blízké 0,5, což naznačuje závislost. Lze ale předpokládat, že by se v případě robustnějšího souboru dat tato hodnota snižovala. Nesprávnou manipulací může docházet k výrazným výkyvům kamery, které by nemusely být po dlouhou dobu odhaleny. Přepravu a manipulaci se systémem MAAS – 1 je potřeba provádět citlivě a podle stanovených zásad. Zejména je potřeba dávat pozor na polohu dalekohledu totální stanice při zavírání přepravní krabice.

Z výsledků měření a jejich odchylek od průměru byly vypočteny střední chyby určení zeměpisných souřadnic. Střední chyba určení zeměpisné šířky $\mathbf{m_\varphi = 0{,}146''}$ a střední chyba určení zeměpisné délky $\mathbf{m_\lambda = 0{,}248''}$. Obě hodnoty odpovídají požadované přesnosti při měření a dají se srovnat s hodnotami získanými z předchozích prací prováděných systémem MAAS – 1.

Závislost změny konvenční polohy záměrné přímky na změnách atmosférických podmínek nebyla prokázána. Změny jsou poměrně malé a u teploty, tlaku ani rychlosti větru nebyl prokázán systematický vliv. Korelační koeficient u grafů 7.12, 7.15 a 7.18 nabývá hodnot blízkých 0,5, což naznačuje závislost. Stejně jako u mechanických vlivů lze předpokládat, že by se v případě robustnějšího souboru dat tato hodnota snižovala. Diference získaných astronomických zeměpisných souřadnic byly pravděpodobně způsobeny nahromaděním náhodných chyb stejného znaménka nebo jinou příčinou, která nebyla při měření ani zpracování odhalena.

Zavést postup určení konvenční polohy záměrné přímky před každým měřením by bylo užitečné, mohl by vést k odhalení velkých odchylek způsobených mechanickými vlivy. Jak již ale bylo zmíněno, dá se toto riziko minimalizovat dodržováním stanovených

zásad přepravy. Z toho důvodu nedoporučuji aplikovat podobný postup měření, jaký byl použit k získání potřebných dat v této práci. Tento úkon by prodloužil dobu nutnou pro změření minimálního počtu délkových a šířkových párů přibližně o 30 min, z nynější hodiny na hodinu a půl.

Z výše uvedených důvodů lze usoudit, že konstrukce uchycení CCD snímače k tělu totální stanice je vyhovující. Umožňuje rychlou montáž i demontáž a využití totální stanice pro jiné geodetické práce v době mimo astronomická měření. Nedoporučuji tudíž do konstrukce uchycení CCD snímače jakkoliv zasahovat.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A LITERATURY

[1] KABELÁČ, Josef; KOSTELECKÝ, Jan. *Geodetická astronomie 10*. Vyd. 2. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 254 s. ISBN 978-80-01-04322-6.

[2] HIRT, Christian; BÜRKI, Beat. Status of Geodetic Astronomy at the Beginning of the 21st Century. *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Universität Hannover*. 2006, č. 258, s. 81-99. Dostupné z: http://spatial.curtin.edu.au/local/docs/models/Hirt_Buerki2006_festschriftseeber.pdf

[3] JURČÍK, Josef. *Užití astronomické nivelace pro vytváření modelu kvazigeoidu*. Brno, 2012. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54376. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie.

[4] MACHOTKA, Radovan. Určování astronomických souřadnic: Metoda párů stejné výšky. *Geodetický a kartografický obzor: odborný a vědecký časopis Českého úřadu zeměměřického a katastrálního a Úradu geodézie, kartografie a katastra Slovenskej republiky*. Praha: Vesmír, 2005, 51(93), č. 12, s. 258-264. ISSN: 0016-7096. Dostupné z: http://archivnimapy.cuzk.cz/zemvest/cisla/Rok200512.pdf

[5] MACHOTKA, Radovan; VONDRÁK, Jiří. Využití motorizované totální stanice pro automatizaci astronomických měření. *Geodetický a kartografický obzor: odborný a vědecký časopis Českého úřadu zeměměřického a katastrálního a Úradu geodézie, kartografie a katastra Slovenskej republiky*. Praha: Vesmír, 2009, 55(97), č. 4, s. 87-92. DOI: 0016-7096. Dostupné z: http://archivnimapy.cuzk.cz/zemvest/cisla/Rok200904.pdf

[6] JALOVECKÝ, Martin. *Analýza přesnosti výsledků astronomického určení polohy*. Brno, 2012. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53987. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie.

[7] *Mapy.cz* [online]. Mapy.cz, s.r.o., 2011 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: http://mapy.cz/#x=16.593150&y=49.205903&z=17

[8] MACHOTKA, Radovan. *Využití metod geodetické astronomie pro určení převýšení lokálního kvazigeoidu*. Brno, 2004. Disertační práce. VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie.

[9] *International Earth Rotation and Reference Systems Service* [online]. Federal Agency for Cartography and Geodesy, 2010 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: http://www.iers.org/nn_11214/IERS/EN/DataProducts/EarthOrientationData/__Function/generischeTabelle__ID6.html?__nnn=true

[10] *TUBO* [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie, 2013 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: http://tubo.fce.vutbr.cz/new/meteoExport.asp

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

MAAS - 1	Mobilní automatizovaný astronomický systém č. 1
ETH	Švýcarský národní technologický institut *(Eidgenössische Technische Hochschule)*
CCD	Zařízení s vázaným náboji *(Charge-Coupled Device)*
AGS	Astronomicko-geodetické sítě
GA	Geodetická astronomie
GPS	Globální družicový polohový systém *(Global Positioning System)*
Glonass	Globální družicový polohový systém *(Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistěma)*
VLBI	Interferometrie s velmi dlouhou základnou *(Very Long Baseline Interferometry)*
SLR	SLR *(Satelite Laser Ranging)*
LLR	LLR *(Lunar Laser Ranging)*
TZK2–D	Přenosná zenitová kamera 2 – Digitalsystem *(Transportable Zenit-kamera 2 – Digitalsystem)*
DIADEM	Digitální systém pro měření tížnicových odchylek *(Digital Astronomical Deflection Measuring System)*
GNSS	Globální navigační satelitní systémy *(Global Navigation Satellite System)*
AGNES	Astronomicko-Geodeticko-Nivelační Experimentální Síť
ETRS	Evropský terestrický referenční systém *(European Terrestrial Reference Systém)*
GRS80	Geodetický referenční systém 1980 *(Geodetic Reference System 1980)*
Bpv	Balt po vyrovnání
USNO	Námořní observatoř spojených států *(The United States Naval Observatory)*

