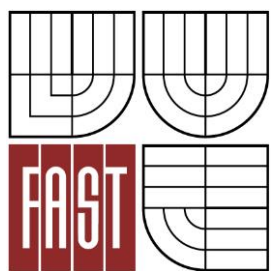




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV GEODÉZIE

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF GEODESY

PLÁNOVÁNÍ A ANALÝZA POHYBU ZAŘÍZENÍ PRO ABSOLUTNÍ KALIBRACI GNSS ANTÉN

MOVEMENT PLANNING AND ANALYSIS OF DEVICE FOR ABSOLUTE GNSS ANTENNA
CALIBRATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. TEREZA HYNČICOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. RADIM KRATOCHVÍL, Ph.D.

BRNO 2014



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 Hynčicová Tereza

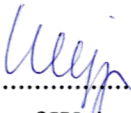
Název Plánování a analýza pohybu zařízení pro absolutní kalibraci GNSS antén

Vedoucí diplomové práce Ing. Radim Kratochvíl, Ph.D.

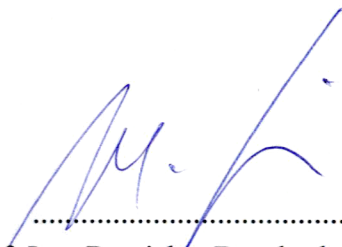
Datum zadání diplomové práce 30. 11. 2013

Datum odevzdání diplomové práce 30. 5. 2014

V Brně dne 30. 11. 2013


.....
doc. Ing. Josef Weigel, CSc.
Vedoucí ústavu




.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

1. Wübbena, G. - Schmitz, M. - Menge, F. - Böder, V. - Seeber, G. (2000) Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real-Time. Proceedings ION GPS 2000, Salt Lake City, USA.
2. Wubben, G. - Schmitz, M. - Boettcher, G. - Schumann, C. (2006) Absolute GNSS Antenna Calibration with a Robot: Repeatability of Phase Variations, Calibration of GLONASS and Determination of Carrier-to-Noise Pattern. Proceedings of the IGS Workshop, May 8-12, ESOC, Darmstadt, Germany.
3. Bilich, A. - Mader, G. (2010) GNSS Absolute Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. Proceedings ION GNSS 2010, Portland, USA.
4. Kalina, M. - Kratochvíl, R. - Kuruc, M. - Volařík, T. (2013) Polohovací zařízení pro kalibraci GNSS antén. Juniorstav 2013, Brno.

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

1. Seznamte se s problematikou absolutních kalibrací GNSS antén a s funkcí zařízení vyvíjeného pro tento účel na Ústavu geodézie.
2. Navrhněte vhodnou metodu a proveďte testování pohybových vlastností zařízení s důrazem na časovou synchronizaci pohybu.
3. Řešte problematiku plánování pohybu manipulačního ramene s GNSS anténou v závislosti na rozložení kalibračního měření.
4. Spolupracujte na implementaci zjištěných závěrů do prostředků softwarové podpory pohybu zařízení či výpočetního zpracování kalibračního měření.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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



Ing. Radim Kratochvíl, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce



Abstrakt

Předmětem práce je analýza a plánování pohybu robotického zařízení sloužícího k absolutní kalibraci GNSS antén, které je vyvíjeno od roku 2011 na Ústavu geodézie FAST VUT v Brně. První část práce je zaměřena na nezávislé ověření časové synchronizace pohybu zařízení, která je nutným předpokladem k úspěšnému procesu kalibrace antény. V další části jsou analyzovány pohybové vlastnosti zařízení, jejichž znalost je zásadní pro následné plánování pohybu. K oběma testovacím měřením byla využita metoda snímání pohybu robotického zařízení kamerou a vyhodnocení jeho polohy z pořízených snímků. Závěrečná část práce se zabývá plánováním pohybu, především vlivem zatížení ramene kalibrovanou anténou na pohybové vlastnosti zařízení, implementací zjištěných korekcí do observačního programu a plánováním pohybu polohovacího ramene s ohledem na rovnoměrné rozložení kalibračního měření.

Abstract

The thesis is aimed at movement analysis and planning of a robotic device for absolute GNSS antenna calibration, which is developed at Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Institute of Geodesy. The first section is devoted to independent verification of the temporal synchronization of the robotic device's movement, which is a prerequisite for the successful antenna calibration. The following section is focused on analysis of moveable characteristics since their knowledge is crucial for the following movement planning. Method of the device's movement shooting by camera and evaluation its position based on gained photographs is used for both testing measurements. The final part is dedicated to movement planning, especially to calibrated antenna weighting influence on device's movement characteristics, test results implementation into the observation program and arm movement planning considering the homogeneous calibration measurement layout.

Klíčová slova

Absolutní kalibrace GNSS antén, synchronizace času, NTP protokol, robotické zařízení, systém MAAS-1, zpracování digitálního obrazu

Keywords

Absolute GNSS antenna calibration, temporal synchronization, NTP protocol, robotic device, system MAAS-1, digital image processing



HYNČICOVÁ, T. *Plánování a analýza pohybu zařízení pro absolutní kalibraci GNSS antén*. Brno, 2014. 70 str., 12 příloh. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí diplomové práce Ing. Radim Kratochvíl, Ph.D.



Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 29. května 2014

.....
podpis autora

Bc. Tereza Hynčicová



Poděkování:

V první řadě děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Radimu Kratochvílovi, Ph.D. za připomínky, rady a čas strávený při měření a konzultování. Dále děkuji své spolužačce Bc. Kateřině Brátové za spolupráci při měření a Ing. Juraji Komačkovi za poskytnutí a úpravu softwaru na zpracování snímků a pomoc při řešení problémů s tím souvisejících.

V neposlední řadě také patří dík mým rodičům za podporu při studiu na vysoké škole a mému příteli za trpělivost a morální podporu při psaní této práce.

V Brně dne 29. května 2014

.....
podpis autora

Bc. Tereza Hynčicová



Obsah

1	Úvod	10
2	Kalibrace GNSS antén	12
2.1	Kalibrační metody	13
2.1.1	Relativní kalibrace	13
2.1.2	Absolutní kalibrace	14
2.1.2.1	Terénní absolutní kalibrace	14
2.1.2.1.1	Kalibrace dle Geo++	14
2.1.2.1.2	Kalibrace v NGS	19
2.1.2.2	Absolutní kalibrace v laboratorních podmínkách	20
2.1.2.2.1	Princip kalibrace v anechoické komoře	20
2.2	ANTINFO a ANTEX formát	21
2.2.1	Formát ANTINFO	21
2.2.2	Formát ANTEX	22
2.3	Argumenty pro provádění absolutních kalibrací antén	22
3	Časová synchronizace	25
3.1	Čas UTC a GPS čas	25
3.2	NPT protokol	26
3.3	Synchronizace času v operačním systému Linux	27
4	Zařízení pro absolutní kalibraci GNSS antén vyvíjené na Ústavu geodézie FAST VUT v Brně	29
4.1	Popis polohovacího zařízení pro absolutní kalibraci GNSS antén	29
5	Ověření časové synchronizace pohybu polohovacího ramene	32
5.1.1	Systém MAAS-1 doplněný SW pro vyhodnocení dynamických jevů	32
5.1.2	Vlastní testovací měření pro analýzu časové synchronizace pohybu	34
5.1.3	Analýza časové synchronizace zařízení prostřednictvím vyhodnocení snímků	35
5.1.3.1	Vyhodnocení časů zahájení a ukončení pohybů ze snímků	36
6	Plánování pohybu	39
6.1	Testování pohybových vlastností zařízení	39
6.1.1	2D projektivní prostor a projektivní transformace	39
6.1.1.1	Převod souřadnic mezi 2D Eukleidovským a 2D projektivním prostorem	40
6.1.1.2	Projektivní transformace	40
6.1.1.2.1	Robustní vyrovnání - metoda RANSAC	41
6.1.2	První testovací měření	43
6.1.3	Vyhodnocení dat získaných z prvního testovacího měření	46
6.1.4	Druhé testovací měření	48
6.1.5	Vyhodnocení dat získaných z druhého testovacího měření	49
6.1.6	Třetí testovací měření	52



6.1.7	Vyhodnocení dat získaných z třetího testovacího měření	52
6.2	Plánování pohybu s ohledem na zatížení ramene kalibrovanou anténou	56
6.3	Plánování pohybu s ohledem na čas potřebný ke změně pozice o daný úhel	57
6.4	Plánování pohybu s ohledem na rozložení kalibračního měření	59
7	Závěr	64
	Literatura	65
	Seznam zkratk	67
	Seznam obrázků	68
	Seznam tabulek	69
	Seznam příloh	70



1 Úvod

Je tomu již neuvěřitelných čtyřicet let, co byly v USA zahájeny práce na prvním globálním polohovém systému označovaném jako *NAVSTAR GPS* (NAVigation Signal Timing And Ranging Global Positioning System). Původně šlo o ryze vojenský systém založený na celosvětové síti umělých satelitů Země a světovém geocentrickém systému WGS-84 umožňující kdykoliv určit polohu místa na Zemi. Dlouho na sebe nenechal čekat ani ruský navigační družicový systém *GLONASS* vyvíjený v tehdejším Sovětském svazu, který byl oficiálně plně dokončen v roce 1995. Od té doby je pro satelitní systémy určování polohy užíván obecný název Global Navigation Satellite Systems a tomu náležící zkratka GNSS. Pozadu nezůstala ani Evropa, kde byl v roce 1999 soukromými investory z Německa, Francie, Itálie a Velké Británie naplánován evropský autonomní systém *Galileo*, který po jejich odstoupení od projektu z důvodu velkých rizik zaštitila Evropská unie s tehdy plánovaným termínem dokončení v roce 2012. Aby byl výčet kompletní, neměly by být opomenuty méně známé asijské systémy, a to čínský *Compass* vyvíjený od roku 2006 pod názvem *Beidou*, japonský lokální systém *QZSS* (Quasi-Zenith Satellite System), jehož vývoj byl schválen a započat v roce 2002, a indický lokální navigační systém *IRNSS* (Indian Regional Navigation Satellite System) připravovaný od roku 2006. (Hanák 2012)

Během posledních dvou dekád jsme zaznamenali markantní rozvoj ve využití GNSS v geodetických aplikacích (při budování geodetických sítí, vytyčování aj.) využívající princip relativního určování polohy založeném na existenci referenční aparatury měřící simultánně na bodě o známých souřadnicích. Nutností pro efektivní měření se jevílo vybudování sítě permanentních stanic, kterou pod názvem CZEPOS v roce 2006 dobudoval resort ČUZK. Tato síť či jiné podnikatelskou sférou vybudované sítě stanic jsou základním předpokladem pro geodetická měření s přesností na úrovni řádu mm až několika málo centimetrů v závislosti na zvolené metodě relativního měření.

Abychom však dosahovali co nejpřesnějších výsledků, je třeba uvážit několik systematických vlivů, jejichž opomenutí by mohlo vést k rapidnímu snížení přesnosti určení výsledné polohy. Jde o chyby spojené s družicí, přijímačem, místem měření či šířením signálu atmosférou. Významnou chybou spojenou s přijímačem je právě problematika znalosti přesné polohy tzv. fázového centra antény (APC, Antenna Phase Center) vůči tzv. referenčnímu bodu antény (ARP, Antenna Reference Point), kterou zjišťujeme relativní či absolutní kalibrací GNSS antén, čímž se tematicky dostáváme k meritu předkládané práce.

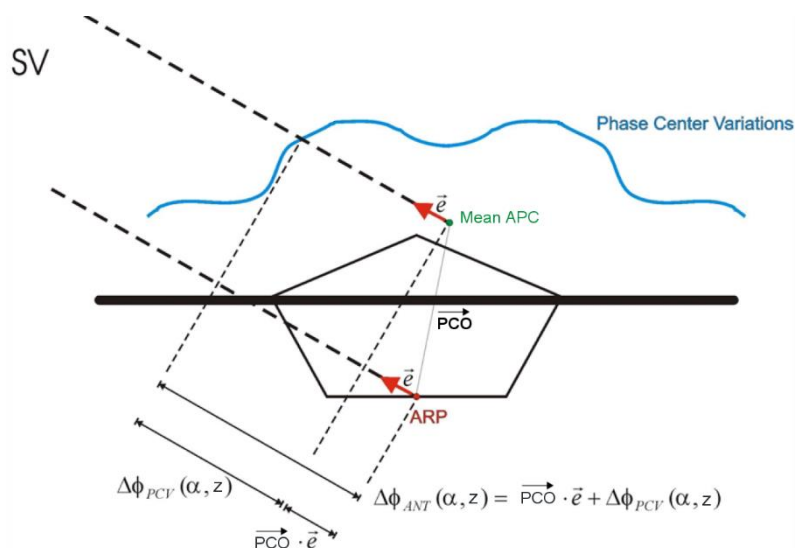
Náplní práce je výše zmíněná problematika absolutní kalibrace GNSS antén, konkrétně plánování a analýza pohybu polohovacího zařízení *StAnCa* (Station Antenna Calibration) vyvíjeného na Ústavu geodézie FAST VUT v Brně od roku 2011. Z důvodu absence uceleného česky psaného textu zabývajícího se kalibracemi antén je první část práce věnována přehledu metod kalibrací a popisu jejich



základního principu. Praktická část práce by měla potvrdit korektní časovou synchronizaci pohybu zařízení a otestovat jeho pohybové vlastnosti. V rámci práce by měla být taktéž řešena problematika plánování pohybu polohovacího ramene nesoucího testovanou anténu s ohledem na rovnoměrné rozložení kalibračního měření.

2 Kalibrace GNSS antén

Z pohledu uživatele je anténa důležitou součástí tzv. uživatelského segmentu, jelikož její úlohou je příjem signálů, jejichž vyhodnocením je určena její poloha. Přijetí signálů probíhá teoreticky v bodě - v tzv. **fázovém centru antény** (APC, Antenna Phase Center), jehož souřadnice se pak určují. Toto místo však není bodem v matematickém slova smyslu, protože jeho poloha je funkcí směru přijímaného signálu, a tedy jeho prostorová střední poloha a variace v závislosti na směru musí být pro jednotlivé směry určeny a vztaženy k pevně definovanému bodu. Tímto bodem je tzv. **referenční bod antény** (ARP, Antenna Reference Point), který je již fyzicky dosažitelným bodem a bývá definován jako průsečík svislé osy rotace antény (osa závitu) se spodní opracovanou plochou antény. ARP bývá také volen jako počátek lokálního referenčního souřadného systému antény, který je orientován pomocí značky na anténě (či vstupu kabelu) k severu. Charakteristiky antény určované právě procesem kalibrace pak popisují rozdíl v prostorové poloze mezi elektrickým fázovým (APC) a mechanickým centrem (ARP) antény v souřadném systému antény. Tento prostorový vztah bývá standardně definován dvěma hodnotami, a to tzv. **ofsetem fázového centra** PCO (Phase Center Offset), taktéž nazývaným středním fázovým centrem, a k němu přidruženým hodnotám **variací fázového centra** PCV (Phase Center Variation) pro konkrétní směry přijímaného signálu. Vztah těchto veličin je zřejmý z následujícího schématu.



Obr. 1: Střední fázové centrum a variace GNSS antény (na základě Wübbena, Schmitz et al. 2000)

Vektor PCO je standardně udáván jako N-E-U (North-East-Up) ofset od referenčního bodu a je určován jako průměr poloh fázového centra pro danou anténu, zatímco PCV jsou udávány ve zvolených krocích pro jednotlivé zenitové úhly či jsou funkcí jak zenitového úhlu, tak azimutu. Nutné je zdůraznit fakt, že poloha fázového centra antény je závislá na frekvenci přijímaného signálu. Znalost těchto hodnot pro konkrétní anténu poskytuje komplexní popis fázového zpoždění či urychlení příchozího



signálu vyvolaného anténou jako takovou, a tak umožňuje odstranit či rapidně minimalizovat chyby spojené s anténou a dosáhnout tak v dnešní době často požadované milimetrové přesnosti v určení polohy. (Bilich a Mader 2010)

2.1 Kalibrační metody

Počátky vývoje kalibračních metod datujeme již od 80. let minulého století. Během tohoto období bylo rozvinuto několik principiálně odlišných metod, které lze rozdělit na metody relativní a absolutní a metody terénní a laboratorní. Seřadíme-li tyto metody chronologicky dle jejich vzniku, téměř paralelním vývojem prošly metody relativní terénní kalibrace a metoda absolutní laboratorní kalibrace v tzv. anechoické komoře. Metoda absolutní terénní kalibrace byla v základech rozpracována (Wübbena, Menge et al. 1996) v závěsu za zmíněnými metodami mezi léty 1996-1998. Zmíněné kalibrační metody porovnává např. (Rothacher 2001).

2.1.1 Relativní kalibrace

V případě této metody jsou ofset a variace fázového centra pro testovanou anténu určeny vzhledem, tedy relativně, k tzv. referenční anténě, již je přiřazena sice hodnota PCO, ale její PCV jsou zcela zanedbány a položeny rovny nule. Jako referenční anténa je běžně využívána choke ring anténa typu Dorne Margolin. Kalibrace je prováděna ve dvaceti čtyř hodinovém bloku na krátké základně na obou stranách vymezené pilíři, jejichž souřadnice jsou předem určeny s vysokou přesností. Na jednom pilíři je umístěna testovaná anténa a na druhém anténa referenční. Jelikož obě antény přijímají signály v klidu, je rozložení přijatých dat závislé pouze na konstelaci satelitů. V datovém pokrytí se navíc objevuje typické prázdné místo v severní oblasti (tzv. northern hole) či nižší hustota dat v oblasti horizontu. Vzhledem k ovlivnění procesu kalibrace vícecestným šířením signálu (MP, Multi Path effect) je nesnadné odhadnout azimutální závislost daného fázového modelu či dokonce PCV jako takových pro hodnoty elevačního úhlu nižší jak 10° . V těchto oblastech podél horizontu je určení PCV navíc ztíženo i dlouhým průchodem signálu atmosférou. PCV získané touto metodou bývají většinou určovány jen jako funkce zenitového úhlu přijatého signálu. Zanedbávají tedy azimutální závislost, která však u některých typů antén může být již na první pohled zřejmá (viz kapitola 2.3). Z výše popsaného vyplývá, že výsledky relativní kalibrace jsou zatíženy chybou způsobenou referenční anténou a vnášíjí do GNSS měření systematické chyby. I z těchto důvodů byl v listopadu 2006 realizován Mezinárodní GNSS službou oficiální přechod z relativní kalibrace na absolutní. (Wübbena, Schmitz et al. 2000; Schmitz, Wübbena et al. 2008; Bilich a Mader 2010).

Více informací o relativních kalibracích lze najít např. v (Mader 1999).



2.1.2 Absolutní kalibrace

Vzhledem ke zmíněným nedostatkům relativní kalibrace na sebe vznik nového přístupu nenechal dlouho čekat a na několika pracovištích se začala vyvíjet nová metoda tzv. absolutní kalibrace. Mezi současná specializovaná pracoviště zabývající se absolutní kalibrací GNSS antén patří německá společnost Geo++ ve spolupráci s Univerzitou v Hannoveru, americká organizace National Geodetic Survey (NGS), obě zabývající se terénní kalibrací, a např. německý tým specialistů z Univerzity v Bonnu (absolutní kalibrace v anechoické komoře).

2.1.2.1 Terénní absolutní kalibrace

Vznik metody se odvíjel dle (Wübbena, Menge et al. 1996) od principiálního vyřešení dvou zásadních problémů souvisejících s procesem kalibrace. V první řadě bylo nutné eliminovat vliv PCV referenční antény na výsledné parametry testované antény tak, aby byly určeny naprosto nezávisle. Nezávislosti parametrů testované antény je dosaženo přijmem těchto signálů oběma anténami z různého směru, což zajišťuje pohyb (natáčení) testované antény na robotickém rameni jak kolem vertikální, tak horizontální osy. Jako neméně důležitá se jevila i záležitost oddělení vlivu vícecestného šíření signálu, hlavního zdroje chyb v procesu kalibrace, od vlivu PCV a jeho redukce či kompletní odstranění. Na koncepcích pracovišť řešících problematiku absolutních terénních kalibrací si blíže vysvětlíme jejich podstatu.

2.1.2.1.1 Kalibrace dle Geo++

Již v roce 1996 byl pod záštitou společnosti Geo++ publikován prvotní koncept metody absolutní kalibrace (Wübbena, Menge et al. 1996) založený na využití krátké základny, příjmu skutečných signálů GPS, speciálního upevnění testované antény zajišťující její pohyb, přístupu k odstranění MP efektu a následném zpracování přijatých signálů. Princip odstranění vlivu MP využívá opakujícího se charakteru jeho „chování“ na daném stanovišti a stejné konstelace satelitů na oběžných drahách s periodou jednoho středního hvězdného dne. GPS observace vzájemně posunuté o hvězdný den jsou navzájem odečteny, čímž dochází k eliminaci všech chyb opakujících se po oba dny, tedy i chyby z vícecestného šíření signálů. Touto diferenciací však dojde za předpokladu stejného natočení antén po oba dva dny i ke kompletnímu odstranění geometrické informace a variací fázového centra z rovnic fázového měření. Jestliže lze zapsat linearizovanou rovnici fázového měření v metrech jako:

$$\mathbf{l}_{\Phi i}^j = \mathbf{a}_i^j * \mathbf{x}_i^j + \mathbf{c}_0(dt_i - dT^j) - \lambda * N_i^j - \mathbf{d}_{ION i}^j + \mathbf{d}_{TROP i}^j + \mathbf{d}_{MP i}^j + \mathbf{d}_{PCV i}^j + \varepsilon_{\Phi}, \text{ kde je} \quad (2.1)$$

\mathbf{a}_i^j submatice matice plánu

\mathbf{x}_i^j vektor přírůstků neznámých (souřadnic)

$dt_i(dT^j)$ chyba hodin přijímače (družice) převedená do metrické míry pomocí rychlosti světla c_0
 N_i^j ambiguita převedená do metrické míry pomocí vlnové délky λ
 $d_{ION i}^j(d_{TROP i}^j, d_{MP i}^j, d_{PCV i}^j)$ chybový člen pro ionosféru (troposféru, vícecestné šíření signálu a variace fázového centra)
 ε_ϕ šum,

pak difference mezi epochami (vzdálenými o jeden průměrný hvězdný (SIDereal) den) je:

$$\delta^{SID} l_{\phi i}^j = c_0(\delta^{SID} dt_i - \delta^{SID} dT^j) - \lambda * \delta^{SID} N_i^j - \delta^{SID} d_{ION i}^j + \delta^{SID} d_{TROP i}^j + \delta^{SID} \varepsilon_\phi. \quad (2.2)$$

Dvojnásobnou diferenciací (přijímač-přijímač, družice-družice) ze vztahu vylidnujeme i chyby korekcí hodin a atmosféry:

$$\nabla\Delta\delta^{SID} l_{\phi i,k}^{j,l} = -\lambda * \nabla\Delta\delta^{SID} N_{i,k}^{j,l} + \nabla\Delta\delta^{SID} \varepsilon_\phi. \quad (2.3)$$

Abychom tedy získali informaci o fázovém chování testované antény, musí docházet ke změnám v její poloze, čímž dojde i ke změnám v jejím fázovém chování. Princip demonstrujeme na jednoduchém příkladu, kde referenční anténa zůstává fixovaná po oba dny observace, zatímco u testované antény proběhne mezi jednotlivými dny změna horizontální orientace o 180°. V tomto případě obdržíme pro rotující anténu difference mezi epochami a tomu příslušující dvojnásobné difference ve tvaru:

$$\delta^{SID} l_{\phi i}^j = c_0(\delta^{SID} dt_i - \delta^{SID} dT^j) - \lambda * \delta^{SID} N_i^j - \delta^{SID} d_{ION i}^j + \delta^{SID} d_{TROP i}^j + d_{PCV i}^j - d_{PCV i}^{180 j} + \delta^{SID} \varepsilon_\phi, \quad (2.4)$$

$$\nabla\Delta\delta^{SID} l_{\phi i,k}^{j,l} = -\lambda * \nabla\Delta\delta^{SID} N_{i,k}^{j,l} + \nabla\Delta d_{PCV i,k}^{0,180 j,l} + \nabla\Delta\delta^{SID} \varepsilon_\phi. \quad (2.5)$$

V porovnání s rovnicí dvojitých diferencí (2.3), se v rovnici (2.5) objevuje navíc člen $\nabla\Delta d_{PCV}$ reprezentující PCV testované antény. Změny v orientaci testované antény, zatímco referenční anténa zůstává v klidu, tedy vytvářejí fázové difference nezávislé na referenční anténě, a proto mohou být použity k modelování absolutních PCV testované antény. Pro úspěšné řešení je nezbytné, aby testovaná anténa byla upevněna na polohovacím zařízení, které je nutné přesně kalibrovat a zjištěné korekce zavést do matematického modelu, umožňující krokové natáčení kolem její svíslé i vodorovné osy. Polohovací zařízení užívané v této fázi vývoje je zobrazeno na obr. 2.



Obr. 2: První fáze vývoje polohovacího zařízení (Wübbena, Menge et al. 1996)



Obr. 3: Druhá fáze vývoje polohovacího zařízení (Wübbena, Schmitz et al. 2000)

Výsledná kombinace všech fázových diferencí vzniklých z rotovaných a nakloněných pozic antény pak definuje výsledné parametry antény. Jinak řečeno, difference $\nabla\Delta d_{PCV}$ mezi nulovou výchozí pozicí referenčního dne a tomu příslušející narotovanou pozicí ze dne druhého slouží jako zdroje dat pro určení fázových charakteristik prostřednictvím sférických harmonických funkcí:

$$d_{PCV}(\alpha, z) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n (A_{nm} \cos(m\alpha) + B_{nm} \sin(m\alpha)) P_{nm}(\cos z), \text{ kde jsou} \quad (2.6)$$

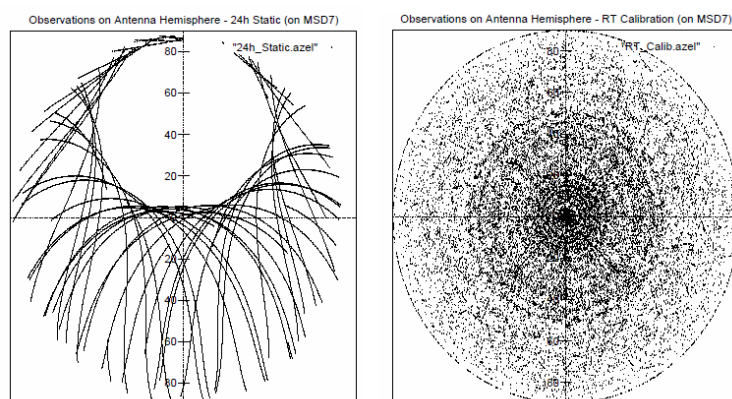
A_{nm}, B_{nm} normované harmonické koeficienty

P_{nm} normované přidružené Legendrovy funkce

α, z azimut a zenitový úhel příslušející pozici družice v souřadnicovém systému antény.

Výsledné hodnoty PCO a PCV jsou určeny společně robustním vyrovnaním. Podrobnější popis principu řešení lze nalézt v (Wübbena, Menge et al. 1996; Menge, Seeber et al. 1998).

Tato metoda byla dále rozpracována (Wübbena, Schmitz et al. 2000) a dospěla až do druhé vývojové úrovně představované automaticky řízeným kalibrovaným robotem, viz obr. 3, vystavující anténu do několika tisíců poloh a systémem vyhodnocující její charakteristiky v reálném čase. Rozdíly v pokrytí hemisféry antény signály mezi pohybující se anténou (vpravo) a anténou ve statické pozici (vlevo) při dvaceti čtyř hodinové observaci jsou zřejmé z následujícího obrázku.



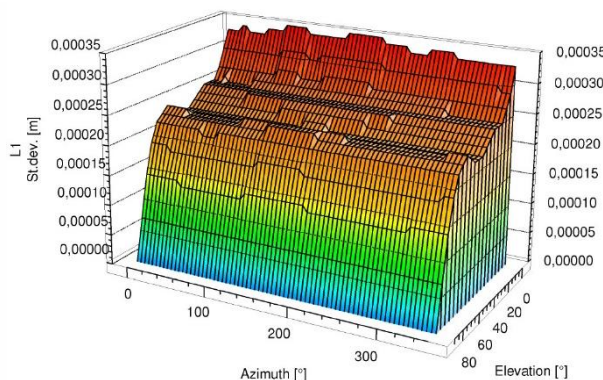
Obr. 4: Pokrytí GNSS antény signály v klidu a při pohybu (Wübbena, Schmitz et al. 2000)

Mírně modifikovaný způsob řešení v reálném čase vychází opět z nediferencovaných rovnic fázového měření. Kromě standardně eliminovaných chyb (korekce hodin přijímače/družice a atmosférických vlivů) jsou určeny i parametry vícecestného šíření signálu prostřednictvím vysoké korelace MP efektu mezi dvěma po sobě následujícími epochami. Příjem odražených signálů je dále omezen nastavením elevační masky na vyšší hodnotu (např. 18°). Pro dosažení co možná nejpřesnějších výsledků je nutné trojosého robota zajišťujícího pohyb antény kalibrovat a zjistit případný chybový model jeho pohybu, který pak slouží pro výpočet korekcí během zpracování dat.

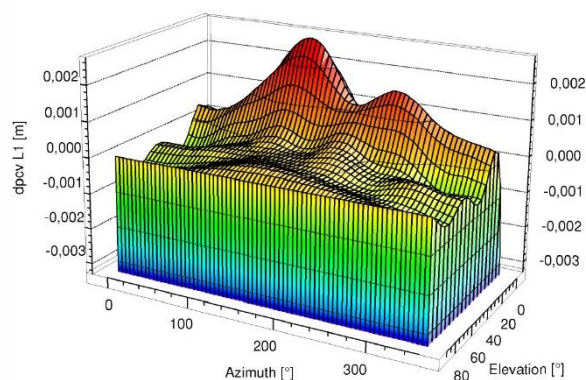
Nedílnou součástí systému je plně automatizovaný observační program využívající k řízení pohybu robota aktuální konstelaci družic a stav současného pokrytí. Každý observační program je unikátně sestavený pro dané podmínky kalibrace, čímž se minimalizuje možnost vzniku

systematických chyb. Kalibrace je automaticky ukončena, je-li dosaženo rovnoměrného pokrytí celé hemisféry včetně oblastí podél horizontu, viz obr. 4.

Dle (Wübbena, Schmitz et al. 2000) je přesnost absolutní terénní kalibrace díky hustotě, homogennímu pokrytí hemisféry přijatými signály, eliminaci MP a nezávislosti na referenční anténě obecně považována za vysokou. Obr. 5 zobrazuje střední chyby pro jednotlivé hodnoty PCV (průměr z 6 kalibrací) na frekvenci L1. V oblasti horizontu je zřejmá mírná degradace přesnosti, která je způsobena dostupnými observacemi pouze z horní hemisféry antény. Obr. 6 ukazuje rozdíl mezi dvěma kalibracemi totožné antény prováděnými pomocí různých robotů, na různých místech a v různých dnech. Jak můžeme vidět, opakovatelnost je charakterizována přesností na úrovni +/- 0,5 mm pro zenitové úhly nižší než 80°, v oblasti horizontu se snižuje na průměrnou hodnotu 1,0 mm. Několik dalších testů potvrzující vysokou opakovatelnost metody je taktéž popsáno v (Wübbena, Schmitz et al. 2006a).



Obr. 5: Střední chyby PCV, anténa TRM22020.00+GP (Wübbena, Schmitz et al. 2000)



Obr. 6: Rozdíl nezávisle určených PCV pro frekvenci L1, anténa TRM22020.00+GP (Wübbena, Schmitz et al. 2000)

Od roku 2000, kdy byl tento automatizovaný systém uveden do provozu, do roku 2008 bylo zkalibrováno více než 150 typů antén a přes 1200 individuálních antén ve více než 4100 kalibracích. Na základě těchto dat jsou pro jednotlivé typy antén vypočteny střední hodnoty PCO a PCV, které jsou organizací Geo++ uchovávány v tzv. GNPCVDB databázi. Plný přístup do databáze je zpoplatněn sumou 125€ na tři roky. Korekce vybraných typů antén jsou však pro vědecké účely poskytnuty a zveřejněny organizací IGS. (Wübbena, Schmitz et al. 2006a; Schmitz, Wübbena et al. 2008)

Výzkumný tým z Geo++ se orientuje i na další okruhy, které souvisejí s daným tématem a využívají pro svá řešení vyvinutý kalibrační systém. Nastíháme některé z nich (Wübbena, Schmitz et al. 2006a; Schmitz, Wübbena et al. 2008):

- **GLONASS PCV**

Opodstatnění samostatných GLO(NASS) PCV vychází z obecně známého faktu, že každá družice systému GLONASS vysílá signály na unikátní frekvenci. Samotný proces kalibrace na základě příjmu skutečných GLO signálů nebylo dlouho možné s požadovanou přesností smysluplně realizovat díky



nedostatečnému počtu satelitů na oběžných drahách. Od uvedení systému do operační schopnosti byly až doposud při využití systému GLONASS výsledné PCO a PCV určeny na základě signálů o různých frekvencích. Takto získané parametry však byly závislé na konstelaci družic během kalibrace a obecně tak byly považovány za méně přesné než parametry určené pomocí systému GPS. Z těchto důvodů byl zaveden nový přístup k modelování GLO PCV, který umožňuje výpočet PCV pro každou individuální GLO frekvenci pomocí znalosti hodnoty GPS PCV a interpolace do požadované GLO frekvence. Výchozím předpokladem tohoto modelu je lineární chování změn PCV mezi GPS/GLO a GLO/GLO frekvencemi. Na základě referenčního signálu L1 a L2 systému GPS byly pro GLO signály definovány tzv. Delta PCV s jednotkou m/25,0MHz. Tento Delta PCV přístup může být taktéž s výhodou aplikován pro systém Galileo, dokud pro něj nebude dosaženo dostatečné konstelace pro efektivní provedení vlastní absolutní kalibrace.

- **Určení poměru signálu k šumu CNO (Carrier to NOise ratio)**

CNO, veličina pomocí níž lze hodnotit kvalitu příjmu GPS signálu anténou, je jednoduše řečeno poměr mezi „silou“ nosné vlny a „silou“ šumu na vstupu do přijímače reflektující především přítomnost MP efektu v měření. V rámci kalibrace pomocí robota je CNO vzor běžně modelován taktéž pomocí sférických harmonických funkcí. Efektivní využití znalosti CNO vyžaduje standardizaci zohledňující různé složky, které ji ovlivňují jako např. síla signálů jednotlivých satelitů, zeslabení signálu průchodem atmosférou, zeslabení způsobené kabeláží mezi anténou a přijímačem či parametry nastavení přijímače. Zavedením několika speciálních korekcí (podrobnosti viz Wübbena, Schmitz et al. 2006a) k původní hodnotě CNO byl vyvinut standardizační postup, jehož užití demonstruje, že je možné získat navzájem porovnatelné hodnoty CNO pro různé kombinace přijímač-anténa. Proces standardizace může v důsledku přispět ke zvýšení přesnosti v GNSS aplikacích či adekvátnějšímu stanovení vah jednotlivých observací.

- **Variace grupového (skupinového) zpoždění**

Vliv antény na GNSS měření není omezen jen na fázová měření, ale také, jak ukazují současné výzkumy v oblasti absolutních kalibrací pomocí robotů, byl objeven pro kódová měření jako tzv. variace grupového zpoždění (GDV, Group Delay Variations). Výzkum této problematiky je prozatím v počátcích, ale zjištěné hodnoty dosahující velikosti až několika dm i pro zenitové úhly nižší jak 70° hovoří o nezanedbatelném vlivu těchto variací.

- **Kalibrace GNSS satelitních antén**

Výzvou byla taktéž kalibrace vysílacích antén, která byla z počátku limitována nízkou nosností robotického ramene. Hodnoty PCV pro satelitní antény jsou momentálně publikované IGS pouze jako funkce zenitového úhlu. Pro blok družic GPS II/IIA byla provedena absolutní kalibrace charakterizující jak závislost na zenitovém úhlu, tak na azimutu. Výsledky ukazují, že azimutální variace vysílacích antén

jsou několikanásobně větší než samotný v současnosti využívaný elevačně závislý fázový model. V kompletní znalosti PCV vysílacích antén je tedy viděn potenciál vedoucí ke zvýšení přesnosti GPS aplikací.

2.1.2.1.2 Kalibrace v NGS

V roce 2010 byl pod záštitou NGS ve Virginii, USA uveden do provozu GNSS absolutní kalibrační systém využívající taktéž principu krátké (5m) základny, referenční a testované antény a příjmu skutečných GNSS signálů. Jelikož je ve své podstatě proces kalibrace založen na stejných základech jako v případě výše popsané kalibrační procedury provádění organizací Geo++, budou popsány pouze stručně jeho základní komponenty.

Kalibrační základna, viz obr. 7, je umístěna na rozlehlé rovinaté ploše, v jejímž blízkém okolí se nevyskytují žádné zřejmé překážky, potenciální zdroje vícecestného šíření signálu. Obě antény jsou napojeny na jediný přijímač podporující vícečetný vstup antén. Nezbytnou součástí je sériově vyráběné polohovací zařízení PTU-D300 (Pan-Tilt Unit), zobrazené na obr. 8, umožňující pohyb antény kolem vertikální i horizontální osy.



Obr. 7: Kalibrační základna v NGS (Bilich a Mader 2010)



Obr. 8: Polohovací zařízení v NGS (Bilich a Mader 2010)

Zpracování naměřených dat opět využívá diferencování - jednoduché difference (dvě stanice - referenční a testovací; jedna družice) odstraňující atmosférické efekty a chyby z korekce hodin družice a přijímače a z nich posléze difference mezi po sobě jdoucími epochami eliminující vliv MP efektu. Výsledky těchto diferencí jsou pak vstupními daty do dvoustupňového řešení metodou nejmenších čtverců. V prvním kroku je řešen pouze ofset fázového centra za dočasného zanedbání vlivu variací způsobených PCV. V druhém kroku je pak z řešení odstraněn vliv ofsetu a pomocí sférických harmonických funkcí jsou řešeny PCV. V průběhu řešení jsou aplikovány individuálně dvě sady harmonických funkcí - první (stupně 8 a řádu 0) pro modelování PCV pouze jako funkce zenitového úhlu a druhá (stupně 8 a řádu 5) pro odvození azimutálně závislých PCV. Tato dvojí reprezentace je prováděna z důvodu nekompatibility některých GNSS softwarů se zenitově i azimutálně závislými variacemi.

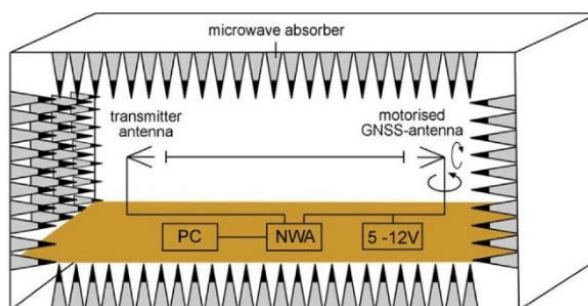
Pro posouzení přesnosti byly výsledky kalibrace porovnány s hodnotami publikovanými IGS jako standard, které jsou ve skutečnosti průměry vypočtené ze dvou až dvaceti individuálních kalibrací různých sériových čísel antény daného typu. Uvedme pouze jeden příklad. Pro anténu TRM55971.00 bylo dosaženo rozdílu ve vertikální složce PCO 2 mm, zatímco horizontální složky byly téměř totožné. Plně závislé PCV vykazují rozdíly na úrovni do 1 mm. I přes skutečnost, že je porovnáván individuální výsledek s průměrnou hodnotou, difference dosahující nízkých hodnot svědčí o správnosti modelu metody kalibrace. (Bilich a Mader 2010)

2.1.2.2 Absolutní kalibrace v laboratorních podmínkách

Kromě již zmíněné absolutní kalibrace založené na principu příjmu skutečných signálů z družic, je důkladně rozpracována i metoda absolutní kalibrace v tzv. anechoické, tedy zvuk (obecně jakákoliv signál) pohlcující, komoře. Ta je známá především z akustiky, kde byla využita např. již během druhé světové války odborníky pod vedením Lea Beranka, předního amerického experta na akustiku s českými kořeny, k vývoji radiokomunikačních zařízení pro letectvo armády Spojených států. Největší výhody této komory, a to maximálního tlumení odrazů, je využito k minimalizaci počtu odražených signálů od stěn, tedy jinými slovy k potlačení vzniku vícecestného šíření signálu během procesu kalibrace. Zmíněnou technikou kalibrace se zabývá několik odborných pracovišť, např. tým pracovníků z Ústavu geodézie a geoinformatiky Univerzity v Bonnu v Německu, z jejichž publikovaných statí (Zeimetz a Kuhlmann 2008; Zeimetz a Kuhlmann 2010) bylo čerpáno.

2.1.2.2.1 Princip kalibrace v anechoické komoře

Základem kalibračního zařízení je testovací základna, na jejímž jednom konci je pevně umístěn vysílač, zatímco na druhém se nachází dálkově ovládané polohovací zařízení nesoucí testovanou anténu, viz obr. 9. Úkolem polohovacího zařízení je nastavovat anténu po malých krocích do různých poloh a tím simulovat příjem GPS signálů z družic.



Obr. 9: Schéma kalibračního zařízení v anechoické komoře
(Zeimetz a Kuhlmann 2008)

Nedílnou součástí systému je síťový analyzátor (NWA), který měří fázový posun mezi výstupním a vstupním signálem pro každou simulovanou pozici satelitu.



Jelikož je výstupní signál po celou dobu kalibrace konstantní, můžeme okamžitě získat matici hodnot fázových korekcí pro jednotlivé směry přijatých signálů. Vysílány jsou signály o frekvencích z intervalu 1,15 - 1,65 GHz, který zahrnuje frekvenční škálu všech signálů využívaných současnými globálními systémy určování polohy. Základem úspěchu této metody je taktéž fakt, že simulovaný signál je co nejuvěrnější kopií skutečného GNSS signálu. Kvalita signálu užitého při kalibraci závisí na délce testovací základny - s její rostoucí délkou se zvětšuje i rovinnost čela šířené vlny. Dalo by se tedy usuzovat, že pro kalibraci by měly být potřeba dlouhé základny zajišťující dostatečně kvalitní repliku GNSS signálu. Ve skutečnosti bylo ale dokázáno (Zeimetz a Kuhlmann 2008), že postačující je již základna o délce šest metrů. Celý proces kalibrace probíhá automatizovaně a trvá cca čtyřicet minut.

Opakovatelnost výsledků této metody je charakterizována pro zenitové úhly nižší než 80° odchylkami menšími než 0,2 mm, většina z nich však nepřesahuje 0,1 mm, což dokazuje dostatečnou vnitřní přesnost metody. Pro vyloučení systematických vlivů byly výsledky porovnány s hodnotami určenými nezávislou metodou, v tomto případě s daty poskytnutými Geo++. V tomto srovnání dosahovaly diference na frekvenci L1 pro zenitové úhly menší než 80° hodnot menších jak 1 mm, pro oblast horizontu se vyskytly i hodnoty vyšší než 2 mm. Těchto hodnot bylo dosaženo pro všechny běžné typy antén využívaných v geodetické praxi (např. Trimble Zephyr Geodetic, Leica AX1202). I přes různé podmínky, za kterých byly antény oběma metodami kalibrovány, a naprostou metodologickou odlišností obou metod vykazují výsledky velmi dobrou shodu.