IERS	Mezinárodní služba pro rotaci Země *(International Earth Rotation and Reference Systems Service)*
φ	Astronomická zeměpisná šířka
λ	Astronomická zeměpisná délka
P_n	Severní pól
α	Rektascenze
δ	Deklinace
S	Greenwichský hvězdný čas
z	Zenitový úhel
c	Kolimační chyba
i	Sklon klopné osy
Δi	Vliv sklonu klopné osy na horizontální směr
Δc	Vliv kolimační chyby na horizontální směr
Δz_i	Vliv sklonu klopné osy na zenitový úhel
Δz_c	Vliv kolimační chyby na zenitový úhel
q	Příčná odchylka
m_r	Střední chyba zacílení
s	Délka základny
$\rho_{x,y}$	Korelační koeficient
$cov(X,Y)$	Kovariance
σ_x	Směrodatná odchylka měřených veličin x
σ_y	Směrodatná odchylka měřených veličin y
x_i	Hodnota měřené veličiny x
y_i	Hodnota měřené veličiny y
μ_x	Střední hodnota měřených veličin x

μ_y	Střední hodnota měřených veličin y
v_i	Oprava od průměru
n	Počet měření
m_φ	Empirická střední chyba určení zeměpisné šířky
m_λ	Empirická střední chyba určení zeměpisné délky

11 SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

Obr. 2.1 Zenitové kamerové TZK 1, 2, 3 [2] 10

Obr. 2.2 Digitální zenitové kamerové systémy DIADEM a TZK2-D 11

Obr. 3.1 Určení zeměpisných souřadnic 14

Obr. 3.2 Určení polohy zenitu Z pomocí vodorovných směrů 15

Obr. 3.3 Určení polohy zenitu Z pomocí zenitových vzdáleností 15

Obr. 4.1 Totální stanice GPT 9001A s instalovanou kamerou 21

Obr. 4.2 Schéma zapojení 22

Obr. 5.1 Určení polohy záměrné přímky na snímku 25

Obr. 6.1 Terasa Fakulty stavební VUT v Brně[7] 28

Obr. 6.2 Místopis bodu 29

Obr. 6.3 Příprava pozorovacího programu v PRIPR34.EXE 30

Obr. 6.4 Okno programu MSV3verzeA23.exe 32

Tab. 5.1 Poloha záměrné přímky v ose X na snímku 26

Tab. 5.2 Poloha záměrné přímky v ose Y na snímku 26

Tab. 7.1 Zeměpisné souřadnice a souřadnice záměrné přímky na snímku 35

Tab. 7.2 Odchylky souřadnic od průměru 39

Tab. 7.3 Zeměpisná šířka a odchylky od průměru 40

Tab. 7.4 Zeměpisná délka a odchylky od průměru 41

Tab. 7.5 Průměrné hodnoty atmosférického tlaku 42

Tab. 7.6 Průměrné hodnoty teploty 45

Tab. 7.7 Průměrné hodnoty síly větru 48

Graf 7.1 Graf závislosti zeměpisné šířky na změně polohy záměrné přímky v ose X 36

Graf 7.2 Graf závislosti zeměpisné šířky na změně polohy záměrné přímky v ose Y 36

Graf 7.3 Graf závislosti zeměpisné délky na změně polohy záměrné přímky v ose X 37

Graf 7.4 Graf závislosti zeměpisné délky na změně polohy záměrné přímky v ose Y 37

Graf 7.5 Graf změny zeměpisné délky v závislosti na čase 38

Graf 7.6 Graf změny polohy záměrné přímky v ose Y v závislosti na čase 39

Graf 7.7 Graf závislosti polohy záměrné přímky v ose X na tlaku 43

Graf 7.8 Graf závislosti polohy záměrné přímky v ose Y na tlaku 43

Graf 7.9 Graf závislosti zeměpisné šířky na tlaku 44

Graf 7.10 Graf závislosti zeměpisné délky na tlaku 44

Graf 7.11 Graf závislosti polohy záměrné přímky v ose X na teplotě 46

Graf 7.12 Graf závislosti polohy záměrné přímky v ose Y na teplotě 46

Graf 7.13 Graf závislosti zeměpisné šířky na teplotě 47

Graf 7.14 Graf závislosti zeměpisné délky na teplotě 47

Graf 7.15 Graf závislosti polohy záměrné přímky v ose X na rychlosti větru 49

Graf 7.16 Graf závislosti polohy záměrné přímky v ose Y na rychlosti větru 49

Graf 7.17 Graf závislosti zeměpisné šířky na rychlosti větru 50

Graf 7.18 Graf závislosti zeměpisné délky na rychlosti větru 50

12 SEZNAM TIŠTĚNÝCH A ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH

Příloha č. 1 Ukázka protokolu (*.prt)

Příloha č. 2 Ukázka protokolu (*.txt)

Příloha č. 3 Ukázka protokolu (*.tx1)

Příloha č. 4 Výpočet zeměpisné délky s fixní zeměpisnou šířkou 49°12´20,30´´

Příloha č. 5 Výpočet zeměpisné šířky s fixní zeměpisnou délkou 16°35´49,50´´

Příloha č. 6 Grafy zobrazující změnu zeměpisné délky v průběhu noci

Příloha č. 7 Grafy zobrazující změnu zeměpisné šířky v průběhu noci

Příloha č. 8 Graf pohybu kamery

El. příloha č. 1 Společný výpočet zeměpisné šířky i délky

El. příloha č. 2 Výpočet zeměpisné šířky s fixní zeměpisnou délkou

El. příloha č. 3 Výpočet zeměpisné délky s fixní zeměpisnou šířkou

El. příloha č. 4 Údaje o atmosférických podmínkách při měření

El. příloha č. 5 Archivace použitých verzí obslužných programů

El. příloha č. 6 Grafy a tabulky v elektronické podobě

El. příloha č. 7 Archivace fotografií z kalibračních měření

Ukázka protokolu (*.prt)