Výhodou této metody je její nezávislost na operační schopnosti konkrétního systému. Např. absolutní terénní kalibrace antén pro systém GLONASS nebylo možno dlouhou dobu smysluplně realizovat právě díky nedostatečné konstelaci satelitů. Problémy takového charakteru logicky u laboratorní kalibrace nehrozí. Naproti tomu nevýhodou metody je nízká dostupnost vhodných anechoických komor a vysoké náklady spojené s jejím pořízením.

2.2 ANTINFO a ANTEX formát

Výsledky kalibrací jsou uživatelům GNSS systému k dispozici prostřednictvím speciálních datových formátů, a to původního formátu ANTINFO (ANTenna INformation FOrmat) a nového formátu ANTEX (ANTenna EXchange format).

2.2.1 Formát ANTINFO

ANTINFO je datový formát souborů s hodnotami PCO a PCV používaný od konce roku 1999, který byl primárně navržen pro sdílení dat získaných relativní kalibrací, z čehož vyplývají jistá omezení. Formát např. podporuje pouze elevačně závislé PCV či jediný GNSS systém s max. dvěma frekvencemi.



Například soubor v tomto formátu *ant_info.003* (https://www.ngs.noaa.gov/cgi-bin/showdoc.prl?Data=GPS/ant_info.003) obsahuje originální hodnoty získané relativními kalibracemi pro více jak 300 typů antén. Více o struktuře formátu lze nalézt v (<http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/documents/format.txt>).

Dalším souborem tohoto formátu je např. soubor *ant_info.abs* obsahující „přetransformovaná“ relativní data na absolutní získaná přičtením hodnot reprezentujících referenční anténu (AOAD/M_T), které byly získány absolutní kalibrací antény v anechoické komoře. Takto získané hodnoty se jen velmi málo liší od hodnot získaných skutečnou absolutní kalibrací.

2.2.2 Formát ANTEX

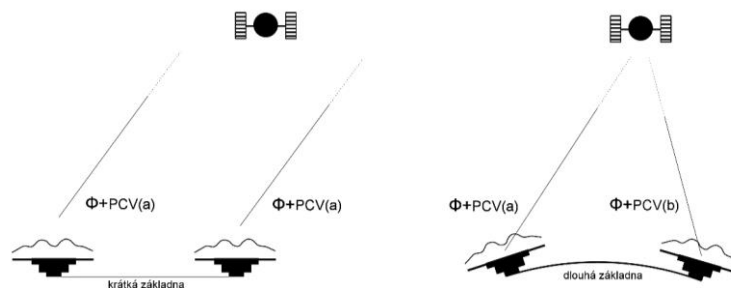
S příchodem absolutních kalibrací sejevilo jako nutnost vytvoření nového datového formátu umožňujícího navýšení objemu a typů dat. Toto místo v roce 2003 zaujal formát ANTEX lišící se od svého předchůdce možnostmi uchování dat pro více než jeden GNSS a více než dvě frekvence signálu, data pro antény uživatelského i kosmického segmentu a především zenitově i azimutálně závislé PCV. V současnosti je v tomto formátu k dispozici např. soubor *ngs08.atx* (<http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadFile?file=ngs08.atx>). Více o aktuální struktuře formátu lze nalézt v (<http://igs.cb.jpl.nasa.gov/igs/scb/station/general/antex14.txt>). Je zřejmé, že i přes stálou podporu formátu ANTINFO je budoucnost spatřována ve formátu ANTEX. (NOAA 2014)

2.3 Argumenty pro provádění absolutních kalibrací antén

Současný trh nabízí nespočetné množství typů antén různých výrobců. Pro jejich správnou funkci určování polohy je však nezbytné přesně znát jejich charakteristiky. Někteří uživatelé GNSS mohli mylně nabýt dojmu, že přesné hodnoty PCV není třeba uvažovat a při zpracování vystačí pouze s hodnotou PCO. Bylo však potvrzeno (Wubbena, Menge et al. 1996), že použití pouhého offsetu je pouze aproximací skutečného chování fázového centra, jehož znalost je nedostatečná pro aplikace vysoké přesnosti. Následující případy a fakta demonstrují nutnost zahrnutí úplného fázového modelu či potřebu individuálních kalibrací antén:

- **Geodetické sítě**

Zavedení korekcí je nezbytné nejen v případech rozsáhlých permanentních geodetických sítí obsahujících různé typy antén, jejichž individuální charakteristiky je třeba při zpracování co možná nejvíce homogenizovat, ale také v sítích, kde observují antény identického typu na bodech tvořících velmi dlouhé základny ($s > 1000$ km). V tomto případě jsou totiž díky velkým vzdálenostem tytéž signály přijímány anténami pod různými úhly, což způsobuje odlišnou velikost PCV, viz obr. 10.



Obr. 10: Směry simultánně přijímaných signálů (na základě Menge, Seeber et al. 1998)

Uvedme příklad (Menge, Seeber et al. 1998) vyvracející zažitou domněnku, jež tvrdí, že v sítích tvořených stejným typem antény není třeba zahrnovat její korekce (z absolutní kalibrace). Pro tyto účely byla použita série dvaceti čtyř hodinových observací anténou typu DM-T (typ Dorne Margolin, nejběžněji užívaný typ antény v permanentních sítích) na vybraných bodech sítě IGS (Mezinárodní GNSS služby) s délkami základem mezi 1000-2000 km („regionální“ síť) až do téměř 9000 km („globální“ síť). V rámci zpracování byly vytvořeny dvě série výsledných souřadnic bodů zpracovaných identickým způsobem (řešení z frekvence L3, zavedeny odhady parametrů troposféry) jen s tím rozdílem, že do výpočtu první série souřadnic nebyly zavedeny PCV, zatímco do druhé zavedeny byly. Diference mezi oběma řešeními dosahovaly max. hodnot 3,5 cm v „regionální“ a 7,0 cm v „globální“ síti, což jasně dokazuje, že zanedbání korekcí fázového centra v regionálních a globálních sítích s totožným typem antén vede ke vzniku neopomenutelných systematických chyb ovlivňujících především délky základen. Variace fázového centra antény je v tomto případě třeba zavést vždy, pokud vyžadujeme přesnost na úrovni 1 cm/1000 km.

- **Variace mezi fázovými vzory antén téhož typu**

Je obecně vžito, že antény téhož typu a výrobce vykazují navzájem konzistentní fázové chování. Toho je využíváno k popisu konkrétního typu antény tzv. typovými středními hodnotami, které jsou uchovávány IGS v databázi obsahující data všech antén využívaných v IGS síti. Může se však vyskytnout případ (Wübbena, Schmitz et al. 2000), že difference mezi fázovými vzory dvou antén téhož typu dosahují hodnot až +/- 1 cm. Individuální absolutní kalibrace naznačují, že tento rozdíl je způsoben fázovým posunem modelu o 180°, který byl způsoben opačnou vzájemnou orientací mezi přijímačem a tělem antény o 180°. Velké množství kalibrací provedených v Geo++ v rámci série antén stejného typu taktéž odhaluje drobné odchylky způsobené např. sestavovací přesností antén či mírnými změnami návrhu či komponent v rámci typové série daného výrobce. (Schmitz, Wübbena et al. 2008)

- **Vliv bezprostředního okolí na výsledky absolutní kalibrace**

Srovnání výsledků absolutních kalibrací téhož typu antény taktéž odhalily vliv přídavných krytů (nasazovaných např. kvůli nepříznivým vlivům počasí), kovových desek pod anténu (pro odstínění odražených signálů) či způsobu upevnění antény (trojnožka, pilíř, stativ) na její fázové chování.



V (Wübbena, Schmitz et al. 2000) je např. ukázáno, že přídatný kryt a kovová deska mohou způsobit změnu fázových vlastností na úrovni $\pm 0,8$ cm (pro L3). Samotný kryt vykazuje výrazně nižší vliv, a to v řádu $\pm 1-2$ mm.

Nejvýraznější vlivy na fázový vzor z objektů nacházejících se v bezprostřední blízkosti jsou však způsobeny přítomností stabilizačních pilířů nebo speciálních upevňovacích konstrukcí. Vzhledem k malé vzdálenosti mezi jejich odrazivou plochou a fázovým centrem a silou těchto signálů, které se nestihnou rozptýlit v prostředí, mají odrazy od objektů v blízkém okolí mnohem větší vliv než od vzdálenějších objektů. Velikost tohoto vlivu taktéž závisí na výšce antény nad odrazivým povrchem a lze ho určit srovnáním fázového modelu izolované antény a antény kalibrované na upevňovací konstrukci. Porovnáním antény upevněné na trojnožce a maketě kruhového ($d=20$ cm) a čtvercového ($a=30$ cm) pilíře s běžnou kalibrací bylo dle (Wübbena, Schmitz et al. 2006b) dosaženo odchylek PCV (pro frekvenci L3) pro zenitové úhly vyšší jak 80° na úrovni až 7,5 mm a 5 mm pro hodnoty nižší jak 80° . Z uvedeného příkladu vyplývá, že v případech speciálního upevnění antény je třeba kalibrovat nejen samotnou anténu, ale celou konstrukci jako celek.

- **Vliv azimutu přijímaných signálů**

Vzhledem k nízké závislosti PCV na azimutu přijímaného signálu pro většinu antén využívaných v geodetické praxi, byly běžně využívány pouze PCV zahrnující závislost na elevačním úhlu. Absolutní kalibrace (Wübbena, Schmitz et al. 2000) však potvrdila silnou azimutální závislost některých typů antén (např. ASH700700.B či TRM22020.00-GP), jež svou velikostí v některých případech předčí i závislost na zenitovém úhlu. Tato jasně implikuje potřebu aplikace úplného fázového vzoru (tedy PCO i PCV) a především variací funkčně závislých jak na zenitovém úhlu, tak na azimutu.



3 Časová synchronizace

Pohyb robota nesoucího testovanou anténu je přímo ovládán počítačem, a proto je nezbytně nutné, aby jím řízené vystavení do jednotlivých poloh bylo s ohledem na prováděné GPS měření v celých sekundách jednoznačně vztaženo k času GPS (GPST). Jelikož však chod hodin většiny počítačů kolísá a nedosahuje potřebné kvality, je třeba provést synchronizaci hodin počítače s tzv. časovými servery na čas UTC a prostřednictvím tohoto času i na GPST.

3.1 Čas UTC a GPS čas

- **Koordinovaný světový čas UTC (Universal Time Coordinated)**

Tento čas dle (Fixel, Machotka 2007a) náleží do kategorie fyzikálně definovaných časů a vychází z času TAI (International Atomic Time). Jeho sekunda je totožná se sekundou TAI, z čehož plyne, že jde o čas rovnoměrný. UTC taktéž plní funkci času občanského, tedy času užívaného v praktickém životě. Jelikož je ten ve své podstatě spjatý s rotací Země, je nutné, aby byl UTC udržován ve shodě s rotačním časem UT1, který je roven času GMT (Greenwich Mean Time), tedy střednímu slunečnímu světovému času. Z důvodu mírného zpomalování rotace Země se UT1 oproti UTC zpožďuje a je tedy při překročení mezní hodnoty $\pm 0,9$ s do času UTC přidána (či ubrána) tzv. přestupná sekunda. Přidání resp. ubrání přestupné sekundy má za následek vznik diference mezi časy UTC a TAI. Mezi oběma časy platí dle Bulletinu C vydávaném IERS (Mezinárodní organizace pro rotaci Země) od 1. 7. 2012 až do další ohlášené změny, že:

$$TAI - UTC = n = 35s, \quad (3.1)$$

kde n je celé číslo, počet realizovaných sekundových skoků od 1. 1. 1980.

- **GPS čas (GPST)**

Jde o čas, k němuž se vztahují všechny signály systému GPS a který je odvozován z měření prováděných všemi atomovými hodinami tohoto systému. Mezi UTC a GPST platí vztah:

$$GPST - UTC = k \pm 1\mu s, \quad (3.2)$$

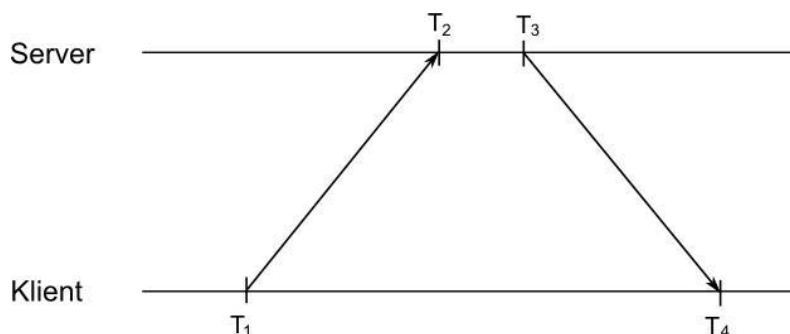
Sekunda GPST je shodná se sekundou TAI, vztah mezi těmito časy je dán jako:

$$GPST = TAI - 19s \quad (3.3)$$

Jelikož GPST nepoužívá přestupné sekundy, hodnota k ve vzorci (3.2) se mění. Dne 6. 1. 1980 (počáteční epocha GPST) bylo $k = 0s$ a s uvažováním rovnic (3.1) a (3.3) lze vypočítat, že momentálně dosahuje velikosti $k = 16s$. Více informací lze nalézt např. v (Fixel, Machotka 2007b).

3.2 NPT protokol

NTP protokol (Network Time Protocol) neboli síťový protokol času, jeden z nejstarších internetových protokolů vůbec, slouží k síťové synchronizaci vnitřních hodin počítačů vůči UTC po internetu. Protokol je založen na předávání časových informací mezi jednotlivými zařízeními pomocí NTP paketů, viz obr. 11. Komunikaci vždy zahajuje klient zasláním dotazu na NTP server (v praxi vždy na víc serverů) obsahující čas odeslání paketu klientem T_1 . Server paket přijme, vloží do něj čas přijetí resp. odeslání paketu T_2 resp. T_3 a paket zašle zpět klientovi, který do něj při přijetí vloží poslední čas, čas příjmu T_4 .



Obr. 11: Komunikace klient-server (Pravda 2008)

Je nutné zdůraznit, že jednotlivé časy nejsou absolutní. Klient pracuje s časem, který může být, a s velkou pravděpodobností i je, oproti času serveru rozdílný. Z těchto časů lze určit zpoždění paketů průchodem sítě jedním směrem:

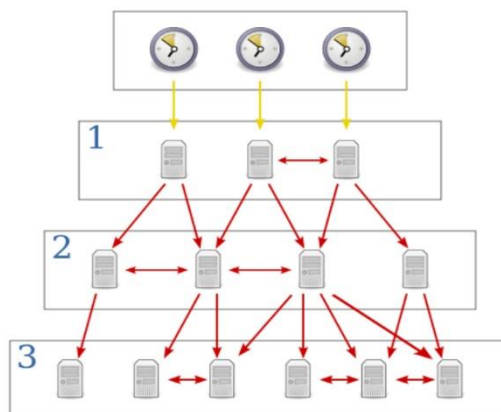
$$\delta = \frac{[(T_4 - T_1) - (T_3 - T_2)]}{2} \quad (3.4)$$

vycházející z předpokladu, že doba průchodu paketu k serveru a zpět je stejná. Z přijatých časů lze taktéž vypočítat korekci času klienta k představující diferenci času serveru a klienta:

$$k = T_3 - T_4 + \delta, \quad (3.5)$$

kteřá může nabývat jak kladných, tak i záporných hodnot. Po přičtení (odečtení) korekce od času klienta, by se časy klienta a serveru měly rovnat. Jelikož však nejsme schopni naprosto přesně určit zpoždění sítě, v praxi tento stav nikdy nenastane. Proces tedy vychází z postupného přibližování se k přesnému času a lze jej rozdělit na dvě fáze. V případě velkých rozdílů (nad 128 ms) dochází k tzv. skokové (stepping) synchronizaci zajišťující okamžité srovnání času. Jsou-li rozdíly malé, probíhá tzv. postupné přibližování (slewing). Přesnost synchronizace prováděné tímto protokolem přes internet se pohybuje v řádu jednotek až několika desítek ms, v lokálních sítích může dosahovat hodnot pod 1ms. Obecně platí, že čím delší je synchronizace, tím přesnější je pak její výsledek. (Pravda 2008)

K synchronizaci využívá protokol systém hierarchické struktury časových zdrojů (serverů) zvolený z důvodu rozložení zátěže uživatelů dle následujícího schématu:



Obr. 12: Struktura časových serverů (Wikipedie)

Jednotlivé vrstvy jsou označovány jako stratum a jsou číslovány vzestupně od nuly (Stratum 0 = referenční hodiny). V nejvyšší vrstvě 0 jsou zařízení poskytující přesný čas (atomové hodiny, čas z GPS či např. ve střední Evropě i hodiny řízené radiovým signálem DCF77), podle nichž jsou synchronizovány počítače na úrovni Stratum 1. Tyto počítače mohou spolupracovat v rámci vrstvy mezi sebou, a tak „doladovat“ možné nuance. Další vrstvy pracují obdobným způsobem. Zatímco však počítače vrstvy 1 mohou být napojeny právě na jeden zdroj referenčního času, počítače Strata 2 a dalších vrstev již mohou přijímat informace z více počítačů vrstvy nadřazené. Nejvíce počítačů se nachází ve vrstvě 3, teoreticky řada pokračuje do čísla 15, prakticky je ukončena Stratem 5. Známým českým provozovatelem NTP serverů je např. organizace CESNET (server *tik.cesnet.cz* úrovně Stratum 1 a *tak.cesnet.cz* úrovně Stratum 2).

3.3 Synchronizace času v operačním systému Linux

Jednou, i když nedoporučovanou, variantou synchronizace je tzv. jednorázové (skokové) nastavení času. To proběhne z uživatelského účtu po zadání příkazu `sudo ntpdate x` do shellu, kde *x* je adresa libovolného NTP serveru. Provedeme-li totiž tuto skokovou změnu systémového času směrem dopředu či zpět, může dojít k řadě nežádoucích skutečností (přeskočení naplánované úlohy, nesoulad v databázích či souborech - novější verze souboru má starší čas a naopak, atd.).

Praktičtější variantou synchronizace je tzv. průběžné automatické nastavování času, které lze provést níže popsaným způsobem (Wiki Ubuntu 2012). Např. pro Ubuntu Linux je třeba službu nejprve nainstalovat příkazem `sudo apt-get install ntp` a následně po zadání příkazu `sudo nano /etc/ntp.conf` nastavit její parametry. Zde můžeme servery editovat (přidávat, mazat) či dopsáním „prefer“ za název serveru zvolit vybraný jako preferovaný. Po uložení změn a uzavření konfiguračního souboru (pomocí klávesové zkratky CTRL+x) je třeba provést restart příkazem



`sudo /etc/init.d/ntp restart`. O stavu synchronizace se pak můžeme přesvědčit příkazem `ntpq -p`, který vypíše na obrazovku tabulku podobné té, která je na následujícím obrázku:

```
=====
      remote           refid      st t when poll reach  delay  offset  jitter
=====
*tik.cesnet.cz       .GPS.          1 u 109 128 377  20.867  5.674  8.521
+ntp.nic.cz          195.113.144.201 2 u  49 128 377  20.422  1.162  5.388
+netopyr.hanacke     .GPS.          1 u 107 128 377  28.136  6.250  9.182
+smtp.martinpolj     4.81.120.99    3 u  61 128 377  23.865  1.138  5.082
+scotland0.netco    195.113.144.204 2 u  69 128 377  22.558  8.851  6.116
tera@vboxubuntu:~/Plocha$ ntpq -p
      remote           refid      st t when poll reach  delay  offset  jitter
=====
*tik.cesnet.cz       .GPS.          1 u  35 128 377  20.705  1.080  6.283
+ntp.nic.cz          195.113.144.201 2 u 108 128 377  20.422  1.162  1.877
+netopyr.hanacke     .GPS.          1 u  33 128 377  29.327  0.001  6.697
+smtp.martinpolj     4.81.120.99    3 u 119 128 377  23.865  1.138  1.634
+scotland0.netco    195.113.144.204 2 u   2 128 377  22.875  1.893  5.505
=====
```

Obr. 13: Výpis stavu synchronizace času v Linux Ubuntu

Jednotlivé sloupce zde značí:

Remote je název vzdáleného serveru se zdrojem času. Znak * udává preferovaný server, který se může lišit od námi vybraného serveru. Znak + označuje další vhodné kandidáty na preferovaný server při výpadku aktuálního serveru. Znak - bychom nikdy vidět neměli, označuje totiž nekvalitní zdroj času.

Refid je zdroj času používaný daným serverem. Zdroj GPS označuje synchronizaci pomocí družic GPS, PPS (pulse per second) je pak speciální zařízení připojené k počítači (např. atomové hodiny).

St je vrstva (stratum) časového zdroje.

When a pool udávají časy další kontroly času u vzdáleného serveru.

Reach značí stav synchronizace. Podstatná je hodnota 377, která signalizuje plně funkční synchronizaci.

Delay určuje síťovou latenci (zpoždění) vzdáleného serveru [ms].

Offset je rozdíl času [ms]. Tato hodnota je nejpodstatnější.

Jitter je odhad chyby frekvence lokálních hodin.



4 Zařízení pro absolutní kalibraci GNSS antén vyvíjené na Ústavu geodézie FAST VUT v Brně

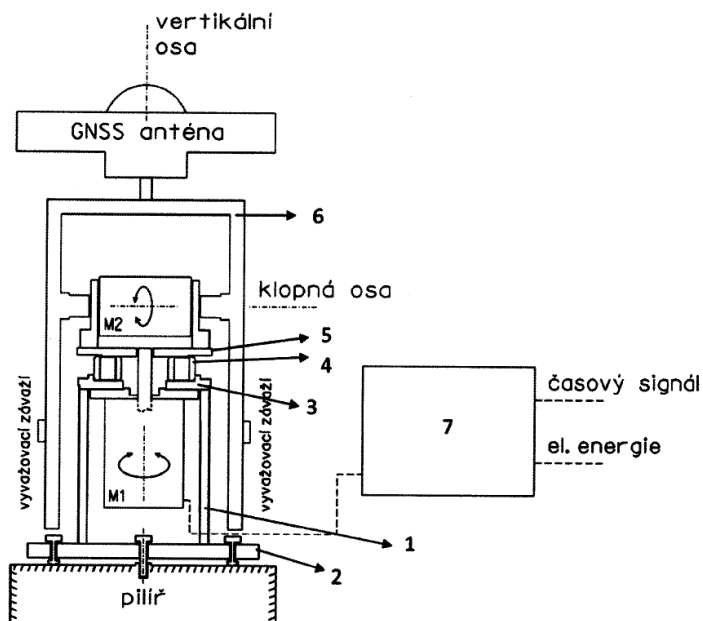
Již během minulého desetiletí byla na Ústavu řešena problematika změny polohy fázového centra antény prostřednictvím relativní kalibrace, viz např. (Nohejl 2006). Trend a vývoj ve světě byl již v té době zaměřen a budoucnost spatřoval výhradně v kalibracích absolutního typu. Nejen z důvodu absence zařízení umožňující absolutní kalibraci antén v České republice, ale i nízkému počtu zainteresovaných světových pracovišť vůbec, byl v roce 2011 na Ústavu geodézie započat vývoj polohovacího zařízení pro absolutní kalibraci GNSS antén. Následující podkapitola je zpracována na základě (Kalina, Kratochvíl a kol. 2013; VUT v Brně 2013; Linux 2012a: 112-156).

4.1 Popis polohovacího zařízení pro absolutní kalibraci GNSS antén

Vývoj zařízení na Ústavu geodézie byl podpořen projekty Specifického výzkumu FAST-S-11-66/1441 „Vývoj zařízení a metod pro absolutní kalibraci antén GNSS“ a FAST-S-14-2468 „Testování zařízení a vývoj výpočetního zpracování pro absolutní kalibraci antén GNSS“. Projekt s ohledem na své ekonomické parametry neumožňoval koupi robotického ramene průmyslového typu (jako např. v NGS, viz kap. 2.1.2.1.2), a proto bylo z ekonomicky dostupných komponent pod názvem StAnCa (Station Antenna Calibration) sestaveno zařízení vlastní konstrukce. Zařízení se skládá ze dvou primárních částí, a to polohovacího ramene nesoucího kalibrovanou anténu a řídicí jednotky. Propojení těchto částí zajišťují napájecí kabely motorů.

- **Polohovací rameno**

Schéma ramene je zobrazeno na obr. 14, jeho podoba k datu 17. 2. 2014 na obrázku následujícím. Nejdůležitějšími komponenty jsou dva krokové motory M1 a M2. Silnější M1 zajišťuje pohyb kolem točné (vertikální) osy a je připevněný zespod k horní desce (3) tubusu (1) zasazeného do trojnožky (2). Horní deska je pomocí ložiska (4) spojená s horní otáčivou deskou (5). Rotační osa motoru prochází volně kolmo horní deskou a je pevně uchycena do horní otáčivé desky, kterou tedy lze otáčet motorem M1 kolem její vertikální osy. K této otáčivé desce je připevněn druhý slabší motor M2 zajišťující pohyb kolem horizontální (klopné) osy. Rotační osa M2 je na svých protilehlých stranách pomocí úchytů spojena s duralovým nosným ramenem tvaru „U“ (6). Ve středu horizontální části nosného ramene se nachází šroub, na který lze připevnit a orientovat anténu určenou ke kalibraci. Polohu tohoto šroubu vůči referenčnímu bodu ve středu spodní trojnožky lze pro libovolnou vystavenou polohu odvodit na základě znalosti rozměrů jednotlivých konstrukčních částí zařízení a úhlu natočení horní otáčivé desky spolu s úhlem sklopení nosného ramene, viz (Brátová 2014).



Obr. 14: Schéma polohovacího ramene (VUT v Brně 2013)



Obr. 15: Fotografie polohovacího ramene

Konstrukční části zařízení vyjma motorů a ložiska byly vysoustruženy z oceli, duralu a mosazi v dílnách Ústavu geodézie. Z důvodu zvýšení odolnosti vůči vlivům počasí byly ocelové části povrchově upraveny.

Základními osovými podmínkami zařízení je kolmost otáčivých os motorů M1 a M2, existence průsečíku os, resp. vyloučení jejich mimoběžnosti, a kolmost horizontální části ramene na vertikální osu zařízení. Osa motoru M1 by měla taktéž procházet středem spodní trojnožky. Svislost vertikální osy při měření je zajištěna trubicovou libelou umístěnou na horní otáčivé desce. Na zařízení jsou umístěny ještě další dvě libely - trubicová libela na polohovacím rameni a krabicová libela na trojnožce z důvodu její předběžné horizontace pro snadnější upnutí šroubem k pilíři, viz obr. 15.

Výše popsané konstrukční řešení umožňuje natočení antény do jakéhokoliv azimutu v rozsahu 0-360° a její vertikální vychýlení vzhledem k zenitu v rozmezí 0-90° či více. Tento pohyb se děje pomocí dvojice motoru M1 a M2 ovládaných prostřednictvím řídicí jednotky (7) s nimi spojené.

• Řídicí jednotka

Řídicí jednotka je tvořena několika vzájemně propojenými elektronickými zařízeními, která jsou z důvodu snadnějšího transportu umístěna v plechové skříni. Ta obsahuje zdroj stejnosměrného napájení, transformující vstupní střídavý proud 230 V na výstupní stejnosměrný proud 64 V, záložní zdroj UPS, dva ovladače motorů, univerzální vstupně-výstupní kartu s programovatelným hradlovým polem a vlastním oscilátorem, switch a osobní počítač. Softwarové řešení využívá volně dostupné nástroje šířitelné převážně pod licencí GNU GPL. Operačním systémem počítače je LinuxCNC, distribuce založená na LTS (Long Term Support, dlouhodobě podporovaných) vydáních distribuce Ubuntu. Zvolený operační systém obsahuje úpravy jádra systému pro řešení aplikací v reálném čase a soubor



univerzálních nástrojů pro ruční i automatizované řízení obráběcích strojů. Důležitou součástí chodu zařízení je nástroj pro tvorbu pozorovacího programu, nástroj pro zajištění vazby pohybu ramene na čas UTC a pro tvorbu protokolu osahujícího čas ukončení pohybu při přesunu do dané pozice určené azimutem a zenitovým úhlem, čas GNSS měření a čas začátku pohybu do následující pozice.

Pod operačním systémem LinuxCNC se k řízení pohybu ramene používají tzv. G-kódy, sestávající se z písmene a čísla. Většina kódů začíná písmenem G (General - obecné) a M (Miscellaneous - ostatní).

Pro programování pohybu byly využity kódy G0, G1 a G4:

- **Kód G0** - příkaz pro lineární pohyb maximální rychlostí z aktuální do zvolené pozice (např. příkaz „G0 X180 Y0“ zajistí pohyb z aktuální pozice do polohy o souřadnicích $X=180^\circ$ a $Y=0^\circ$).
- **Kód G1** - příkaz pro lineární pohyb zvolenou rychlostí z aktuální do zvolené pozice (např. příkaz „G1 X180 Y-85 F480“ zajistí pohyb zvolenou rychlostí uvedenou v jednotkách [°/min] z aktuální pozice do polohy o souřadnicích $X=180^\circ$ a $Y=-85^\circ$).
- **Kód G4** - příkaz pro setrvání v aktuální pozici (např. příkaz „G4 P0.5“ znamená vyčkání v pozici po dobu 0,5 s od doby dosažení aktuální pozice).

Pro řízení pohybu s ohledem na čas UTC je využit uživatelsky definovaný M-kód (libovolné označení M100 - M199, námi definován jako M101), který zprostředkuje spuštění již zmíněného programu pro zajištění vazby pohybu ramene na čas UTC, zatímco běh původního programu je po dobu jeho běhu pozastaven. O vnořeném programu je podrobněji pojednáno v kapitole 6.3.



5 Ověření časové synchronizace pohybu polohovacího ramene

Pro korektní proces kalibrace je nutná znalost přesné polohy ramene v okamžiku GNSS měření (např. v každou celou sekundu). Pro spolehlivější znalost aktuální pozice byl zvolen model zastavení pohybu ramene s anténou v okamžiku měření. Zajištění statické polohy ramene v době GNSS měření má být docíleno vazbou řízení pohybu ramene na čas UTC. Jako nutnost se však jeví tuto skutečnost ověřit nezávislou metodou pozorování. Taktéž bylo nutné otestovat možné zpoždění v řízení pohybu způsobené elektronikou řízení (na cestě z PC přes paralelní port, hradlové pole a drivery krokových motorů). Pro oba tyto účely bylo možné využít např. systém pro automatizované měření kmitajících objektů vytvořený na Ústavu geodézie v rámci diplomové práce Ing. Juraje Komačky (Komačka 2011a). Koncept hardwarové podstaty tohoto systému byl převzat ze systému MAAS-1, který byl vyvinut Ing. Radovanem Machotkou, Ph.D. a je primárně určen pro automatizované astronomické určování polohy, viz např. (Machotka, Vondrák 2009).

5.1.1 Systém MAAS-1 doplněný SW pro vyhodnocení dynamických jevů

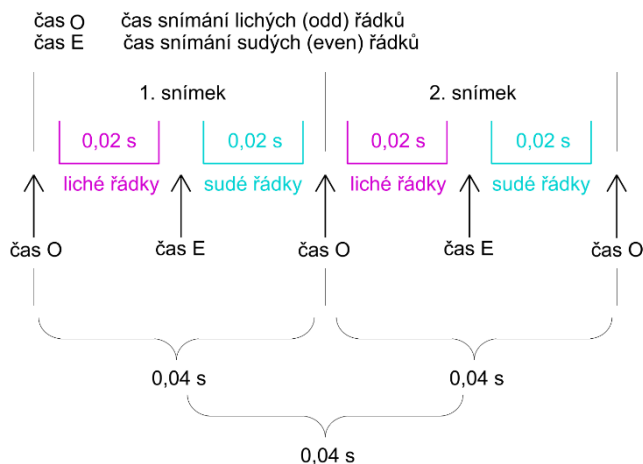
V této podobě systém dle nastavených parametrů pořizuje digitální obraz zájmového pohybujícího se objektu se značkou a umožňuje jeho automatizované zpracování. Výstupem je textový soubor obsahující čísla snímků, časy jejich pořízení (v případě připojení systému k přijímači GPS) a snímkové souřadnice X, Y značky na objektu v pixelech.

Hardware systému, pro ilustraci znázorněný na obr. 17, má tyto části:

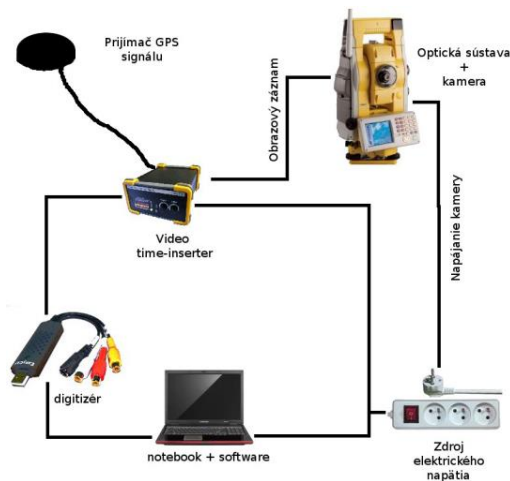
- **CCD kamera**, která zaznamenává obraz. Zde jde o černobílou analogovou kameru s maximálním rozlišením 720x576 px a frekvencí záznamu 25 Hz s prokládáním řádků. To znamená, že kamera snímá s intervalem 0,02s střídavě liché (časy O - odd) a sudé (časy E - even) řádky. Při zpracování jsou vždy dva po sobě následující pulsnímky složeny do jednoho snímku (*.png). Do textového souboru se pak vkládají vždy dvojí data náležící jednomu fyzicky vytvořenému grafickému záznamu - první čas je spočten jako průměr z prvního času O a následujícího E, druhý čas jako průměr z téhož času E a následujícího času O, který je totožný s prvním časem O dalšího snímku, viz schéma na obr. 16.
- **Optická soustava** (totální stanice Topcon GPT 9001A) sloužící k zaostření obrazu a poskytnutí stabilní polohy kamery při snímání.
- **Přijímač signálu GPS** zajišťující příjem signálu pro synchronizaci interních hodin vkládače času.
- **Digitizér** zajišťující převod analogového signálu na digitální, který je následně počítačem v reálném čase zpracován.
- **Notebook** se speciálním softwarem pro řízení sběru dat a vyhodnocení pohybu objektu.
- **Zdroj elektrického napětí** pro notebook, kameru a vkládač času (el. síť či externí zdroj).

- **Vkládač času VTI** (Video Time-Inserter) sloužící k vkládání času, data a případně i souřadnic aktuální polohy do analogového signálu video záznamu. Přesný čas je každému pořízenému půlsnímku videosekvence přiřazen dle interních hodin přijímače, které jsou každou sekundu synchronizovány na základě formací z navigační zprávy systému GPS, jehož signál je přijímán prostřednictvím připojeného přijímače. Alternativní variantou je synchronizace interních hodin podle tzv. frankfurtského časového signálu DCF77, v tomto případě je synchronizace prováděna v minutovém kroku. V případě připojeného GPS přijímače je vkládán čas UTC a přesnost synchronizace je výrobcem garantována hodnotou 0,1 ms. V případě přerušení či ztráty signálu GPS je čas udržován pouze interními hodinami zařízení s odchylkou menší než 10 s/24 hodin. Jednoznačným indikátorem korektní synchronizace každé sekundy je písmeno V (Valid data) na prvním řádku vkládané informace (následující cifry značí počet satelitů na příjmu) na všech snímcích pořízených během minimálně čtyř předcházejících sekund. Struktura vkládaných dat je patrná z obr. 19. (Alexanred Meier Elektronik 2009)

Informace o postupu, volbě parametrů měření a procesu vyhodnocení lze nalézt v (Komačka 2011a).



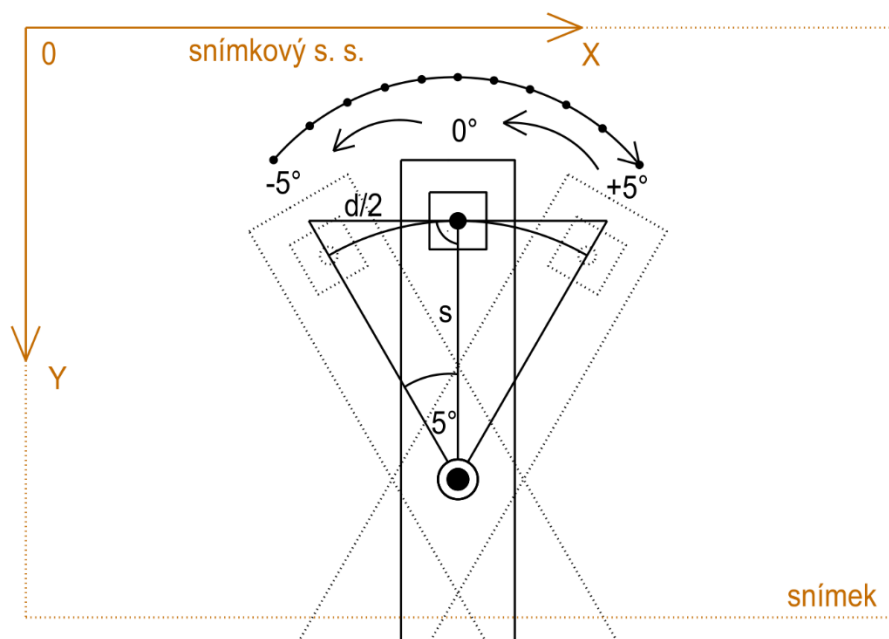
Obr. 16: Schéma snímání obrazu kamerou



Obr. 17: Hardwarové součásti systému MAAS-1 (Komačka 2011a)

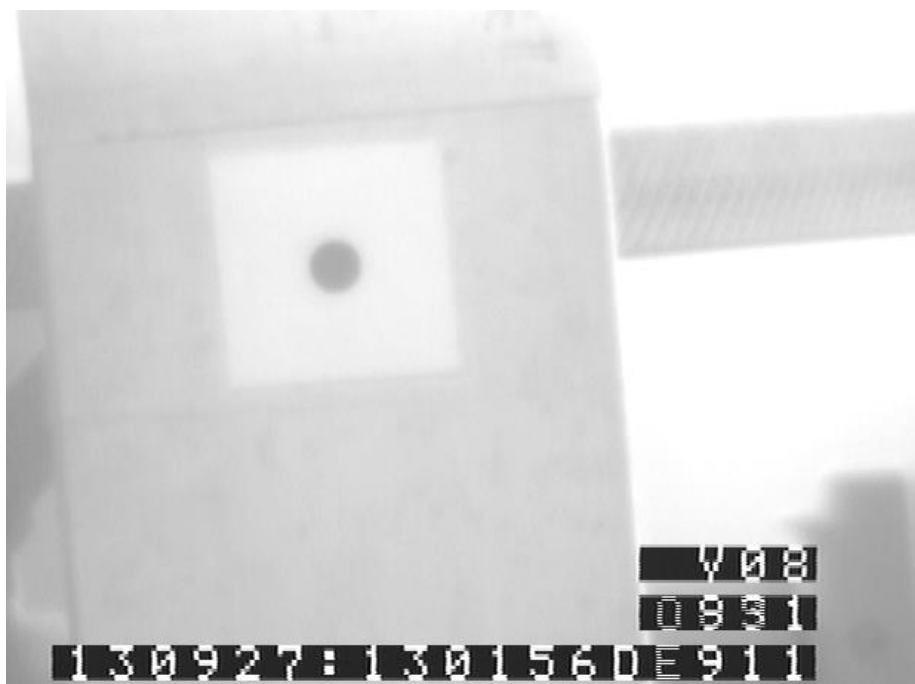
5.1.2 Vlastní testovací měření pro analýzu časové synchronizace pohybu

Dne 27. září 2013 bylo na terase budovy B FAST VUT v Brně provedeno testovací snímání pohybu polohovacího zařízení za pomoci výše popsaného systému. Polohovací zařízení bylo připevněno na pilíř s nucenou centrací „JZ“, zatímco totální stanice s kamerou na pilíři č. 2 ve vzdálenosti $\sim 7,5$ m. Pro účely snímání byla do horní úrovně svislé části nosného ramene dle doporučení v (Komačka 2011a) umístěna značka - plný černý kruh o poloměru 3,75 mm na bílém pozadí. Zařízení bylo zhorizontováno, jednotlivé součásti byly propojeny kabeláží a polohovací rameno bylo nastaveno do svislé roviny procházející záměrnou přímkou optické soustavy totální stanice. Klíčovým krokem byla synchronizace systémového času řídicího počítače prostřednictvím NTP protokolu s počítači úrovně Stratum 2 a 3, viz kap. 3.3. Dosažené hodnoty offsetu byly menší než 10 ms. Pohyb ramene byl s ohledem na rozsah zorného pole kamery naplánován z výchozí svislé polohy ramene do pozice -5° , odtud zpět s krokem 1° přes výchozí pozici do polohy $+5^\circ$, z níž se rameno vrátilo zpět do výchozí polohy, což je zřejmé i z následujícího obrázku:



Obr. 18: Schéma pohybu ramene při snímání

Dle zmíněného plánu byl vytvořen i observační program. Na druhém pilíři základny byl sestaven snímací systém a v aplikaci *camera.exe* (Komačka 2011b) založen nový projekt snímání, ve kterém byla nastavena délka snímání 15 s a frekvence 25 snímků/s. Po nasnímání pohybu ramene byl spuštěn proces vyhodnocení časů jednotlivých snímků a následně k nim náležejících snímkových souřadnic X a Y. Software tyto hodnoty automaticky ukládá do textového souboru „vyhodnotenie.txt“, viz příloha č. 1. Takto bylo vyhodnoceno 750 pozic značky. Taktéž byl počítačem řídicí jednotky automaticky vytvořen protokol s časy zahájení a ukončení pohybů nosného ramene, viz příloha č. 2. Následující obrázek je ukázkou snímku s vloženými údaji o času.