kod,	No,	magn,	azimut,	Text,	NCisl,	Setiny,	Slaba,	Soumer,	Uspesnost
31	858	5.1	V	0	0	0	0	0	100%
32	663	3.7	Z	0	0	0	0	0	100%
35	3611	5.0	J	0	0	0	0	0	100%
36	770	5.1	S	0	0	0	0	0	100%
37	1594	5.6	S	0	0	0	0	0	100%
43	760	5.4	J	0	0	0	0	0	100%
44	837	5.0	S	0	0	0	0	0	100%
47	3635	6.1	J	0	0	0	0	0	100%
48	3964	6.0	S	0	0	0	0	0	100%
51	1619	4.2	V	0	0	2	0	0	90%
52	684	5.3	Z	0	0	0	0	0	100%
53	3463	5.0	Z	0	0	0	0	0	100%
54	1616	5.4	V	0	0	0	0	0	100%
57	770	5.1	S	0	0	0	0	0	100%
58	1565	4.7	J	0	0	0	0	0	100%
61	3493	5.8	Z	0	0	0	0	0	100%
62	891	4.2	V	0	0	0	0	0	100%

Ukázka protokolu (*.txt)

```
-4   0.806592   49.205556   16.597222  1001
-1          18 12 12 580    3 10 2012    2  3 52 218
-5     907  18 13 36 250     45.4553  201.1430 -0.0016    379.3329
-1          18 18 18 103    3 10 2012    2  3 52 230
31     858  18 18 34 383     29.6479  301.8971 -0.0042    375.44  304.99 1  43 1 H_31_01
31     858  18 18 34 743     29.6479  301.8971 -0.0042    376.23  303.54 1  34 1 H_31_02
31     858  18 18 35 103     29.6479  301.8971 -0.0042    376.70  302.07 1  48 1 H_31_03
31     858  18 18 43 303     29.6208  301.9286 -0.0042    375.78  304.85 1  42 1 H_31_04
31     858  18 18 43 663     29.6208  301.9286 -0.0042    376.24  304.03 1  39 1 H_31_05
31     858  18 18 44  23     29.6208  301.9286 -0.0042    376.97  302.22 1  40 1 H_31_06
31     858  18 18 52 223     29.5940  301.9635 -0.0042    374.60  304.48 1  45 1 H_31_07
31     858  18 18 52 583     29.5940  301.9635 -0.0042    375.22  303.18 1  48 1 H_31_08
31     858  18 18 52 943     29.5940  301.9635 -0.0042    376.18  301.60 1  42 1 H_31_09
31     858  18 19  1 183     29.5678  301.9969 -0.0042    374.84  303.35 1  42 1 H_31_10
31     858   0  0  0   0     29.5678  301.9969 -0.0042    375.36  301.73 1  27 1 H_31_11
31     858  18 19  1 903     29.5678  301.9969 -0.0042    376.60  300.55 1  40 1 H_31_12
31     858  18 19 10 303     29.5395  302.0303 -0.0038    374.77  305.07 1  48 1 H_31_13
31     858  18 19 10 663     29.5395  302.0303 -0.0038    375.37  303.51 1  44 1 H_31_14
31     858  18 19 11  23     29.5395  302.0303 -0.0038    376.04  302.02 1  38 1 H_31_15
31     858  18 19 19 263     29.5119  302.0630 -0.0042    374.74  304.72 1  35 1 H_31_16
31     858  18 19 19 623     29.5119  302.0630 -0.0042    375.44  303.47 1  39 1 H_31_17
31     858  18 19 19 983     29.5119  302.0630 -0.0042    376.45  301.76 1  37 1 H_31_18
31     858  18 19 28 184     29.4840  302.0958 -0.0042    375.14  306.28 1  47 1 H_31_19
31     858  18 19 28 544     29.4840  302.0958 -0.0042    375.86  304.92 1  45 1 H_31_20
31     858  18 19 28 904     29.4840  302.0958 -0.0042    376.64  303.35 1  42 1 H_31_21
-1          18 19 30 584    3 10 2012    2  3 52 241
-1          18 19 52 104    3 10 2012    2  3 52 236
32     663  18 20  8 224     29.4865  109.2130 -0.0028    379.78  308.44 1  42 1 H_32_01
32     663  18 20  8 584     29.4865  109.2130 -0.0028    380.27  309.79 1  43 1 H_32_02
32     663  18 20  8 944     29.4865  109.2130 -0.0028    380.89  311.36 1  41 1 H_32_03
32     663  18 20 17 344     29.5137  109.2364 -0.0026    381.03  309.03 1  47 1 H_32_04
32     663  18 20 17 704     29.5137  109.2364 -0.0026    381.24  310.25 1  41 1 H_32_05
32     663  18 20 18  64     29.5137  109.2364 -0.0026    380.83  312.03 1  40 1 H_32_06
32     663  18 20 26 304     29.5398  109.2611 -0.0030    379.25  309.57 1  40 1 H_32_07
32     663  18 20 26 664     29.5398  109.2611 -0.0030    379.90  311.47 1  38 1 H_32_08
32     663  18 20 27  24     29.5398  109.2611 -0.0030    380.14  312.60 1  44 1 H_32_09
32     663  18 20 35 224     29.5671  109.2849 -0.0032    379.05  308.80 1  43 1 H_32_10
32     663  18 20 35 584     29.5671  109.2849 -0.0032    379.64  310.28 1  44 1 H_32_11
32     663  18 20 35 944     29.5671  109.2849 -0.0032    380.43  311.81 1  46 1 H_32_12
32     663  18 20 44 384     29.5940  109.3086 -0.0032    379.45  309.68 1  44 1 H_32_13
32     663  18 20 44 744     29.5940  109.3086 -0.0032    380.14  311.04 1  38 1 H_32_14
32     663  18 20 45 104     29.5940  109.3086 -0.0032    380.87  312.45 1  41 1 H_32_15
32     663  18 20 53 304     29.6207  109.3319 -0.0032    379.51  309.58 1  44 1 H_32_16
```

Ukázka protokolu (*.tx1)