Obr. 19: Pořízený snímek - polohovací rameno se značkou

5.1.3 Analýza časové synchronizace zařízení prostřednictvím vyhodnocení snímků

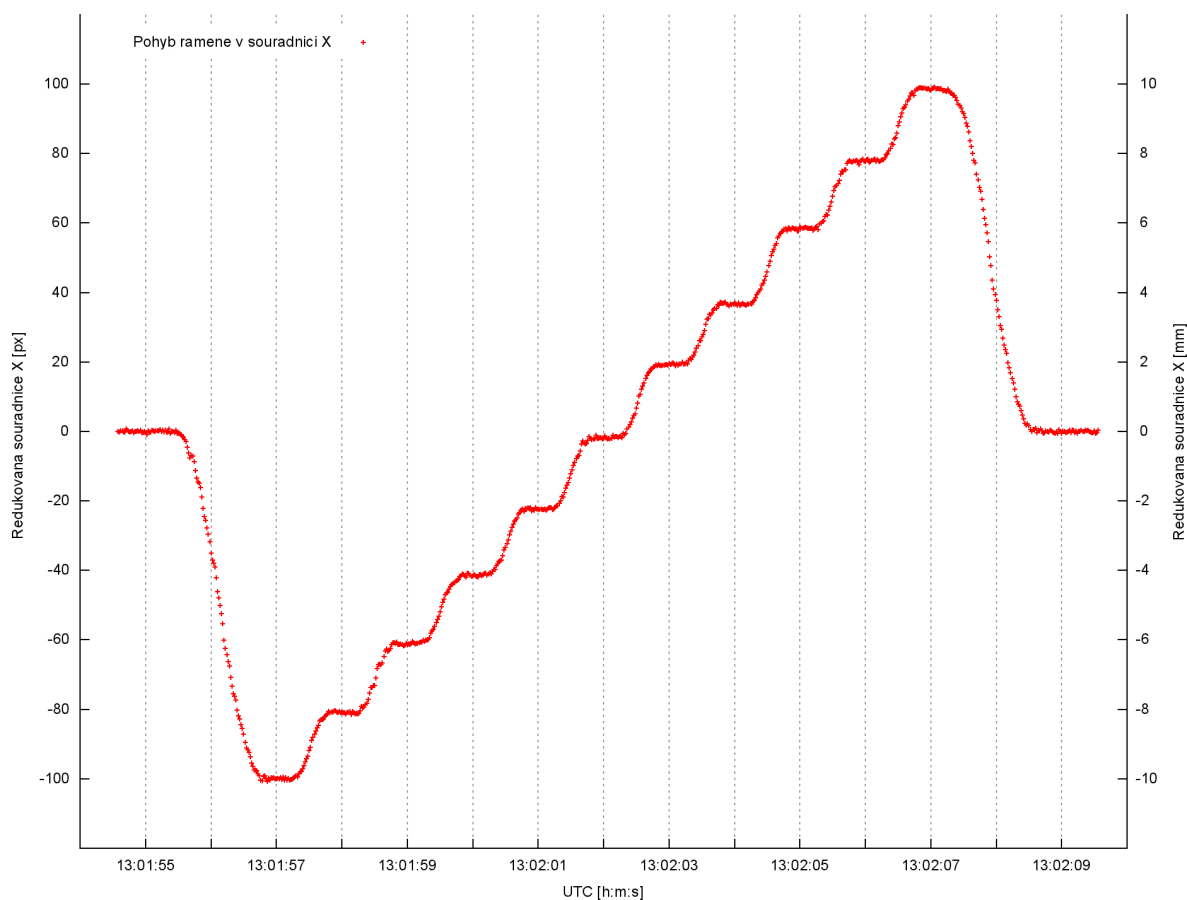
Proces vyhodnocení spočíval v grafickém zpracování hodnot ze souboru *vyhodnotenie.txt* do podoby grafu, který byl vytvořen v open-source softwaru Gnuplot. Dávkové soubory pro vykreslení grafů na obr. 20 a 21 tvoří přílohu č. 3. Tyto soubory lze spustit v SW Gnuplot pod operačním systémem Windows např. příkazem *load "graf_obr_20.dem"*.

Jelikož pohyb značky ve vertikálním směru (odpovídá ose Y snímkového s. s.) vykazuje rozptyl 1,9 px, byl tento zanedbán a dále pro vyhodnocení uvažován pouze pohyb ve směru osy X, viz obr. 18. Pro vytvoření představy o velikosti vykonaného pohybu byly hodnoty souřadnic v [px] přepočteny na [mm] dle vzorce:

$$X_{[m]} = a * X_{[px]} = \frac{d_{[m]}}{d_{[px]}} * X_{[px]} = \frac{2s * tg\alpha}{d_{[px]}} * X_{[px]}, \text{ kde} \quad (5.1)$$

$$d_{[px]} = X_{max} - X_{min} = 199,9 \text{ px}; s = 0,1151 \text{ m a } \alpha = 5^\circ$$

Souřadnice X byly navíc redukovány odečtením průměrné hodnoty souřadnice X výchozí polohy. V této podobě byly souřadnice v závislosti na čase vyneseny do grafu, který je zobrazen na obr. 20. Z grafu je jasně patrné, že pohyb zařízení je korektní, resp. že v každou celou sekundu času UTC se mezi pozicemi -5° až $+5^\circ$ polohovací rameno nacházelo v klidu.



Obr. 20: Grafické znázornění pohybu ramene v závislosti na čase

Kromě tohoto zpracování byl soubor získaných dat taktéž použit k další analýze pohybu zařízení s ohledem na jeho časovou synchronizaci. Jelikož máme k dispozici protokol s časy zahájení a ukončení pohybů nosného ramene a ze snímků lze taktéž tyto časy nezávisle vyhodnotit, lze posoudit difference mezi těmito odpovídajícími si časy. Velikosti diferencí pak můžou potvrdit korektní chod řídicího programu zařízení či v opačném případě vypovídat o přítomnosti možných systematických vlivů v procesu řízení pohybu (zpoždění průchodem přes elektronické součásti řídicí jednotky).

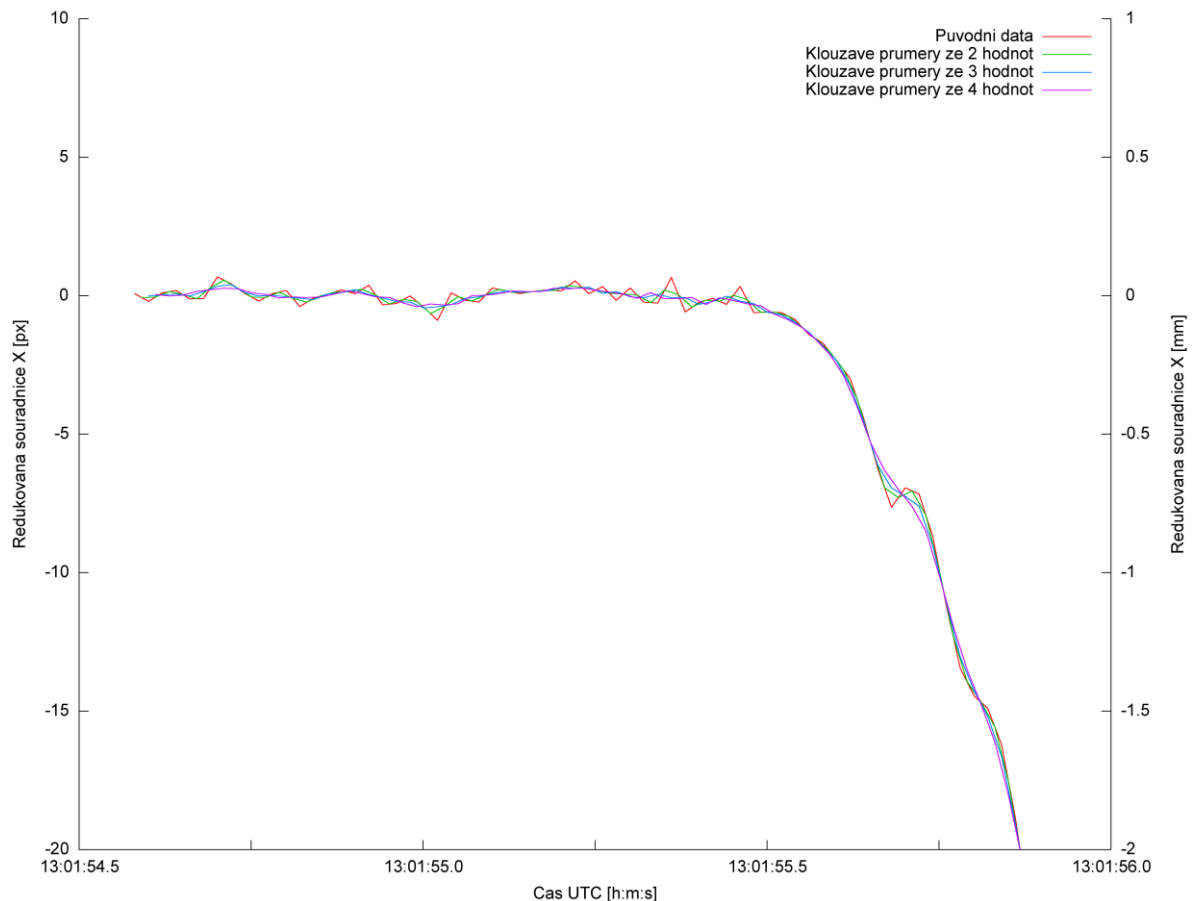
5.1.3.1 Vyhodnocení časů zahájení a ukončení pohybů ze snímků

Pro tyto účely bylo třeba navrhnout metodu určení těchto časů, respektive najít dvojici po sobě následujících poloh značky, mezi kterými prokazatelně došlo ke změně její polohy. K tomu nám poslouží testovací kritérium vypočtené z téměř sta známých souřadnic X první a poslední klidové pozice ramene ve svislé poloze. Jelikož však chod ramene není naprosto plynulý a proces vyhodnocení souřadnic je charakterizován určitou mírou nejistoty, původní vyhodnocená data (souřadnice X) obsahují jistou hodnotu šumu, a proto se jeví pro výpočet kritéria i následné testování jako nevhodná. Proto byly z těchto dat postupně vypočteny klouzavé průměry ze dvou, tří a čtyř po sobě následujících poloh značky redukující velikost šumu v datech dle vzorců:

$$X_{prum2} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} X_i + X_{i+1}}{2} \quad X_{prum3} = \frac{\sum_{i=1}^{n-2} X_i + X_{i+1} + X_{i+2}}{3}$$

$$X_{prum4} = \frac{\sum_{i=1}^{n-3} X_i + X_{i+1} + X_{i+2} + X_{i+3}}{4} \quad (5.2)$$

Graficky bylo ověřeno, že aplikace klouzavých průměrů vyššího stupně je efektivní a nevznášá systematický posun do vyhodnocovaných dat, viz následující obrázek:



Obr. 21: Ukázka šumu v původních datech a efektu klouzavých průměrů

Testovací kritérium bylo vypočteno dvěma různými metodami. První varianta kritéria je vypočtena na základě střední chyby hodnot klouzavých průměrů, zatímco druhá varianta vychází přímo ze střední chyby rozdílů po sobě následujících klouzavých průměru, viz příloha č. 4 či následující přehled vzorců (5.3):

Vzorce pro výpočet 1. testovacího kritéria:

$$X_{prum} = \frac{\sum X_i}{n}$$

$$m_{1 Xprum} = \sqrt{\frac{\sum (X_{prum} - X_i)^2}{n - 1}}$$

$$m_{1 \Delta Xprum} = m_{1 Xprum} \sqrt{2}$$

$$\delta_{1.test.krit} = t m_{1 \Delta Xprum} = 2 m_{1 \Delta Xprum}$$

Vzorce pro výpočet 2. testovacího kritéria:

$$m_{2 Xprum} = \sqrt{\frac{\sum \Delta X_{prum}^2}{n}}$$

$$\delta_{2.test.krit} = t m_{2 Xprum} = 2 m_{2 Xprum}$$



Jelikož budou kritériem ve finále testovány rozdíly klouzavých průměrů, za vhodnější kritérium bylo zvoleno řešení dle druhé varianty. Testovací kritérium tedy představuje mezní hodnotu velikosti difference mezi dvěma po sobě následujícími vyhlazenými polohami sledované značky takovou, aby byl stav zařízení vyhodnocen jako klidový. Je-li tato hodnota překročena, je konstatováno, že s rizikem 5 % nastal pohyb zařízení. Taktéž bylo třeba rozhodnout, zda kritérium vypočteme z klouzavých průměrů ze dvou, tří či čtyř hodnot. Z důvodu největší eliminace šumu v datech bylo zvoleno jako finální řešení testovací kritérium vypočtené z klouzavých průměrů čtyř hodnot. Takto vypočteným souřadnicím X byly přiděleny časy vypočtené taktéž jako klouzavé průměry původních časů jednotlivých pozic. Z vyhlazených po sobě následujících pozic souřadnic X byly vypočteny difference dle vztahu:

$$\Delta X_{i\ prum} = |X_{i+1\ prum} - X_{i\ prum}| \quad \text{a k nim byly přiřazeny časy:} \quad (5.4)$$

$$t_{\Delta X_{i\ prum}} = \frac{t_{X_{i\ prum}} + t_{X_{i+1\ prum}}}{2} \quad (5.5)$$

Soubor diferencí po sobě následujících vyhlazených pozic značky (viz příloha č. 4, list 5) byl tedy pomocí druhého testovacího kritéria rozdělen na střídavě se vyskytující podsoubory vykazující klidové pozice a podsoubory značící pohyb. Jako hledané časové okamžiky počátků resp. konců pohybu jsou určeny průměrné časy diferencí ležících na rozhraní jednotlivých podsouborů, které se de facto rovnají časům $t_{X_{i\ prum}}$. Zjištěné hodnoty časů byly spolu s hodnotami známými z protokolu sestaveny do tabulky, kde byly vypočteny i jejich difference nabývající bez výjimky na konci pohybu záporných a na jeho začátku kladných hodnot, viz list 6 přílohy č. 4. Zde uvádíme pouze průměrné hodnoty diferencí včetně střeňích chyb:

	Průměrná difference časů	Střední chyba průměrné
	UTC_{kamera} – UTC_{počítač} [s]	diference m_{dif prum} [s]
Konec pohybu	-0,09	0,01
Začátek pohybu	+0,05	0,01

Tab. 1: Vypočtené průměrné difference

Z uvedených hodnot a jejich znamének je zřejmé, že jak testovaný rozdíl časových šál PC a kamery, tak zpoždění v systému řízení ramene není ovlivňováno průchodem signálu z PC přes paralelní port a hradlové pole do driverů krokových motorů. Znaménka diferencí korespondují s principem řízení pohybu polohovacího zařízení uvedeným v kapitole 6.3. Po ukončení pohybu vyvolaného G0 či G1 kódem je spuštěn vnořený program ihned po svém spuštění zapisující čas ukončení pohybu do protokolu. Tento postup odpovídá faktu, že pro konec pohybu čas zaznamenaný počítačem nabývá vyšší hodnoty než čas vyhodnocený ze snímků, a tedy difference nabývá záporného znaménka. Na začátku pohybu je situace opačná. Tento čas je do protokolu zapsán těsně před ukončením vnořeného programu a samotným zahájením pohybu, což koresponduje s kladným znaménkem v tab. 1.



6 Plánování pohybu

Působením různých strojových chyb, vlivem zatížení ramene kalibrovanou anténou a dalších faktorů je možné, že realizované natočení polohovacího ramene s anténou je odchýleno od plánovaného. V rámci plánování pohybu tedy nejprve ověříme skutečné pohybové vlastnosti zařízení.

6.1 Testování pohybových vlastností zařízení

Předmětem tohoto testování je nezávislým měřením určit skutečné úhly natočení polohovacího ramene zařízení a porovnat je s naprogramovanými požadovanými úhly natočení ramene. Na základě zjištěných diferencí bude konstatováno, zda zařízení dosahuje požadované přesnosti vystavení jednotlivých poloh antény nebo zdali bude nutné v opačném případě zkorigovat jeho chod např. zavedením korekcí do observačního programu. (Kalina, Kratochvíl a kol. 2013)

Stejně jako v případě ověření časové synchronizace byl jako měřicí systém použit „Systém pro automatizované měření kmitajících objektů“, viz kap. 5.1.1. Zatímco v předchozím testování byla pozornost věnována především vyhodnocení časů jednotlivých pozic značky, v tomto testování jsou předmětem zájmu přesné souřadnice pozic značky v objektovém systému. Z uvedeného vyplývá, že před samotným měřením bylo nutné provést snímání pro tyto účely vytvořeného kalibračního pole a následně vyhodnocením snímků kalibračního pole získat množinu identických bodů potřebných pro transformaci souřadnic jednotlivých pozic ze snímkového systému na souřadnice v systému objektovém. Metodě určení transformačních parametrů potřebných pro přepočítání snímkových souřadnic jednotlivých pozic značky do souřadnic objektových se věnuje následující podkapitola.

6.1.1 2D projektivní prostor a projektivní transformace

Z důvodu jednodušších výpočtů a především snadnější práce s nevlastními body (body v nekonečnu) se všechny potřebné výpočty odehrávají v tzv. rozšířeném 2D Eukleidovském prostoru zvaném též 2D projektivní prostor. Tento prostor vzniká rozšířením standardně užívaného 2D Eukleidovského prostoru o tzv. ideální body ležící v nekonečnu, což řeší problém existence nekonečna jako průsečíku rovnoběžných přímek. Touto cestou je tedy vytvořen 2D projektivní prostor - prostor, kde se každé dvě přímky vždy protnou v bodě, i když v některých případech ve speciálním ideálním bodě v nekonečnu. Celá kapitola včetně podkapitol je zpracována na základě (Hartley, Zisserman 2003).



6.1.1.1 Převod souřadnic mezi 2D Eukleidovským a 2D projektivním prostorem (mezi \mathbb{E}^2 a \mathbb{P}^2)

Nyní je namístě vysvětlit, jak body v nekonečnu vznikají. V \mathbb{E}^2 je bod reprezentován uspořádanou dvojicí reálných čísel (x, y) . Nic nám nebrání, abychom k tomuto páru přidali další souřadnici a vytvořili tak trojici $(x, y, 1)$, o které tvrdíme, že reprezentuje totožný bod. Kdykoliv je tedy možné přejít z jedné reprezentace bodu do druhé pouhým přidáním resp. ubráním třetí souřadnice. Definujme, že uspořádané trojice $(x, y, 1)$ a $(2x, 2y, 2)$ představují tentýž bod, dokonce každá libovolná trojice (kx, ky, k) , kde k je nenulové číslo, reprezentuje daný bod. Jinými slovy řečeno, body jsou reprezentovány ekvivalentními třídami trojic souřadnic, přičemž dvě trojice jsou ekvivalentní (tvoří třídu) tehdy, je-li jedna násobkem druhé. Tyto souřadnice pak nazýváme homogenními souřadnicemi bodu.

Je zřejmé, že ze souřadnic (kx, ky, k) snadno vytvoříme původní souřadnice (x, y) vytknutím konstanty k . Jaký bod však odpovídá trojici $(x, y, 0)$? Snažíme-li se vytknout poslední souřadnici, obdržíme bod $(x/0, y/0)$ reprezentující nekonečno. Body v nekonečnu jsou tedy v \mathbb{P}^2 vyjádřeny homogenními souřadnicemi, ve kterých je poslední souřadnice nulová. Obecně lze každý Eukleidovský prostor \mathbb{E}^n transformovat stejným způsobem do projektivního prostoru \mathbb{P}^n .

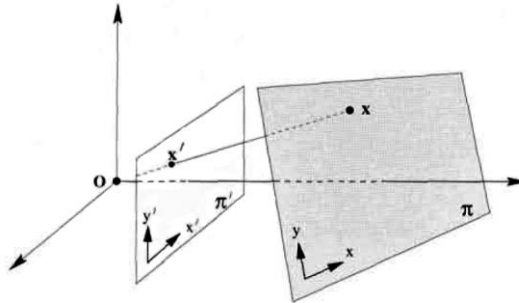
6.1.1.2 Projektivní transformace

2D projektivní geometrie se obecně zabývá studiem vlastností projektivní roviny \mathbb{P}^2 , které zůstávají invariantní v rámci množiny transformací známých jako projektivní zobrazení. Pro projektivní zobrazení jsou rovněž často používány ekvivalentní termíny kolineární či projektivní transformace a homografie. Jednoduše řečeno lze jako projektivní zobrazení označit libovolné invertibilní zobrazení bodů v \mathbb{P}^2 do bodů v \mathbb{P}^2 , které zobrazí přímku opět jako přímku. Přesněji řečeno je rovinná projektivní transformace definována jako lineární transformace na vektory reprezentované regulární maticí rozměru 3x3:

$$\begin{pmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \quad \text{či zkráceně} \quad x' = Hx \quad (6.1)$$

Matici H označujeme jako tzv. homogenní matici, jelikož stejně jako v případě homogenní reprezentace bodu jsou podstatné pouze poměry jednotlivých prvků matice. Mezi devíti prvky matice tedy existuje osm navzájem nezávislých poměrů, z čehož vyplývá, že projektivní transformace má osm stupňů volnosti (osm neznámých parametrů).

Příkladem projektivní transformace (viz obr. 22) je středové promítání se středem O a dvojicí ploch π a π' , jež mapuje body z jedné plochy na body plochy druhé $\{x_i \leftrightarrow x'_i\}$. Z tohoto plyne, že také přímky jedné plochy jsou mapovány na přímky plochy druhé.



Obr. 22: Středové promítání jako příklad projektivní transformace (Hartley, Zisserman 2003)

Rovnice (6. 1) může být taktéž zapsána v nehomogenní formě ve tvaru:

$$x' = \frac{x'_1}{x'_3} = \frac{h_{11}x+h_{12}y+h_{13}}{h_{31}x+h_{32}y+h_{33}}, \quad y' = \frac{x'_2}{x'_3} = \frac{h_{21}x+h_{22}y+h_{23}}{h_{31}x+h_{32}y+h_{33}}. \quad (6.2)$$

Každý bod, jehož souřadnice jsou známy v původním i novém systému, generuje dvě rovnice, pomocí nichž lze vypočítat prvky matice H:

$$\begin{aligned} x'(h_{31}x + h_{32}y + h_{33}) &= h_{11}x + h_{12}y + h_{13} \\ y'(h_{31}x + h_{32}y + h_{33}) &= h_{21}x + h_{22}y + h_{23}. \end{aligned} \quad (6.3)$$

Z uvedeného plyne, že k vyřešení je třeba minimálně čtyř identických bodů ležících ve vzájemné obecné poloze, což znamená, že žádné tři body nesmí být kolineární (nesmí ležet na jedné přímce). Výpočet prvků matice H nevyžaduje znalost parametrů kamery.