3 10 2012 PxZenit: 7.50 PxHorizont: 8.24 Tilt: -0,0065

31	858	0.0	65914.383	29.69131	301.9254	-0.0042
31	858	0.0	65914.743	29.69022	301.9268	-0.0042
31	858	0.0	65915.103	29.68911	301.9277	-0.0042
31	858	0.0	65923.303	29.66410	301.9575	-0.0042
31	858	0.0	65923.663	29.66348	301.9584	-0.0042
31	858	0.0	65924.023	29.66212	301.9597	-0.0042
31	858	0.0	65932.223	29.63703	301.9903	-0.0042
31	858	0.0	65932.583	29.63605	301.9914	-0.0042
31	858	0.0	65932.943	29.63486	301.9932	-0.0042
31	858	0.0	65941.183	29.60998	302.0242	-0.0042
31	858	0.0	86400.000	29.60876	302.0251	-0.0042
31	858	0.0	65941.903	29.60787	302.0274	-0.0042
31	858	0.0	65950.303	29.58297	302.0575	-0.0038
31	858	0.0	65950.663	29.58180	302.0586	-0.0038
31	858	0.0	65951.023	29.58068	302.0598	-0.0038
31	858	0.0	65959.263	29.55511	302.0901	-0.0042
31	858	0.0	65959.623	29.55417	302.0914	-0.0042
31	858	0.0	65959.983	29.55288	302.0933	-0.0042
31	858	0.0	65968.184	29.52838	302.1237	-0.0042
31	858	0.0	65968.544	29.52735	302.1250	-0.0042
31	858	0.0	65968.904	29.52617	302.1265	-0.0042
32	663	0.0	66008.224	29.53247	109.2494	-0.0028
32	663	0.0	66008.584	29.53348	109.2503	-0.0028
32	663	0.0	66008.944	29.53466	109.2515	-0.0028
32	663	0.0	66017.344	29.56011	109.2751	-0.0026
32	663	0.0	66017.704	29.56102	109.2755	-0.0026
32	663	0.0	66018.064	29.56236	109.2747	-0.0026
32	663	0.0	66026.304	29.58662	109.2965	-0.0030
32	663	0.0	66026.664	29.58805	109.2977	-0.0030
32	663	0.0	66027.024	29.58889	109.2981	-0.0030
32	663	0.0	66035.224	29.61335	109.3199	-0.0032
32	663	0.0	66035.584	29.61445	109.3210	-0.0032
32	663	0.0	66035.944	29.61560	109.3224	-0.0032
32	663	0.0	66044.384	29.64091	109.3443	-0.0032
32	663	0.0	66044.744	29.64192	109.3456	-0.0032
32	663	0.0	66045.104	29.64297	109.3469	-0.0032
32	663	0.0	66053.304	29.66753	109.3677	-0.0032
32	663	0.0	66053.664	29.66855	109.3687	-0.0032
32	663	0.0	66054.024	29.66982	109.3693	-0.0032
32	663	0.0	66062.224	29.69442	109.3908	-0.0030
32	663	0.0	66062.584	29.69549	109.3915	-0.0030
32	663	0.0	66062.944	29.69680	109.3928	-0.0030
35	3611	0.0	66445.348	28.69812	10.4804	-0.0040
35	3611	0.0	66445.708	28.69823	10.4845	-0.0040

Výpočet zeměpisné délky s fixní zeměpisnou šířkou 49°12´20,30´´

Datum	Pár	λ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
23_8_1	93-94	16,59717	16	35	49,82	-0,41
	97-98	16,59721	16	35	49,97	-0,56
	107-108	16,59699	16	35	49,15	0,26
	117-118	16,59698	16	35	49,13	0,28
Datum	pár	λ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
27_8_1	35-36	16,59714	16	35	49,72	-0,31
	37-38	16,59720	16	35	49,91	-0,50
	41-42	16,59725	16	35	50,11	-0,70
	47-48	16,59718	16	35	49,83	-0,42
	51-52	16,59705	16	35	49,37	0,04
Datum	pár	λ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
27_8_3	153-154	16,59699	16	35	49,15	0,26
	155-156	16,59688	16	35	48,76	0,65
	159-160	16,59696	16	35	49,06	0,35
	161-162	16,59714	16	35	49,71	-0,30
	163-164	16,59686	16	35	48,68	0,73
	165-166	16,59702	16	35	49,27	0,14
Datum	pár	λ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
27_8_4	189-190	16,59711	16	35	49,61	-0,20
	195-196	16,59708	16	35	49,47	-0,06
	199-200	16,59709	16	35	49,54	-0,13
	201-202	16,59708	16	35	49,48	-0,07
	205-206	16,59713	16	35	49,65	-0,24
Datum	pár	λ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
29_8_1	27-28	16,59702	16	35	49,26	0,15
	29-30	16,59703	16	35	49,29	0,12
	31-32	16,59709	16	35	49,51	-0,10
	75-76	16,59699	16	35	49,16	0,25
	77-78	16,59716	16	35	49,76	-0,35
	81-82	16,59703	16	35	49,30	0,11
	85-86	16,59700	16	35	49,19	0,22
Datum	pár	λ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
3_10_1	31-32	16,59704	16	35	49,36	0,05
	51-52	16,59729	16	35	50,23	-0,82
	53-54	16,59717	16	35	49,82	-0,41
	61-62	16,59721	16	35	49,95	-0,54
Datum	pár	λ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
3_10_2	89-90	16,59703	16	35	49,32	0,09
	99-100	16,59712	16	35	49,63	-0,22
	103-104	16,59712	16	35	49,63	-0,22
	11-112	16,59713	16	35	49,66	-0,25
Datum	pár	λ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
17_10_1	45-46	16,59722	16	35	50,00	-0,59
	59-60	16,59707	16	35	49,44	-0,03
Datum	pár	λ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
22_10_1	11-12	16,59699	16	35	49,16	0,25
	15-16	16,59716	16	35	49,77	-0,36
	19-20	16,59713	16	35	49,68	-0,27
	31-32	16,59694	16	35	48,97	0,44