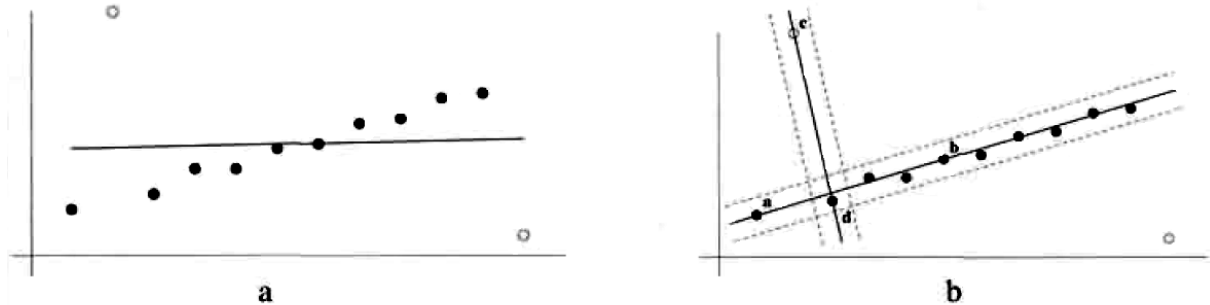
Je nutné však zdůraznit, že výpočet prvků matice z rovnic (6. 3) probíhá pouze z minimálního nutného počtu parametrů a nelze jej obecně doporučit. Preferovaný postup výpočtu prvků matice H je zpracování nadbytečného počtu měření vhodným typem vyrovnání (např. metodami robustního vyrovnání).

6.1.1.2.1 Robustní vyrovnání - metoda RANSAC

V případě zpracování obrazových dat se obecně nepředpokládá, že množina korespondencí $\{x_i \leftrightarrow x'_i\}$ obsahuje pouze náhodné chyby a má tedy Gaussovo rozdělení pravděpodobnosti. V mnohých praktických případech nejsou totiž korespondence z obrazových dat určeny správně a je nutné efektivním postupem identifikovat odlehlé body (tzv. outliers), které by mohly v případě nevyločení z výpočtu výrazně narušit korektní odhad určovaných parametrů. Robustní vyrovnání tedy vyloučí z množiny vstupních dat data odlehlá a ze zbylých vzájemně konzistentních dat (tzv. inliers) odhadne neoptimálnějším způsobem výsledné hledané parametry. Jednou z metod robustního

vyrovnání je velice obecný algoritmus vyrovnání - Konsenzus náhodného výběru (RANSAC - RANdom SAmple Consensus) představený v roce 1981 autory M. A. Fischlerem a R. C. Bollesem.

RANSAC je vhodným matematickým aparátem pro interpretaci dat obsahující nemalé procento hrubých chyb. Podstatu algoritmu lze demonstrovat na jednoduchém příkladu proložení přímky danými body v rovině, viz obr. 23.



Obr. 23: Lineární regrese versus RANSAC (Hartley, Zisserman 2003)

V obrázku 23a lze vidět výsledek proložení přímky množinou vstupních bodů vyrovnáním MNČ. Na první pohled je jasné, že výsledek vyrovnání je nepřijatelný. V druhé části obrázku je ilustrováno řešení algoritmem RANSAC. Náhodně jsou vybrány dva body, které definují přímku. „Podpora“ této přímky jako finálního řešení je tím vyšší, čím víc bodů leží v intervalu vymezeném zvolenou prahovou hodnotou (tzv. inliers). Náhodný výběr dvojice bodů je opakován a přímka, která obdržela největší podporou je považována jako robustní odhad. Jinak řečeno, RANSAC na počátku algoritmu používá co nejmenší množinu počátečních dat, kterou, pokud je to možné, rozšiřuje konzistentními daty.

V případě vstupní množiny dat S , obsahující víc prvků než počet určovaných parametrů k a odlehlá data, lze RANSAC algoritmus popsat následujícími kroky:

1. Náhodný výběr podmnožiny s_1 množiny S o k prvcích a odvození matematického modelu M_1 z této podmnožiny.
2. Na základě znalosti modelu M_1 určení podmnožiny s_1' množiny S , která se nachází v intervalu vymezeném prahovou hodnotou t (v chybové toleranci M_1). Množinu s_1' nazýváme množinou konsenzů množiny s_1 .
3. Jestliže je počet prvků v množině s_1' větší než práh T (viz dále), použití všech prvků množiny s_1' k opětovnému výpočtu modelu M_1' a ukončení algoritmu.
4. Jestliže je počet prvků v množině s_1' menší než práh T , náhodné zvolení nové množiny s_2 a opakování celého procesu.
5. Jestliže po provedení předem stanoveného počtu cyklů N (viz dále) není nalezena množina konsenzů s T a více prvky, je vybrána největší množina konsenzů s_i' a model je opětovně vyrovnán pomocí všech prvků množiny konsenzů s_i' .

V průběhu výpočtu jsou využity tři parametry - t , T a N :

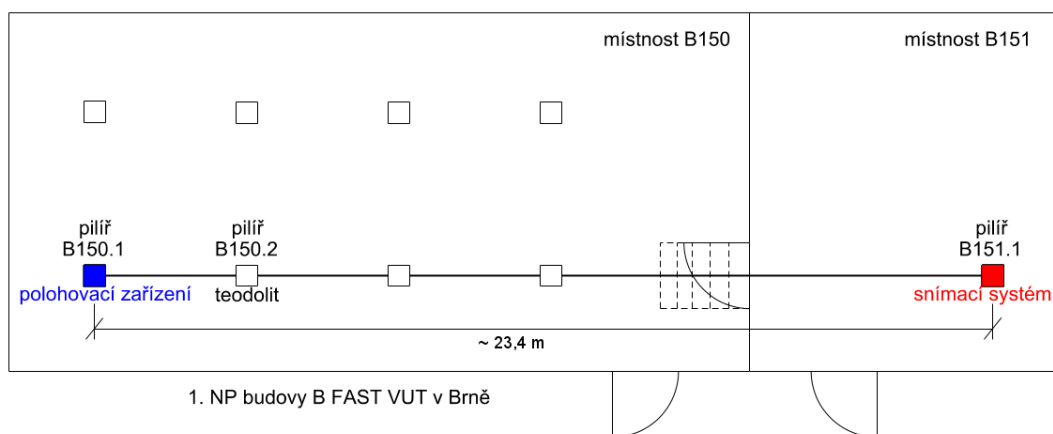
- **Prahová hodnota t** - tolerance chyb, pomocí které se rozhoduje, zda bod je, či není kompatibilní s modelem (zda je inlier či outlier).
- **Počet bodů T** - minimální počet navzájem konzistentních bodů podmnožiny s_i' , který značí nalezení správného modelu. Hodnota T je funkcí odhadu počtu hrubých chyb v množině S .
- **Počet výběrů podmnožin N** - maximální počet podmnožin k výpočtu, stanoveno na základě velikosti množiny vstupních dat a odhadu počtu odlehlých bodů obvykle s rizikem $\alpha = 1\%$. V případě, kdy neznáme počet odlehlých bodů, se provádí výpočet počtu cyklů tzv. adaptivním způsobem - na počátku algoritmus pracuje s nejhorším odhadem počtu odlehlých bodů a na základě nalezení větších množin konsenzů se odhad aktualizuje.

Podrobnější informace o volbě parametrů jsou uvedeny na str. 118-121 v (Hartley, Zisserman 2003).

6.1.2 První testovací měření

Jak bylo již řečeno, při tomto měření jsou předmětem vyhodnocení souřadnice pozic značky v objektovém systému. Jelikož nemáme zájem o informace o přesných časech vystavení jednotlivých pozic, snímací systém mohl být sestaven v interiéru bez připojení přijímače signálu GPS i vkládače času. S ohledem na testovací pohyb ramene kolem osy motoru M2 v intervalu od -90° do $+90^\circ$ a velikost zorného pole kamery bylo nutné zvolit dostatečně dlouhou základnu, aby se celý pohyb nacházel v zorném poli. Jako základna s nevhodnějšími parametry byla zvolena základna mezi pilíři B150.1 a B151.1 v místnostech B150 a B151 v 1. NP budovy B Fakulty stavební VUT v Brně o délce přibližně 23,4 m, viz obr. 24, kde byla dne 6. 12. 2013 pořízena testovací data.

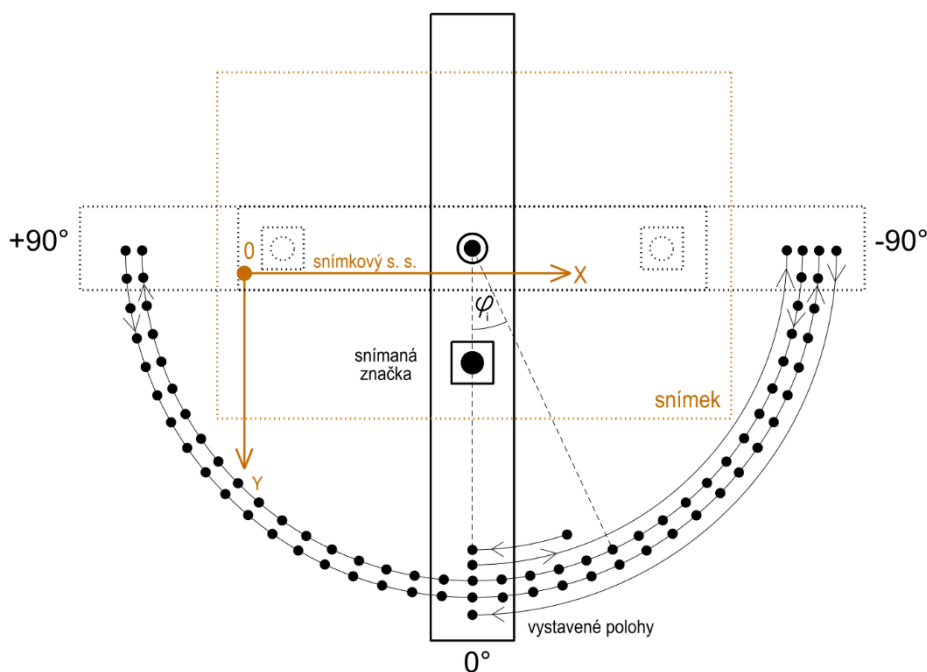
Dle délky základny a informací v (Komačka 2011a) byla vypočtena velikost snímané značky - plného černého kruhu průměru 11,7 mm. Při umístování značky na rameno byl brán zřetel nejen na to, aby byla její vzdálenost od osy otáčení motoru M2 co možná největší, ale také na to, aby bezpečně ležela v každé poloze ramene v zorném poli kamery.



Obr. 24: Schéma umístění měřické základny

Pro účely určení parametrů následné projektivní transformace, která zajistí převod snímkových souřadnic na souřadnice v objektovém systému, bylo vytvořeno kalibrační pole. Pole je dle (Komačka 2011a) tvořeno 6 řadami a 11 sloupci plných černých kruhů o průměru 2,1 mm se vzájemnou roztečí 19,9mm. Pole bylo vytištěno na laserové tiskárně a nalepeno z důvodu zajištění vyšší stability na karton, viz obr. 27.

Před samotným snímáním musel být nosník zařízení ustaven do základní svislé polohy ($\gamma=0^\circ$). Toho bylo dosaženo pomocí totální stanice umístěné na pilíři B150.2. Svislým vláknem ryskového kříže bylo zacíleno na hrot H2 umístěný pod motorem M2, který leží ve svislé ose zařízení. Tento horizontální směr zůstává neměnný a dále byla využívána pouze vertikální ustanovka. Polohovacím ramenem bylo kolem osy motoru M1 otočeno tak, aby osa motoru M2 ležela ve vertikální rovině procházející záměrnou přímkou. Dále bylo rameno natáčeno okolo osy motoru M2 tak, aby i hrot H3, nacházející se v místě budoucího upnutí kalibrované antény, ležel v této svislé rovině. Do této svislé výchozí polohy bylo stejně jako v ostatních měřeních najížděno ze záporného do kladného směru pohybu, viz obr. 25.



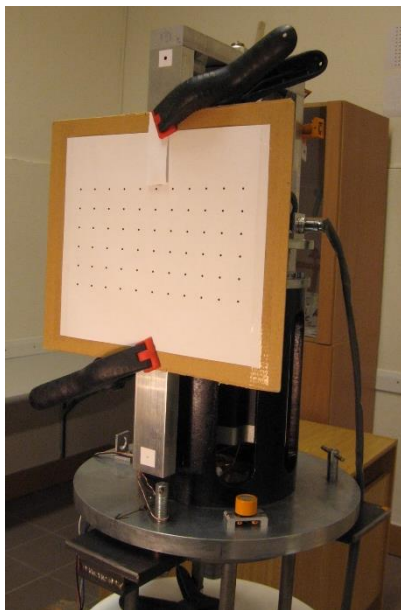
Obr. 25: Schéma pohybu při testovacím měření

Pohyb zařízení byl naplánován z nulové výchozí polohy dle schématu uvedeného na obr. 25 s krokem 5° a zastavením na dobu 0,5 s v každé pozici. Jelikož je doba snímání při frekvenci 25 FPS (Frames Per Second) omezena vzhledem k parametrům připojeného notebooku hodnotou přibližně 15 s, bylo nutné celý naplánovaný pohyb rozdělit do 14 podbloků. V pozicích, kdy bylo nutné pohyb zastavit a v notebooku snímacího zařízení nastavit nový projekt snímání, byla za účelem zvětšení časového prostoru pro ruční přesušení pohybu nastavena čekací doba v pozici 2 s, viz ukázka z observačního programu testovacího pohybu:

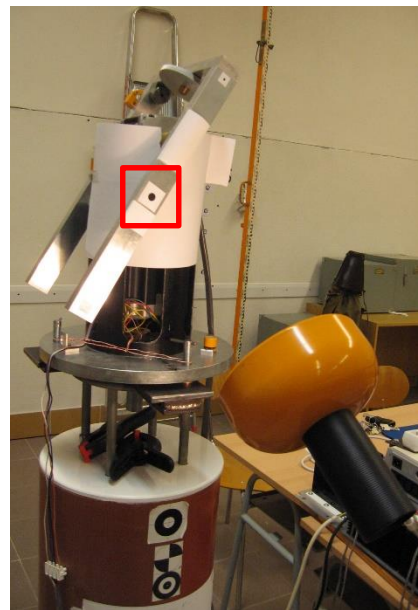
```
G0 Y+000 (rychly presun max rychlosti)
G4 P2.0 (cekani 2.0 s)
G0 Y-090
G4 P2.0
G1 Y-085 F480 (feed rate per minute, minimalne prvni F musi byt
nastavena)
G4 P0.5 (cekani 0.5 s)
G1 Y-080 F480
G4 P0.5
G1 Y-075 F480
G4 P0.5
G1 Y-070 F480
G4 P0.5
G1 Y-065 F480
G4 P0.5
G1 Y-060 F480
G4 P2.0
```

Obr. 26: Ukázka začátku observačního programu

Samotné snímání bylo započato pořízením snímků výše popsaného kalibračního pole. Pole bylo k polohovacímu rameni připevněno pomocí plastových svorek v takové pozici, aby prostřední sloupec bodů kalibračního pole ležel opět ve zmíněné svislé rovině dané záměrnou přímkou totální stanice, viz obr. 27.



Obr. 27: Fotografie upevněného kalibračního pole



Obr. 28: Fotografie z průběhu snímání

Po nasnímání kalibračního pole bylo postupně nasnímáno 14 podbloků celého naprogramovaného testovacího pohybu. Z důvodu vytvoření optimálních světelných podmínek byla scéna nasvícena stolní lampou, viz obr. 28. Celkem byly pořízeny dva bloky dat. První blok obsahuje nasnímaný pohyb ramene se závažími připevněnými pod horním překladem (vyvážený stav ramene). Druhý blok dat obsahuje pohyb ramene se závažími připevněným ve spodní části ramene (nevyvážený

stav ramene). Na základě vzájemného porovnání výsledků vyhodnocených z jednotlivých bloků budeme moci konstatovat, zda zatížení ramene anténou při kalibraci ovlivňuje pohybové vlastnosti polohovacího ramene a bude jej třeba kompenzovat protizávažím ve spodní části ramene či nikoliv.

6.1.3 Vyhodnocení dat získaných z prvního testovacího měření

Proces vyhodnocení objektových souřadnic snímané značky na polohovacím rameni lze rozdělit do tří kroků:

I. Určení snímkových souřadnic bodů kalibračního pole

V softwaru *camera.exe* (Komačka 2011b) se v otevřeném projektu zvolí položka „Vyhodnotenie » Kalibrácia“. Zde se v liště na pravé straně okna nastaví rozestup terčů v desetinách mm (199), počet terčů v řadě (11) a sloupci (6), viz obr. 29. Kliknutím se pak označí v daném pořadí terč v levém horním, pravém horním a nakonec v levém dolním rohu kalibračního pole. Levý horní terč je pak zvolen jako počátek snímkového souřadnicového systému, viz obr. 25. Zvolením položky „Nájdí ostatné“ jsou vyhledány zbývající terče (pokud nejsou vyhledány všechny terče, lze je po automatickém vyhledání určit ručně). Kliknutím na položku „Kalibruj“ dojde po uzavření okna k vytvoření souboru *calibration.csv*, který na každém řádku obsahuje objektové a snímkové souřadnice X, Y bodů kalibračního pole v desetinách mm resp. pixelech.



Obr. 29: Okno *camera.exe* s kalibračním polem

II. Určení snímkových souřadnic jednotlivých pozic značky

V softwaru *camera.exe* (Komačka 2011b) dále zvolíme položku „Vyhodnotenie » Poloha terčov“. Zde pouze označíme značku na prvním snímku a další vyhodnocení probíhá již automatizovaně. Výstupem je pak soubor *positions.csv* obsahující snímkové souřadnice pozic značky. V tomto kroku



musela být původní aplikace na vyhodnocení dat jejím autorem upravena a uzpůsobena k vyhledávání terčů na samotných okrajích snímků (pozice +90°, -90°).

III. Transformace snímkových souřadnic do objektového systému

Projektivní transformaci provedeme pomocí aplikace *homography.exe* (Komačka 2014), kterou spustíme z příkazového řádku operačního systému Windows příkazem v obecném tvaru *homography.exe < path_to_project > [RANSAC reprojection error threshold in px - default 5px]*. Kromě samotného spuštění aplikace vyžaduje povinný parametr *path_to_project*, který popisuje cestu k adresáři s projektem obsahujícím soubory *calibration.csv* a *positions.csv*. Volitelným parametrem je pak velikost projekční chyby - tzv. prahová hodnota *t* (RANSAC reprojection threshold), viz kap. 6.1.1.2.1, která je nastavena implicitně na hodnotu 5 px. Příkazem *homography.exe .\project 4.2 1>project\transformed.log* pak tedy nastavíme pro daný projekt s názvem *project* prahovou hodnotu na požadovanou velikost (zde 4,2 px) a výstup z aplikace směřující do terminálu navíc můžeme přesměrovat např. do souboru *transformed.log*. Kromě tohoto souboru je vytvořen i soubor *transformed.csv* obsahující již objektové souřadnice jednotlivých pozic značky X, Y v desetinách mm.

Část souboru *transformed.log* je pro ukázkou znázorněna na následujícím obrázku:

```
Processing path .\project
Using RANSAC reprojection threshold 4.2 px
Parsing file .\project\calibration.csv
Parsing finished
Parsing file .\project\positions.csv
Parsing finished
Computing projective transformation
Transformation computed
Transformation matrix:
[0.9993705933478511, -0.009723982353986641, -0.001882996204272858;
 0.006946737257733203, 1.000398120568976, 0.0003132623500378955;
 -0.001697869427345456, 0.001225262098229399, 1]
Standard deviation of reprojection error: [1.407991, 1.459987] E-4m
Transformed points:
Id      ImgX[px]      ImgY[px]      DstX[E-4m]      DstY[E-4m]      ReprojX[E-4m]      ReprojY[E-4m]      Residual[E-4m]      ResidualY[E-4m]      Inlier[0/1]
0       14.027778     78.555557     0.000000     0.000000     -1.155762         2.994873         -1.155762         2.994873         1
1       618.056580    75.000000     1990.000000    0.000000     1986.876587       2.718292         -3.123413         2.718292         1
2       17.291666     380.583344    0.000000     995.000000    1.529602         994.833313       1.529602         -0.166687         1
3       14.577181     137.859055    0.000000     199.000000    -0.927246         198.004761       -0.927246         -0.995239         1
4       16.000000     199.000000    0.000000     398.000000    2.111389         398.940552       2.111389         0.940552         1
5       16.500000     259.777771    0.000000     597.000000    2.137939         598.528198       2.137939         1.528198         1
6       15.428572     319.630249    0.000000     796.000000    -2.951355         794.905701       -2.951355         -1.094299         1
7       74.776474     77.894119     199.000000    0.000000     197.939087       1.967285         -1.060913         1.967285         1
8       75.978722     138.170212    199.000000    199.000000    200.214783       200.282867       1.214783         1.282867         1
9       76.875000     198.666672    199.000000    398.000000    201.480164       399.184570       2.480164         1.184570         1
10      75.730156     258.357147    199.000000    597.000000    196.081665       595.258057       -2.918335         -1.741943         1
```

Obr. 30: Ukázka ze souboru *transformed.log*

V úvodních řádcích obrázku vidíme cestu k souboru, hodnotu projekční chyby a transformační matici $H_{(3 \times 3)}$, viz kap. 6.1.1.2. Pod transformační maticí jsou uvedeny hodnoty výběrové směrodatné odchylky m_X a m_Y v desetinách mm vypočtené z oprav na jednotlivých bodech kalibračního pole. V druhé části souboru jsou pak pro jednotlivé body kalibračního pole uvedeny snímkové souřadnice *ImgX* a *ImgY*, souřadnice v cílovém souřadnicovém systému *DstX* a *DstY*, přetransformované objektové souřadnice *ReprojX* a *ReprojY*, opravy $ResidualsX = DstX - ReprojX$ a $ResidualsY = DstY - ReprojY$ a v posledním sloupci zhodnocení, zda byl (1) či nebyl (0) daný bod zahrnut do výpočtu transformačních parametrů.

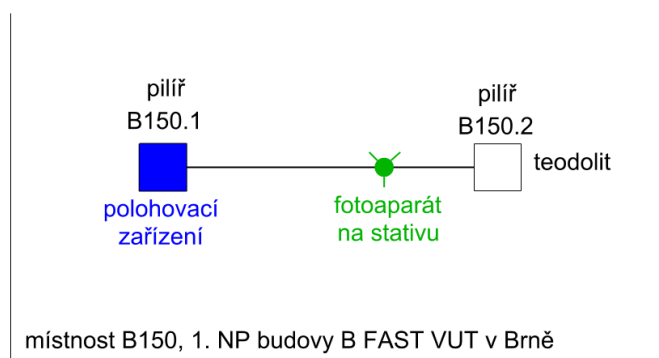
Analýzou přetransformovaných souřadnic bylo zjištěno, že souřadnice pozic značky ležící v těsné blízkosti krajů snímků (pozice $+90^\circ$, -90°) nebyly správně vyhodnoceny. I když by měl být rozptyl souřadnic Y v klidové pozici velmi malý, souřadnice vykazují rozptyl na úrovni 0,13 mm, což výrazně přesahuje očekávanou hodnotu či hodnotu v souřadnici X ($m_x = 0,01 \text{ mm}$). Zjištěné chyby jsou pravděpodobně způsobeny nedokonalým výpočetním algoritmem aplikovaným na terče v okrajových pozicích. Chyby pouze v souřadnici Y taktéž ukazují na souvislost problému s metodou prokládání řádků a jejich následným zpracování.

Z tohoto důvodu jsou výsledné souřadnice z prvního testovacího měření pro další zpracování nepoužitelné a bylo nutné přistoupit k druhému testovacímu měření.

6.1.4 Druhé testovací měření

Vzhledem ke zjištěným nedostatkům zvoleného měřicího systému pro naši aplikaci byl při druhém měření zvolen systém v částečně pozměněné podobě. Především s ohledem na nízkou kvalitu snímků způsobenou nízkým rozlišením kamery takřka na hranici použitelnosti pro námi potřebné velké vzdálenosti, bylo při druhém snímání využito běžného digitálního fotoaparátu Olympus VR340. Taktéž bylo kompletně upuštěno od zpracování snímků metodou prokládání řádků.

Přípravné práce, kalibrační pole i testovací pohyb byl totožný jako při prvním snímání, viz kap. 6.1.2. Doba zastavení ramene s ohledem na frekvenci snímání 15 FPS byla zvolena v každé pozici na hodnotu 2 s. Fotoaparát byl připevněn na stativ ve vzdálenosti cca 3 m od polohovacího ramene a směrově byl zařazen do spojnice pilířů B150.1 a B150.2 v učebně B150, viz. obr. 31. Výška stativu a směr fotoaparátu byl volen tak, aby osa motoru M2 procházela přibližně středem záběru, viz obr. 25. Toto umístění má zajistit přibližně stejné radiální zkreslení pro všechny pozice značky.



Obr. 31: Rozmístění fotoaparátu a polohovacího zařízení

Daným fotoaparátem bylo dne 14. 4. 2014 nasnímáno kalibrační pole a testovací pohyb opět ve dvou variantách (závaží pod horním překladem a závaží ve spodní části ramene). Výstupem snímání je AVI soubor s rozlišením 1280*720 px. Následující obrázek dokumentuje proces snímání.



Obr. 32: Fotodokumentace druhého testovacího měření

6.1.5 Vyhodnocení dat získaných z druhého testovacího měření

V prvním kroku byly z částí pořízeného videa vytvořeny jednotlivé snímky. To bylo provedeno pod operačním systémem Ubuntu Linux v aplikaci *Ffmpeg* zadáním příkazu `ffmpeg -i video.AVI -r FPS -ss start time -t duration obr%4d.png`. Za snímkovou frekvencí byla dosazena hodnota 15 FPS. Počáteční čas (start time) je třeba zadat ve tvaru hh:mm:ss a délka (duration) se zadává v sekundách. Na konci příkazu je vepsán název výstupního souboru včetně požadovaného grafického formátu. Na vstupu do programu *camera.exe* jsou očekávány snímky kalibračního pole s názvy kalib0000.png, kalib0001.png atd. a snímky objektu s názvy obr0000.png, obr0001.png atd.

Pro vyhodnocení souřadnic z těchto snímků musela být aplikace *camera.exe* jejím autorem přizpůsobena aktuálnímu rozlišení snímků. Navíc byla aplikace upravena tak, aby byly souřadnice na rozdíl od prvního zpracování, kdy byly vyhodnocovány z jednotlivých pulsů, určovány z celých snímků. Vyhodnocení snímkových souřadnic pozic značek a jejich transformace do objektového systému probíhala dle popisu v kapitole 6.1.3. V druhém kroku bylo třeba navíc ověřit či editovat velikost korelačního okna se značkou (zvoleno 55 px, 35 px je průměr značky a 20 px okolí pro korelaci).

Kvalita provedené transformace může být hodnocena na základě hodnot výběrové směrodatné odchylky transformace $m_x = m_y = 0,07 \text{ mm}$.

Souřadnice získané vyhodnocením dat pořízených při druhém testovacím měření nejsou již zatížené hrubými chybami a lze je využít pro další zpracování - vyhodnocení úhlů natočení ramene v jednotlivých pozicích φ_i , viz obr. 25.

Pro vyhodnocení těchto hodnot byla jako nejvhodnější metoda zvolena metoda zprostředkujícího vyrovnání n bodů na kružnici. Neznámými parametry vyrovnání jsou souřadnice středu kružnice (středu otáčení ramene) X_S a Y_S , poloměr kružnice (vzdálenost značky od středu otáčení) R a především pro každou pozici značky středový úhel φ_i . Počet měření je tedy $2n$ a počet



určovaných parametrů $(3 + n)$. Pro účely vyrovnání byl v open-source softwaru Scilab vytvořen univerzální skript, viz příloha č. 5. Na vstupu je vyžadován textový soubor s vektorem objektových souřadnic, který obsahuje nejprve všechny souřadnice X_i jednotlivých pozic a následně všechny tomu náležící souřadnice Y_i již převedené na milimetry. Námi vytvořené bloky dat obsahují přibližně 4 000 pozic, tedy vstupní vektor souřadnic má přes 8 000 řádků. Na začátku skriptu je proveden výpočet přibližných hodnot středu X_{S_0}, Y_{S_0} a poloměru R_0 kružnice pomocí tří rovnoměrně rozmístěných bodů na kružnici vybraných automaticky ze vstupního vektoru souřadnic. Pomocí hodnot X_{S_0}, Y_{S_0} a R_0 byly vypočteny i přibližné hodnoty jednotlivých úhlů φ_{i_0} . Přetvořené rovnice oprav mají tvar:

$$\begin{aligned} v_{X_i} &= dX_s - \sin\varphi_{0_i} dR - R_0 \cos\varphi_{0_i} \frac{d\varphi_i}{\rho} + (X_{S_0} - R_0 \sin\varphi_{0_i} - X_i) \\ v_{Y_i} &= dY_s + \cos\varphi_{0_i} dR - R_0 \sin\varphi_{0_i} \frac{d\varphi_i}{\rho} + (Y_{S_0} + R_0 \cos\varphi_{0_i} - Y_i) \end{aligned} \quad (6.4)$$

Systém normálních rovnic byl řešen Gaussovou eliminační metodou, která byla upřednostněna před řešením pomocí inverzní matice z důvodu rychlejšího výpočtu při zmíněném objemu dat. Výstupem z vyrovnání je pak především vektor neznámých parametrů - vyrovnaných souřadnic středu kružnice, poloměru a úhlů jednotlivých pozic značky. Z důvodu práce s velkým objemem dat bylo kvalitativní hodnocení vyrovnání provedeno v samostatném skriptu, viz příloha č. 6. Střední chyba jednoho měření (jednoho vyrovnaného úhlu) je u prvního bloku dat (závaží pod horním přečtením) $m_{\varphi_1} = 6'$ a u druhého bloku (závaží ve spodní části ramene) $m_{\varphi_2} = 3'$.

V dalším kroku bylo třeba z hodnot vyrovnaných úhlů odpovídajících pozicím značky vybrat ty podmnožiny úhlů, které odpovídají jednotlivým klidovým pozicím ramene ($0^\circ, 5^\circ, 10^\circ \dots$), a z nich vypočítat jeden výsledný úhel pro každou klidovou pozici značky včetně střední chyby. Pro tyto účely byl opět v programu Scilab naprogramován univerzální skript (viz příloha č. 7), který zahrnuje následující výpočetní kroky:

1. Načtení vstupního vektoru vyrovnaných neznámých z předchozího vyrovnání a stanovení počtu klidových pozic značky r resp. s v počáteční resp. koncové nulové pozici ramene.
2. Vytvoření diferencí dif po sobě následujících úhlů.
3. Výpočet testovacího kritéria Δ jako dvojnásobku střední kvadratické difference vypočtené z diferencí úhlů v počáteční a koncové klidové pozici:

$$\Delta = 2 \sqrt{\frac{\sum_1^{r-1} dif_i^2 + \sum_{n/2-s+2}^{n/2} dif_i^2}{r+s-3}} \quad (6.5)$$

4. Testování diferencí dif hodnotou testovacího kritéria Δ a vytvoření proměnné $pohyb$ typu boolean obsahující pro $dif > \Delta$ hodnotu $\%t$ (true) a v opačném případě hodnotu $\%f$ (false).



5. Definování parametrů korelační masky (počet pozic pro stání a pro pohyb před i po stání) a její vytvoření. Jde opět o proměnnou typu boolean, pro naše účely obsahuje 51 prvků - 31 pozic stání (31 hodnot %f) ohraničených z obou stran 10 pozicemi značících pohyb (10 hodnot %t).
6. Definování pozice středu masky a středu stání a založení proměnné *mira_shody* vyjadřující míru shody prvků korelační masky s prvky proměnné *pohyb*.
7. Naplnění proměnné *mira_shody*, která obsahuje pro každou hodnotu vstupního úhlu číslo (od 0 do 51) vyjadřující počet odpovídajících si shodných prvků mezi prvky korelační masky a vektoru *pohyb*.
8. Nalezení indexu maximální hodnoty míry shody pro jednotlivé klidové pozice (je-li maximálních hodnot nalezeno více po sobě, je index určen jako na celé číslo zaokrouhlený průměr indexů maximálních hodnot).
9. Na základě znalosti indexu maximální hodnoty míry shody a zadaného počtu pozic stání (viz krok 5) jsou vypočteny a na obrazovku vypsány výsledné průměrné úhly jednotlivých klidových pozic a jejich střední chyby.

Na následujícím obrázku je ukázka části skriptu z fáze 5 - 7:

```
maska(1:maska_pohyb)=%t...//vytvoření-masky
maska(maska_pohyb+1:maska_pohyb+maska_stani)=%f
maska(maska_pohyb+maska_stani+1:2*maska_pohyb+maska_stani)=%t

stred=floor(length(maska)/2)+1...//pozice-středu-masky
stred_stani=floor(maska_stani/2)+1...//pozice-středu-stání

mira_shody(1:length(pohyb))=0

for i=stred:(length(pohyb)-stred+1)...//naplnění-vektoru-míry-shody
...citac=0
...for j=-stred+1:stred-1
...if(pohyb(i+j)==maska(stred+j))citac=citac+1
...end
...end
...mira_shody(i)=citac
end
```

Obr. 33: Ukázka ze skriptu pro výpočet definitivních úhlů

I když bylo polohovací rameno se značkou před snímaním ustaveno do svislé polohy, výsledné úhly pro pozici 0° nejsou při nájezdu z referenčního směru přesně nulové z důvodu nemožnosti umístit vyhodnocovanou značku přesně na svislici pod osu rotace M2 a z důvodu mírného stočení kalibračního pole vůči svislici. Všechny výsledné úhly je tedy třeba opravit o hodnotu průměru úhlů odpovídající pozici 0° při nájezdu ramene z referenčního směru. Je opodstatněné však průměrovat pouze hodnoty, které se navzájem příliš neliší. V získaném souboru dat se ale výsledné úhly odpovídající pozici 0° při nájezdu z referenčního směru navzájem výrazně liší (až o 0,18°). Tato skutečnost je prvním signálem značícím nevyhovující kvalitu vyhodnocených dat pro stanovené účely. Další analýzou dat bylo potvrzeno, že na jejich základě nelze potvrdit očekávané předpoklady. Lze pouze usuzovat,



že v průběhu snímání pohybu polohovacího ramene došlo k opakovanému narušení stability fotoaparátu pravděpodobně způsobené otřesy v budově.

Bylo tedy nutné přistoupit k třetímu testovacímu měření, které bylo s ohledem na nedostatky předchozích dat naplánováno na 1. 5. 2014, kdy byla předpokládána minimalizace vnějších vlivů na stabilitu měřícího systému.

6.1.6 Třetí testovací měření

Měření proběhlo totožným způsobem jako v případě druhého testovacího měření, viz kap. 6.1.4. Celý naprogramovaný testovací pohyb ramene, viz obr. 25, byl však nasnímán čtyřikrát - dvakrát se závažím pod horním překladem (vyvážený stav ramene) a dvakrát se závažím v dolní části ramene (nevyvážený stav ramene). Pořízené video soubory jsou dostupné u autora práce.

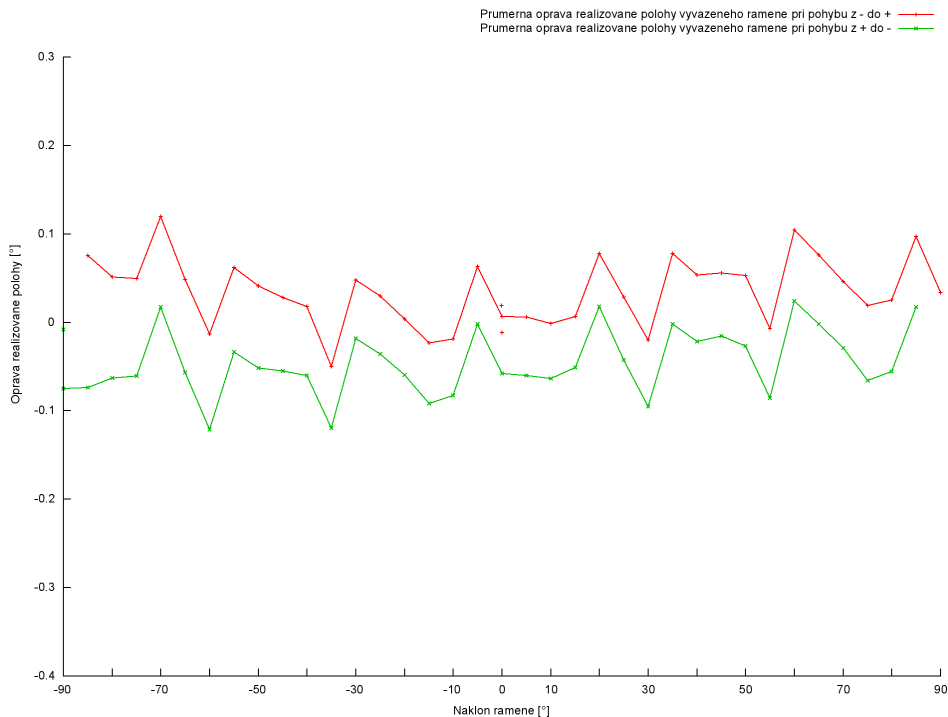
6.1.7 Vyhodnocení dat získaných z třetího testovacího měření

Vyhodnocení dat do fáze získání výsledných úhlů natočení ramene proběhlo dle postupu uvedeného v kapitole 6.1.5. Přesnost provedené projektivní transformace lze charakterizovat průměrnými hodnotami výběrové směrodatné odchylky transformace v osách $m_x = 0,08 \text{ mm}$ a $m_y = 0,06 \text{ mm}$. Průměrná střední chyba jednoho vyrovnaného úhlu určená při kvalitativním hodnocení vyrovnaní bodů na kružnici je pro vyvážený stav polohovacího ramene $m_{\varphi_1} = 1,8'$ a $m_{\varphi_2} = 0,9'$ pro stav nevyvážený. Tyto hodnoty jsou již několikanásobně nižší než dosažené přesnosti u dat z druhého testovacího měření a indikují tak podstatně vyšší kvalitu testovacího měření. Po vyhodnocení úhlů natočení ramene pro jednotlivé klidové pozice byly úhly redukovány o průměrný úhel odpovídající pozici 0° při nájezdu z referenčního směru. Maximální difference úhlů odpovídajících pozici 0° při nájezdu z referenčního směru v rámci jednoho souboru dat činila $0,04^\circ$.

Textové soubory obsahující vstupní objektové souřadnice pro vyrovnaní, výstupní vyrovnané hodnoty a výsledné hodnoty úhlů před a po redukcí o průměrný úhel odpovídající pozici 0° při nájezdu z referenčního směru pro jednotlivé pozice včetně středních chyb jsou součástí přílohy č. 8.

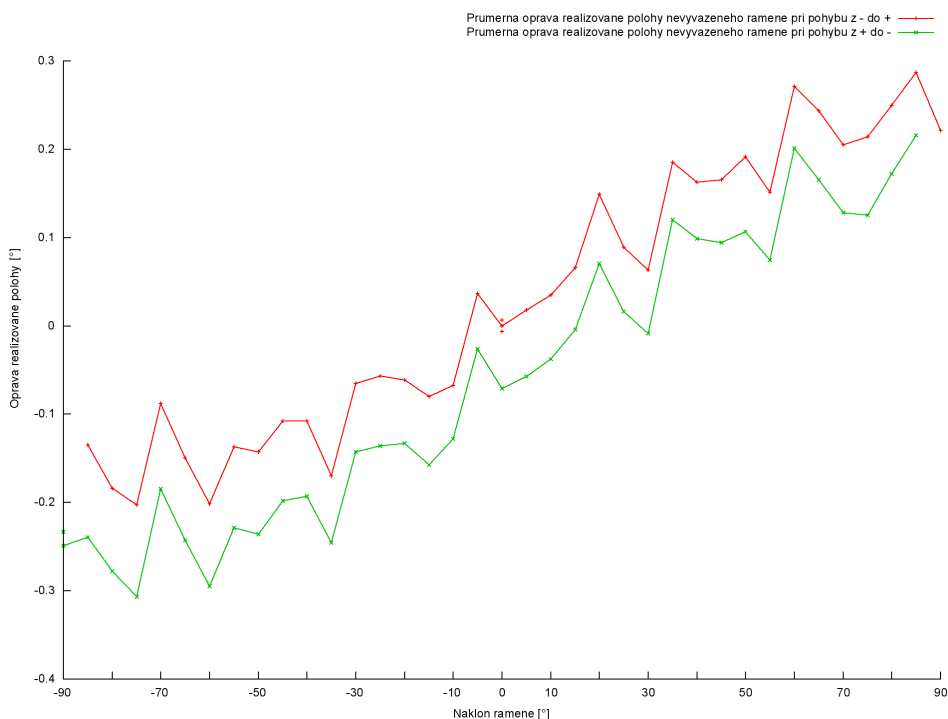
Následné vyhodnocení dat proběhlo především grafickým způsobem. V první fázi byly vypočteny a v softwaru Gnuplot graficky interpretovány opravy jednotlivých realizovaných pozic vůči plánované nominální hodnotě. Na obr. 34 je uveden graf závislosti průměrných oprav pro jednotlivé hodnoty náklonu vyváženého polohovacího ramene. Průměrné opravy jsou vypočteny na základě dvojího určení hodnot náklonů vyváženého ramene získaných při třetím testovacím měření. Z grafu je patrné, že opravy se bez zřejmé závislosti na hodnotě náklonu ramene nachází v pásu kolem nuly v intervalu $\pm 0,12^\circ$. Pro představu uvádíme, že oprava $0,1^\circ$ představuje změnu v poloze referenčního bodu antény (ARP) o $0,24 \text{ mm}$. Taktéž trendy vývoju křivek při pohybu ze záporného směru do kladného a naopak

jsou si velice podobné, což svědčí o systematické chybě - rozdílu mezi nájezdem z kladného a záporného směru.



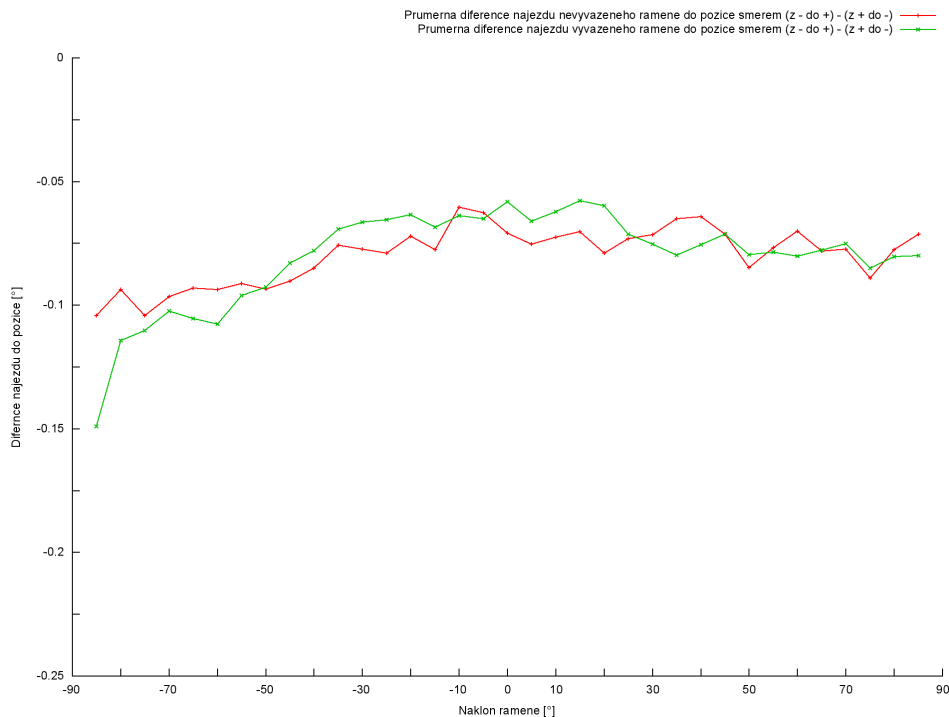
Obr. 34: Graf závislosti průměrné opravy polohy vyváženého ramene na jeho náklonu

Do dalšího grafu byla vynesena tatáž závislost tentokráte pro pohyb nevyváženého polohovacího ramene. Zde již vidíme prokazatelnou závislost velikosti opravy na náklonu ramene. O této závislosti bude podrobněji pojednáno v kapitole 6.2.