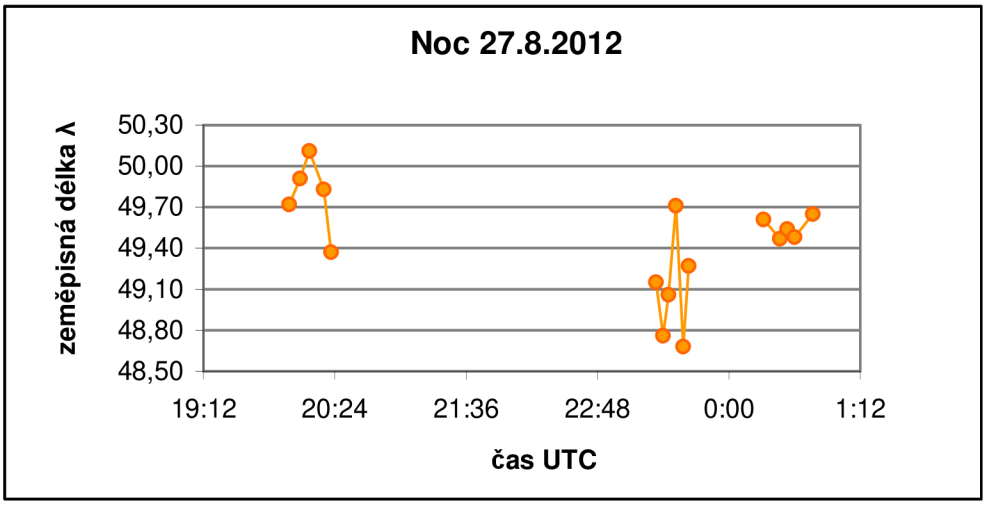
Datum	pár	λ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
22_10_2	65-66	16,59707	16	35	49,44	-0,03
	67-68	16,59702	16	35	49,26	0,15
	73-74	16,59700	16	35	49,20	0,21
	77-78	16,59699	16	35	49,18	0,23
	79-80	16,59699	16	35	49,18	0,23
Datum	pár	λ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
22_10_3	113-114	16,59717	16	35	49,82	-0,41
	117-118	16,59709	16	35	49,52	-0,11
	121-122	16,59717	16	35	49,80	-0,39
	125-126	16,59709	16	35	49,52	-0,11
Datum	pár	λ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
22_10_4	31-32	16,59714	16	35	49,72	-0,31
	37-38	16,59699	16	35	49,18	0,23
	55-56	16,59705	16	35	49,37	0,04
	61-62	16,59699	16	35	49,16	0,25
Datum	pár	λ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
22_04_1	41-42	16,59700	16	35	49,19	0,22
	43-44	16,59693	16	35	48,95	0,46
	51-52	16,59701	16	35	49,23	0,18
	57-58	16,59709	16	35	49,51	-0,10
Datum	pár	λ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
22_04_2	89-90	16,59694	16	35	48,97	0,44
	91-92	16,59689	16	35	48,79	0,62
	103-104	16,59704	16	35	49,33	0,08
	105-106	16,59695	16	35	49,01	0,40
Datum	pár	λ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
22_04_3	129-130	16,59710	16	35	49,57	-0,16
	133-134	16,59712	16	35	49,63	-0,22
	155-156	16,59704	16	35	49,35	0,06
	159-160	16,59703	16	35	49,31	0,10
Datum	pár	λ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
22_04_4	187-188	16,59701	16	35	49,23	0,18
	189-190	16,59702	16	35	49,26	0,15
	191-192	16,59709	16	35	49,54	-0,13
	199-200	16,59688	16	35	48,76	0,65
Datum	pár	λ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
22_04_6	21-22	16,59711	16	35	49,61	-0,20
	27-28	16,59709	16	35	49,52	-0,11
	35-36	16,59703	16	35	49,32	0,09
	39-40	16,59697	16	35	49,08	0,33
Datum	pár	λ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
22_04_7	7-8	16,59699	16	35	49,17	0,24
	15-16	16,59701	16	35	49,24	0,17
	19-20	16,59699	16	35	49,17	0,24
	29-30	16,59703	16	35	49,31	0,10

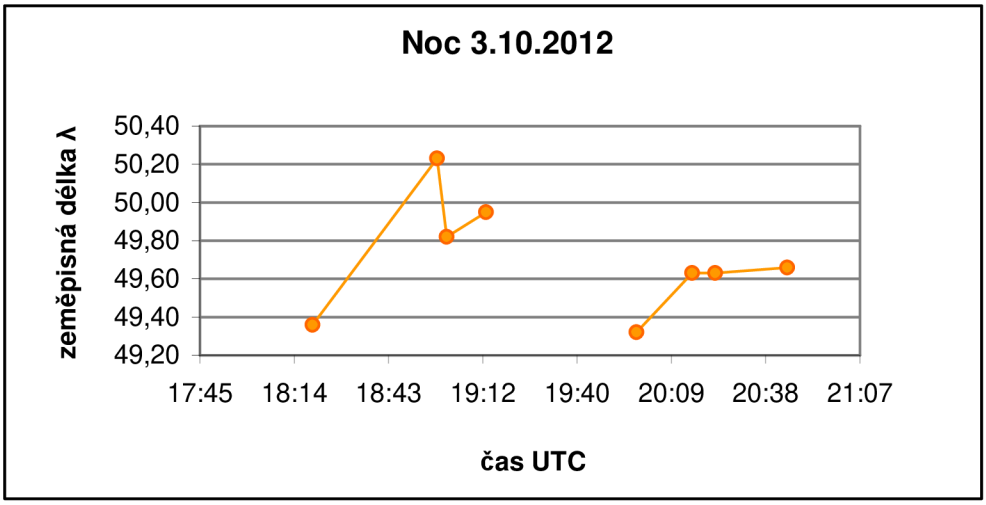
Výpočet zeměpisné šířky s fixní zeměpisnou délkou 16°35´49,50´´

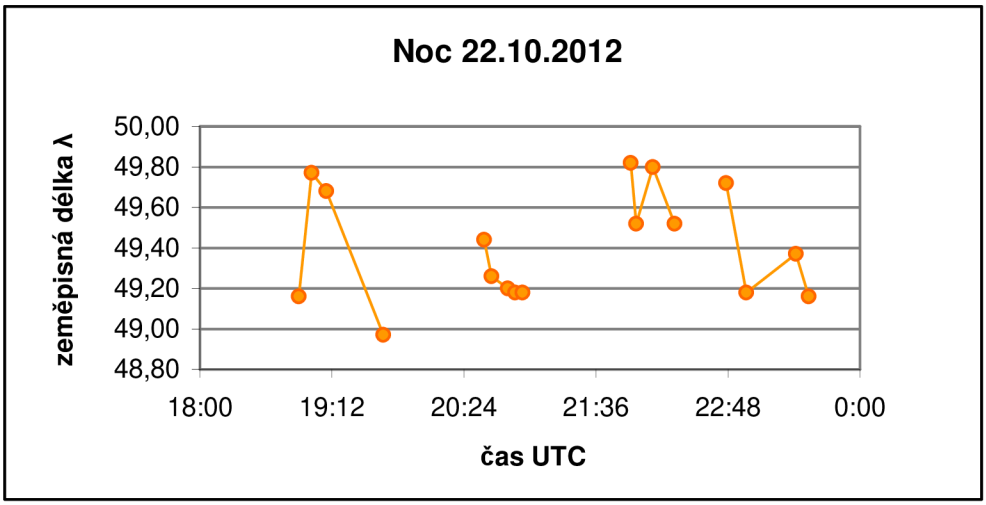
Datum	pár	φ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
23_8_1	65-66	49,20556	49	12	20,00	0,32
	81-82	49,20573	49	12	20,64	-0,32
	89-90	49,20569	49	12	20,49	-0,17
	109-110	49,20553	49	12	19,92	0,40
	113-114	49,20560	49	12	20,15	0,17
Datum	pár	φ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
27_8_1	43-44	49,20563	49	12	20,26	0,06
	55-56	49,20565	49	12	20,34	-0,02
	59-60	49,20555	49	12	19,98	0,34
	63-64	49,20556	49	12	20,01	0,31
	65-66	49,20565	49	12	20,34	-0,02
Datum	pár	φ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
27_8_3	139-140	49,20560	49	12	20,15	0,17
	143-144	49,20560	49	12	20,17	0,15
	145-146	49,20563	49	12	20,27	0,05
	151-152	49,20571	49	12	20,57	-0,25
Datum	pár	φ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
27_8_4	191-192	49,20560	49	12	20,17	0,15
	203-204	49,20574	49	12	20,66	-0,34
	207-208	49,20570	49	12	20,53	-0,21
	209-210	49,20573	49	12	20,64	-0,32
Datum	pár	φ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
29_8_1	39-40	49,20571	49	12	20,54	-0,22
	55-56	49,20574	49	12	20,66	-0,34
	59-60	49,20569	49	12	20,48	-0,16
	63-64	49,20560	49	12	20,17	0,15
	69-70	49,20571	49	12	20,57	-0,25
Datum	pár	φ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
3_10_1	35-36	49,20569	49	12	20,49	-0,17
	43-44	49,20575	49	12	20,71	-0,39
	47-48	49,20557	49	12	20,04	0,28
	57-58	49,20563	49	12	20,26	0,06
Datum	pár	φ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
3_10_2	85-86	49,20571	49	12	20,54	-0,22
	93-94	49,20559	49	12	20,14	0,18
	105-106	49,20565	49	12	20,35	-0,03
	107-108	49,20567	49	12	20,41	-0,09
Datum	pár	φ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
17_10_1	49-50	49,20559	49	12	20,13	0,19
	53-54	49,20564	49	12	20,31	0,01
	55-56	49,20555	49	12	19,97	0,35
	61-62	49,20557	49	12	20,04	0,28
Datum	pár	φ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
22_10_1	21-22	49,20559	49	12	20,12	0,20
	23-24	49,20566	49	12	20,37	-0,05
	29-30	49,20561	49	12	20,19	0,13
	35-36	49,20561	49	12	20,21	0,11

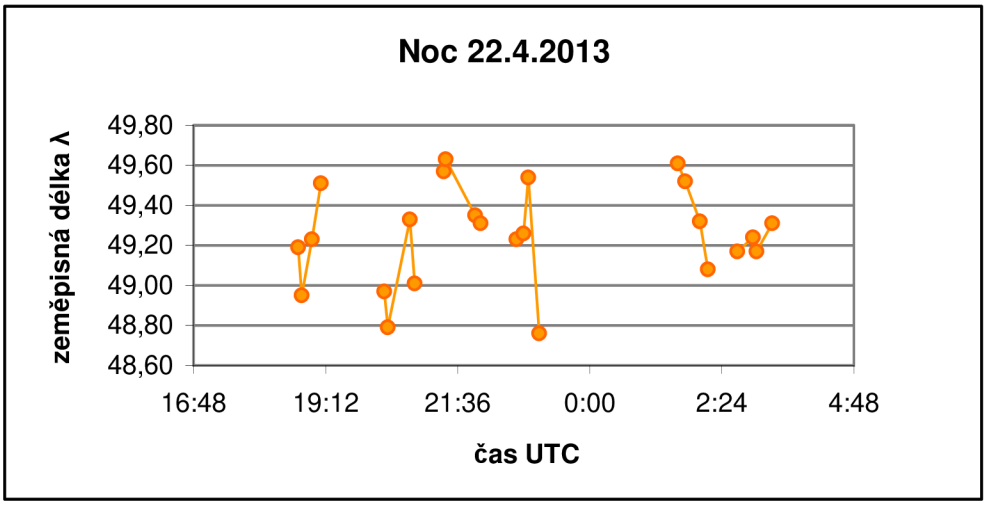
Datum	pár	φ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
22_10_2	57-58	49,20570	49	12	20,51	-0,19
	61-62	49,20563	49	12	20,27	0,05
	69-70	49,20561	49	12	20,20	0,12
	81-82	49,20559	49	12	20,11	0,21
Datum	pár	φ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
22_10_3	101-102	49,20559	49	12	20,11	0,21
	107-108	49,20572	49	12	20,60	-0,28
	119-120	49,20555	49	12	19,98	0,34
	123-124	49,20556	49	12	20,02	0,30
Datum	pár	φ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
22_10_4	35-36	49,20568	49	12	20,44	-0,12
	43-44	49,20566	49	12	20,39	-0,07
	47-48	49,20571	49	12	20,56	-0,24
	51-52	49,20567	49	12	20,42	-0,10
Datum	pár	φ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
22_04_1	47-48	49,20573	49	12	20,64	-0,32
	53-54	49,20566	49	12	20,39	-0,07
	59-60	49,20561	49	12	20,18	0,14
	63-64	49,20580	49	12	20,88	-0,56
Datum	pár	φ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
22_04_2	85-86	49,20566	49	12	20,38	-0,06
	87-88	49,20566	49	12	20,36	-0,04
	93-94	49,20553	49	12	19,89	0,43
	97-98	49,20550	49	12	19,80	0,52
Datum	pár	φ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
22_04_3	137-138	49,20559	49	12	20,11	0,21
	141-142	49,20562	49	12	20,22	0,10
	145-146	49,20561	49	12	20,20	0,12
	151-152	49,20563	49	12	20,27	0,05
Datum	pár	φ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
22_04_4	179-180	49,20570	49	12	20,51	-0,19
	183-184	49,20573	49	12	20,61	-0,29
	195-196	49,20564	49	12	20,30	0,02
	201-202	49,20576	49	12	20,73	-0,41
Datum	pár	φ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
22_04_6	15-16	49,20571	49	12	20,54	-0,22
	19-20	49,20560	49	12	20,16	0,16
	29-30	49,20575	49	12	20,69	-0,37
	33-34	49,20566	49	12	20,39	-0,07
Datum	pár	φ	°	´	´´	Odchylky od pr. [``]
22_04_7	9-10.	49,20566	49	12	20,38	-0,06
	11-12.	49,20564	49	12	20,32	0,00
	21-22	49,20567	49	12	20,41	-0,09
	25-26	49,20558	49	12	20,09	0,23

Grafy zobrazující změnu zeměpisné délky v průběhu noci

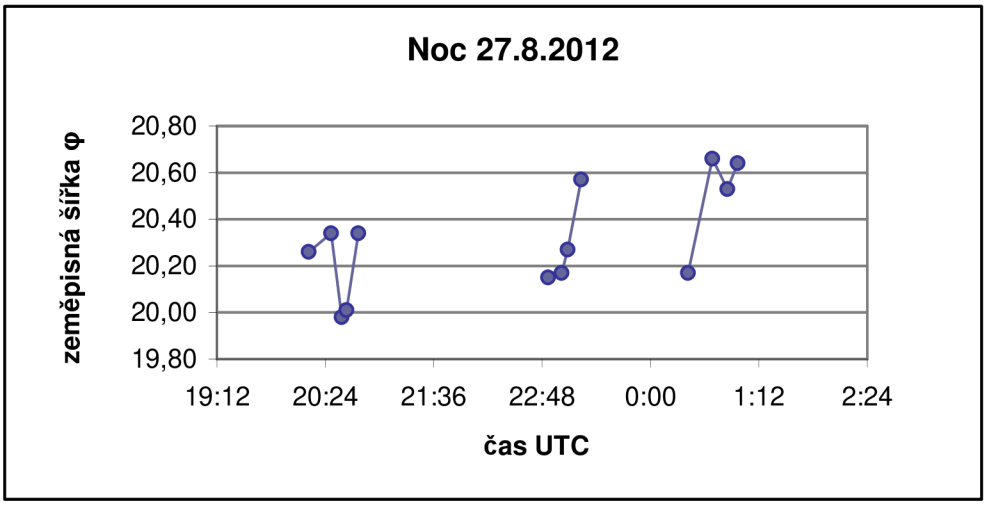


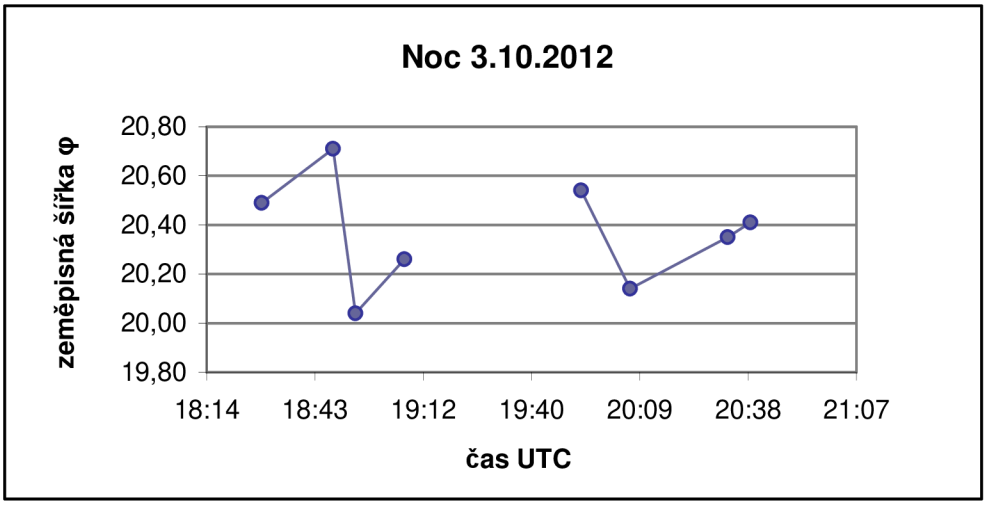


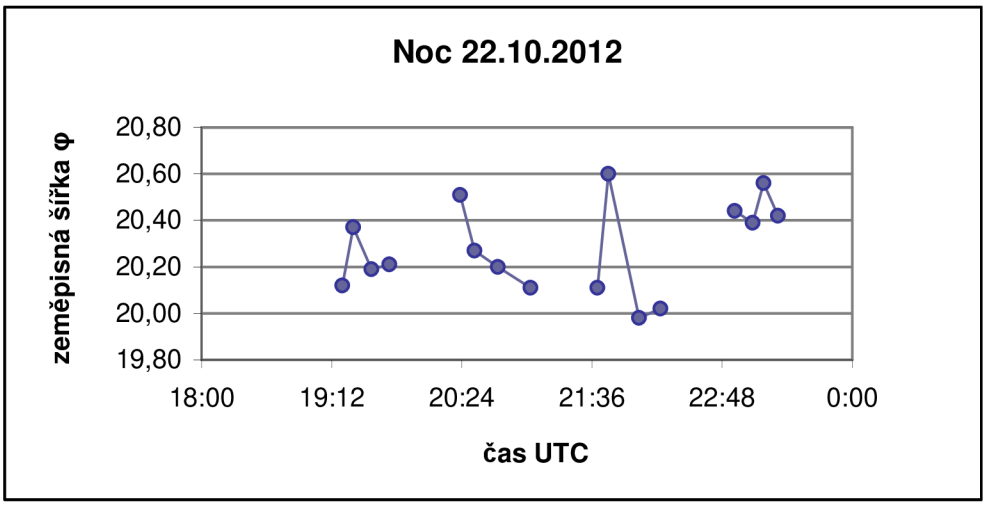


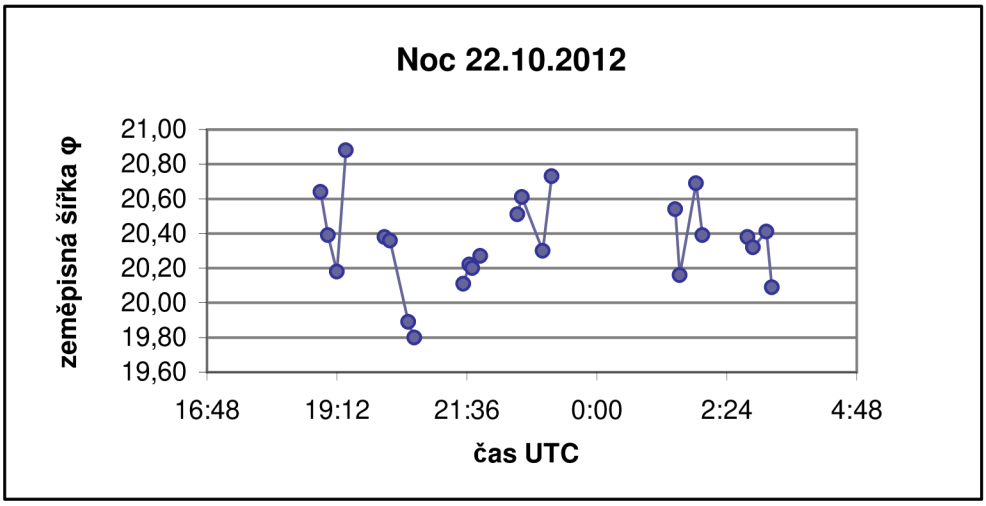
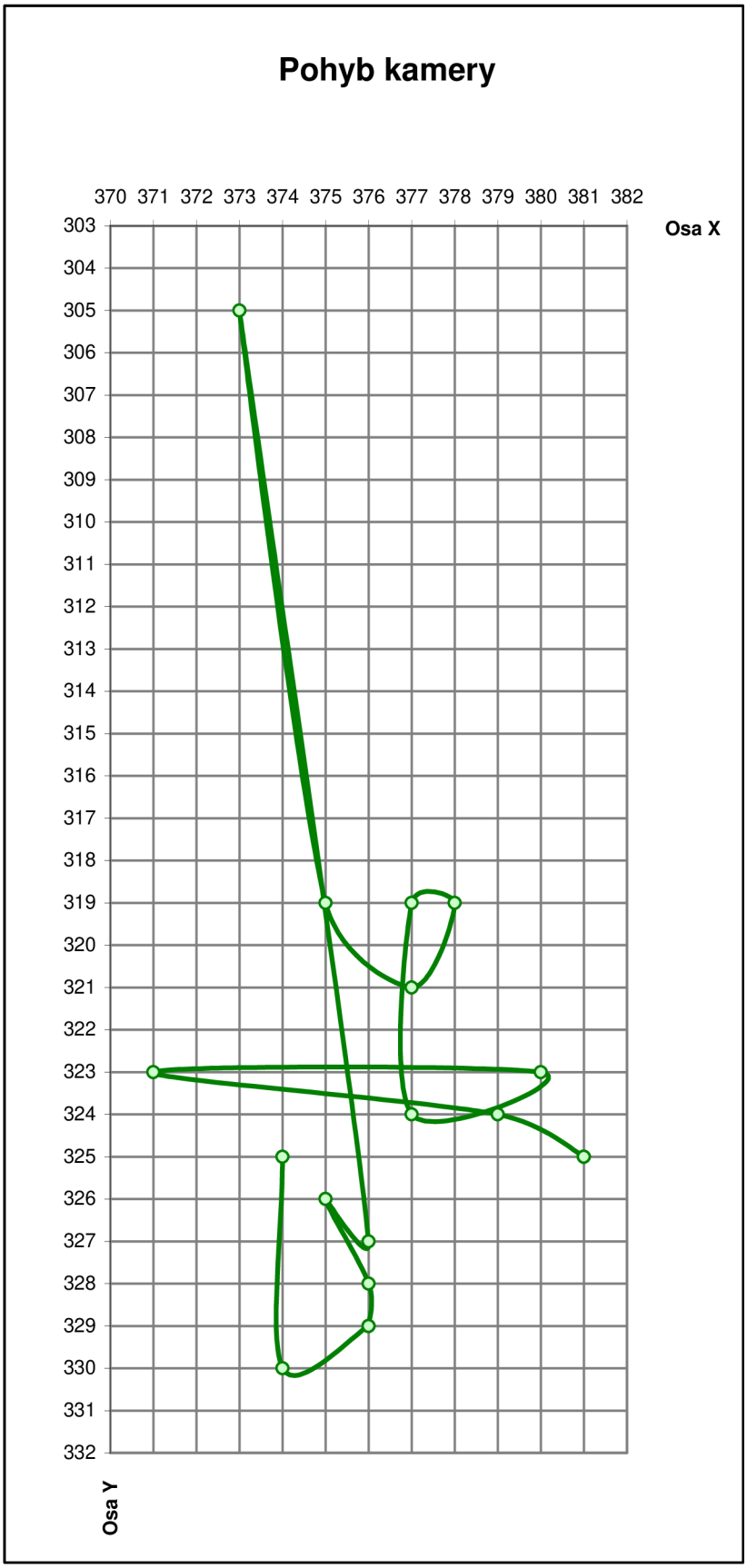

Noc 22.4.2013
zeměpisná délka λ
49,80
49,60
49,40
49,20
49,00
48,80
48,60
16:48
19:12
21:36
0:00
2:24
4:48
čas UTC

Grafy zobrazující změnu zeměpisné šířky v průběhu noci








Noc 22.10.2012
zeměpisná šířka φ
21,00
20,80
20,60
20,40
20,20
20,00
19,80
19,60
16:48
19:12
21:36
0:00
2:24
4:48
čas UTC

Graf pohybu kamery