Obr. 35: Graf závislosti průměrné opravy polohy nevyváženého ramene na jeho náklonu

Taktéž byly pro jednotlivé pozice do grafu vyneseny difference polohy při nájezdu ze záporného a kladného směru pohybu při vyváženém i nevyváženém polohovacím rameni, viz obr. 36. Průměrná hodnota difference nájezdu do pozice ze záporného a kladného směru pohybu je pro vyvážený i nevyvážený stav ramene rovna $-0,08^\circ$.



Obr. 36: Graf závislosti průměrné difference nájezdů ze záporného a kladného směru na náklonu ramene

Jelikož z grafu není patrná zjevná závislost velikosti diferencí na náklonu ramene, můžeme průměrné opravy vystavení jednotlivých pozic vyváženého ramene znázorněné na obr. 34 zavést do observačního programu, a tím zkorigovat chod polohovacího ramene. Pro každou testovanou pozici byly tedy dle vzorce:

$$v_i = \frac{(\varphi_{NOM_i} - \varphi_{1_i}) + (\varphi_{NOM_i} - \varphi_{2_i})}{2}, \text{ kde} \quad (6.6)$$

φ_{NOM_i} je nominální náklon ramene,

φ_{1_i} (φ_{2_i}) je náklon ramene vypočtený z prvního (druhého) bloku dat,

vypočteny průměrné opravy chodu zařízení pro nájezd do pozice z kladného a záporného směru pohybu. Pro hodnotu -90° resp. $+90^\circ$ byly určeny opravy samozřejmě pouze pro nájezd z kladného resp. záporného směru pohybu. Průměrná hodnota opravy při nájezdu do pozice ze směru - do + činí $0,03^\circ$ a ze směru opačného $-0,05^\circ$.

Jako charakteristiky přesnosti vyhodnocených oprav byly vypočteny dvě hodnoty střední chyby. První hodnota představuje průměrnou střední chybu opravy vypočtenou jako kvadratický průměr vyhodnocených středních chyb jednotlivých pozic ze vzorce:



$$m_{v_1 prum} = \sqrt{\frac{\sum m_{\varphi_i}^2}{n}}, \text{ kde} \quad (6.7)$$

m_{φ_i} je střední chyba výsledného náklonu ramene vypočtená z aplikace korelační masky.

Druhou charakteristikou přesnosti je pak střední chyba aritmetického průměru opravy vypočtená z dvojic měření dle vzorce:

$$m_{v_2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n}}, \text{ kde} \quad (6.8)$$

d_i jsou difference mezi opravami z prvního a druhého testovacího měření.

Jelikož tato hodnota komplexně charakterizuje metodu vyhodnocení náklonů ramene (zahrnuje chybu v prvotním nájezdu ramene do svislé pozice, kvalitu použitého fotoaparátu, přesnost určení transformačních parametrů, přesnost vyrovnání bodů na kružnici, ...) nabývá podstatně vyšší hodnoty než charakteristika předchozí, která je vypočtena pouze z rozptylu dat v jednotlivých vyhodnocených klidových pozicích ramene. Dosažené hodnoty jsou $m_{v_1 prum} = 0,002^\circ$ a $m_{v_2} = 0,02^\circ$.

Výše uvedené typy grafů pro data z jednotlivých měření tvoří přílohu č. 9, hodnoty oprav pro jednotlivé pozice včetně jejich středních chyb sestavené do tabulky pak přílohu č. 10.

Dle informací v (Linux 2012b: 18) lze pro pohyb v každé ose zařízení definovat jeden kompenzační soubor *.comp. Soubor je strukturován do řádků (max. 256), přičemž na každém řádku je uvedena trojice údajů v aktuálně užívaných jednotkách navzájem oddělených mezerou. První údaj je nominální hodnota pozice (kde by se rameno mělo nacházet). Druhý a třetí údaj se odvíjí od nastavení COMP_FILE_TYPE příznaku v *.ini souboru. COMP_FILE_TYPE může nabývat hodnoty 0 či 1. Je-li:

- COMP_FILE_TYPE=0 - druhá a třetí hodnota udává, kde se rameno nachází při pohybu vpřed (z - do +) a zpět (z + do -),
- COMP_FILE_TYPE=1 - druhá a třetí hodnota udává, jaká je difference ramene od nominální pozice při pohybu vpřed (z - do +) a zpět (z + do -).

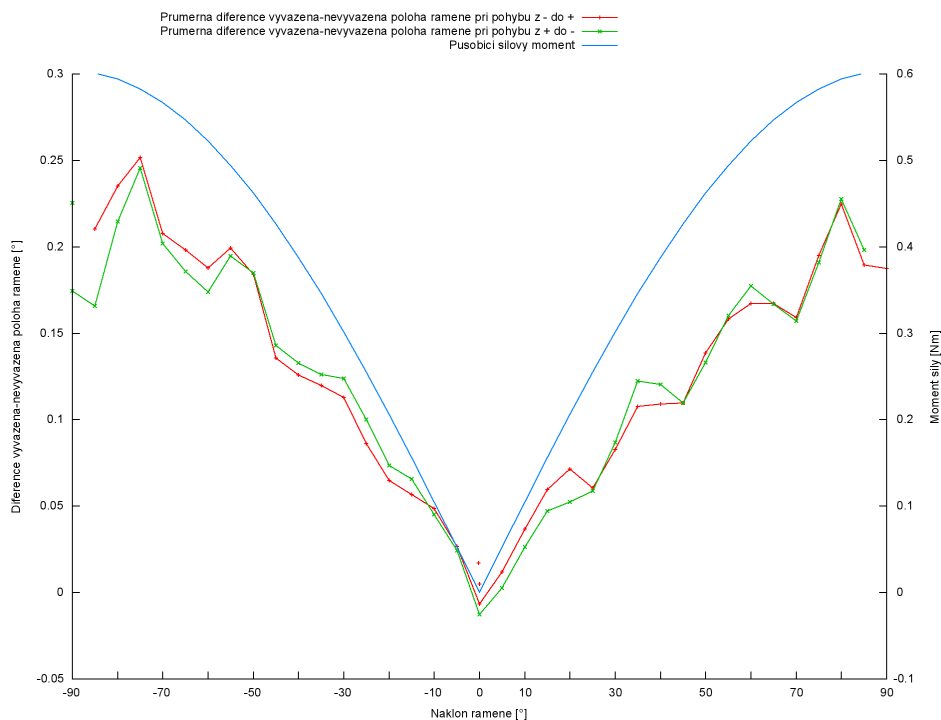
Ukázka struktury souboru je zobrazena na obr. 37, kompenzační soubor pro osu M2 (Y) *M2axis.comp* pro COMP_FILE_TYPE=1 tvoří přílohu č. 11.

```
Example triplet with COMP_FILE_TYPE = 0: 1.00 1.01 0.99  
Example triplet with COMP_FILE_TYPE = 1: 1.00 0.01 -0.01
```

Obr. 37: Ukázka struktury údajů pro kompenzaci chodu zařízení v dané ose (Linux 2012b)

6.2 Plánování pohybu s ohledem na zatížení ramene kalibrovanou anténou

Již v předchozí kapitole je na obr. 35 uveden graf závislosti průměrné opravy pozice nevyváženého ramena na jeho náklonu. Je zřejmé, že absolutní hodnota opravy roste se zvětšující se hodnotou náklonu ramene a lze tedy jednoznačně prokázat závislost velikosti oprav pozic nevyváženého ramene na jeho náklonu. Pro zřejmější ilustraci byl vytvořen graf závislosti průměrné difference mezi pozicí ramene při vyváženém a nevyváženém stavu pro oba směry nájezdu.



Obr. 38: Graf závislosti průměrné difference nájezdu vyváženého a nevyváženého ramene do jednotlivých pozic na náklonu ramene

Velikosti znázorněných diferencí jsou dle předpokladu úměrné velikosti působícího silového momentu, který je vyvolán nevyváženým stavem pohybujícího se ramene. Působící moment síly M lze vypočítat pro jednotlivé pozice ramene dle (Koktavý 2006) ze vztahu:

$$M = r \cdot F, \text{ kde} \tag{6.9}$$

r je polohový vektor působíště síly vzhledem k momentovému bodu O

F je působící síla na hmotný bod.

Pro naše účely lze působící silový moment pro daný náklon ramene vyjádřit vztahem

$$M = r \cdot F_G \cdot \sin\alpha = (m_1 \cdot r_1 + m_2 \cdot r_2) \cdot g \cdot \sin\alpha, \text{ kde} \tag{6.10}$$

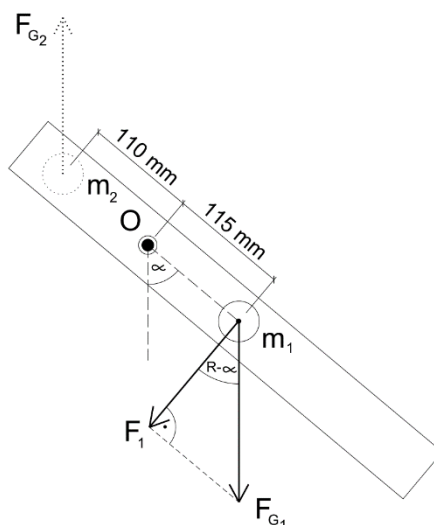
m_1 (m_2) jsou hmotnosti hmotných bodů (závaží připevněných na rameni)

r_1 (r_2) jsou polohové vektory působíště sil vzhledem k momentovému bodu O

g je tíhové zrychlení

α je úhel, který svírají vektory r a F .

Situace je pro ilustraci znázorněná na následujícím obrázku:



Obr. 39: Rozložení působících sil při pohybu nevyváženého ramene

Za vyvážený stav ramene je považován stav, kdy je absence kalibrované antény kompenzována dvojicí závaží (o hmotnosti m_2) upevněných lepicí páskou pod horním překladem ve vzdálenosti r_2 od bodu O. Při nevyváženém stavu byla tato závaží demontována, což vyvolalo vznik síly F_2 , a pomocí šroubů připevněna ve vzdálenosti r_1 od bodu O, viz obr. 39. Toto umístění závaží má za následek vznik síly F_1 .

Pro hodnoty $r_1 = 115 \text{ mm}$, $r_2 = 110 \text{ mm}$, $m_1 = 283 \text{ g}$ a $m_2 = 263 \text{ g}$ byly dle vzorce (6.10) vypočteny hodnoty silového momentu pro testované náklony ramene a ty byly pro ilustraci zobrazeny do grafu, viz obr. 38.

Z této závislosti tedy vyplývá, že nejhodnější bude pro každou kalibrovanou anténu polohovací rameno individuálně vyvážit pomocí vhodně navrženého systému plynule posunovatelného protizávaží. Pro případ nutnosti kalibrace s nevyváženým ramenem by bylo potřeba pro stanovení oprav provést další testování s odlišně nevyváženým ramenem. Na základě testování bychom stanovili přesný charakter vztahu mezi mírou nevyvážení ramene a hodnotami z toho důvodu generovaných úhlových odchylek v náklonu ramene.

6.3 Plánování pohybu s ohledem na čas potřebný ke změně pozice o daný úhel

Jak již bylo řečeno v kapitole 4.1, k řízení pohybu zařízení s ohledem na čas UTC slouží pro tyto účely vytvořený program, který je spuštěn pomocí uživatelsky definovaného kódu M101 ihned po ukončení pohybu ramene v požadované pozici. Úkolem tohoto vnořeného programu je okamžitě po jeho spuštění odečíst aktuální UTC čas, zapsat jeho hodnotu do protokolu a na základě její znalosti vyčkat do okamžiku následujícího GNSS měření, které probíhá vždy v celou sekundu UTC (GPST) dle daného intervalu měření (1 s, 2 s, 5 s, ...). Pro provedení GNSS měření vnořený program okamžik

(např. 0,2 s) vyčká, následně je ukončen a řízení se opět ujímá původní observační program. Ještě před jeho ukončením je však proveden odečet UTC času začátku pohybu ramene do následující pozice a jeho zápis do protokolu.

Při plánování pohybu zařízení je vždy třeba volit interval mezi GNSS měřeními vzhledem k času, který je potřebný k přesunu ramene s anténou o požadovanou úhlovou hodnotu. Výpočet tohoto času vychází nejen z rychlosti F (feed rate) [$^{\circ}\text{min}^{-1}$] zadané v observačním programu jako parametr G1 kódu, ale taktéž z hodnoty zrychlení MAX_ACCELERATION [$^{\circ}\text{s}^{-2}$] zapsané v *.ini souboru. Aktuálně používaná hodnota zrychlení je systémem řízení pohybu dle (Linux 2012a: 17-18) vždy nastavována na:

$$A = \frac{\text{MAX_ACCELERATION}}{2} \quad (6.11)$$

K dosažení zadané rychlosti F je nutné, aby pohyb byl větší než vzdálenost potřebná ke zrychlení z nuly na požadovanou hodnotu a opět zpomalení na rychlost nulovou. Takovouto vzdálenost nazýváme vzdáleností kritickou a vypočteme ji dle vzorce:

$$d_{crit} = d_A + d_D, \quad (6.12)$$

kde d_A (d_D) je dráha potřebná pro zrychlení (zpomalení) na požadovanou (nulovou) rychlost. Pro tyto vzdálenosti platí:

$$d_A = d_D = F * t_{A(D)}/2, \quad \text{kde} \quad (6.13)$$

$$t_{A(D)} = \frac{F}{A} \quad (6.14)$$

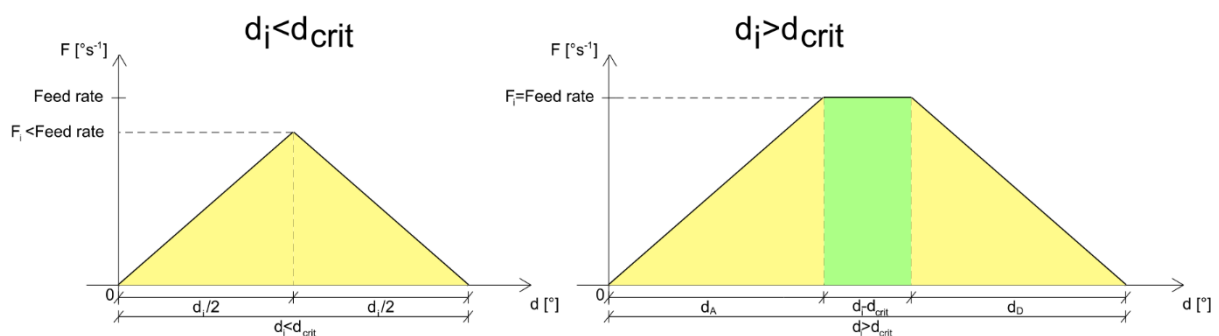
Dosazením do (6.11) získáme výsledný vztah pro výpočet kritické vzdálenosti:

$$d_{crit} = F * t_{A(D)} = \frac{F^2}{A} [^{\circ}]. \quad (6.15)$$

Je-li plánovaná změna polohy d menší než tato kritická hodnota, znamená to, že požadované rychlosti nebude dosaženo a čas potřebný ke změně polohy bude vypočten ze vztahu:

$$t = 2 \sqrt{\frac{2(\frac{d}{2})}{A}} = 2 \sqrt{\frac{d}{A}} [s]. \quad (6.16)$$

Tato situace je zobrazena v levé části následujícího obrázku:



Obr. 40: Schéma pohybu zařízení

Je-li však změna polohy d větší než kritická vzdálenost, viz pravá část obr. 40, požadované rychlosti bude dosaženo a rameno se bude pro dosažení požadované rychlosti pohybovat rovnoměrně



zrychleným pohybem, po jejím dosažení rovnoměrným pohybem a při zpomalování pohybem rovnoměrně zpomaleným. Výsledný čas je pak roven:

$$t = 2t_{A(D)} + \frac{(d-d_{crit})}{F} [s]. \quad (6.17)$$

Pro rychlost $F = 480^{\circ}min^{-1}$ prozatím užívanou v observačních programech a zrychlení $A = 10^{\circ}s^{-2}$ (vypočtené z aktuální hodnoty maximálního zrychlení zapsaného v *.ini souboru), $A = 5^{\circ}s^{-2}$ a $A = 20^{\circ}s^{-2}$ byly pro uvedené hodnoty změny polohy $\Delta\varphi$ vypočteny následující časy [s]. Modře zvýrazněné buňky značí případy, kdy bylo dosaženo požadované rychlosti Feed rade.

Zrychlení A [$^{\circ}/s^2$]	5	10	20
Změna polohy $\Delta\varphi$ [$^{\circ}$]			
1	0,89	0,63	0,45
2	1,26	0,89	0,63
5	2,00	1,41	1,03
10	2,83	2,05	1,65

Tab. 2: Hodnoty časů potřebných pro přesun ramene o hodnotu $\Delta\varphi$

Např. při nastavení intervalu GNSS měření 1s zařízení s ohledem na aktuální zrychlení a zpomalení pohybů umožňuje rotace s krokem 1° . Přibližně symetricky je kolem okamžiku záznamu GNSS měření umístěno čekací okno délky 0,37 s. Zbýlých 0,63 s připadá na pohyb do následující pozice.

6.4 Plánování pohybu s ohledem na rozložení kalibračního měření

Pro určení hodnot PCO a PCV je třeba dostatečné množství měřených dat, která jsou homogenně rozložená po hemisféře antény. Jinými slovy řečeno je nutné přijímat data vůči anténě rovnoměrně ze všech směrů - z azimutu (0° , 360°) a zenitového úhlu (0° , 90°). Tento požadavek bývá zajišťován pozorovacím programem pohybu antény, který se sestavuje automatizovaně podle aktuální konstelace družic a je individuální pro každé kalibrační měření.

V prvopočátku tvorby logiky pro automatické vytváření pozorovacích programů je důležité si uvědomit, jak se mění trajektorie pohybu družic promítnutá na hemisféru antény v závislosti na natočení a sklonu kalibrované antény.

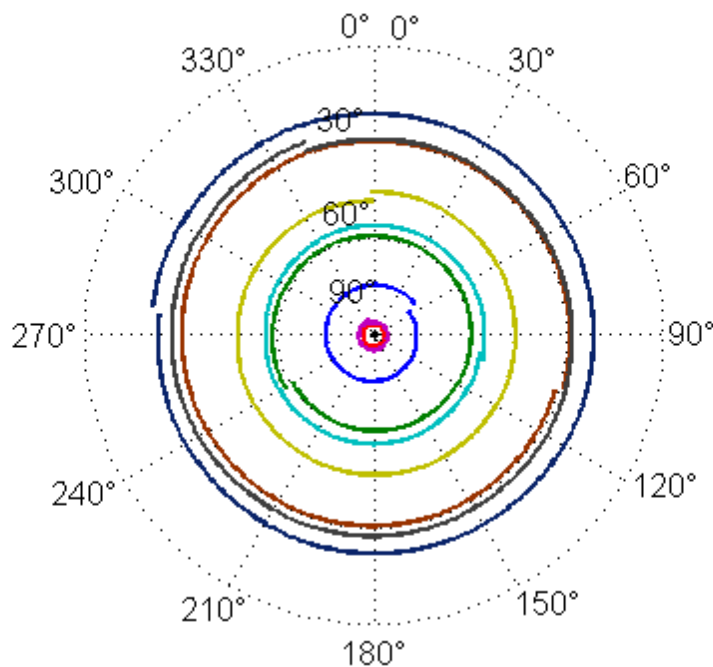
Pro ilustraci této závislosti byla využita aplikace EASY11 (Borre 2009a), která je součástí souboru skriptů pro SW Matlab GPS EASY Suite II (Borre 2009b). Tento soubor volně šiřitelných skriptů představuje univerzální nástroje pro práci s GNSS daty. Konkrétně část EASY11 slouží mimo jiné k vykreslení polárního grafu drah satelitů, jejichž signály lze přijímat ze zadané pozice, na základě

vstupních navigačních dat ve formátu RINEX (Receiver INdependent EXchange format). Pro naše účely (zobrazení drah satelitů v narotovaném anténním referenčním rámci) bylo třeba některé ze skriptů *EASY11* modifikovat např. doplněním vstupu pozic antény, upravením dimenzí výpočtů, doplněním rotačních matic či aplikací dvojí (staniční a anténní) elevační masky, viz příloha č. 12.

Zde uvádíme šest grafů - pět z nich ilustruje pozice satelitů v anténním referenčním rámci pro základní pozice a pohyby kalibrované antény a šestý je ukázkou pozic satelitů pro složený pohyb antény. Pozice družic jsou vykresleny pro polohu stanoviska $\varphi = 49^\circ 12' 22''$ a $\lambda = 16^\circ 35' 34''$, pozice družic nižší než nastavený staniční (15°) a anténní (-5°) elevační úhel nejsou v grafech vykresleny.

1. Polohovací rameno s anténou je nastaveno do výchozí pozice $M1(X) = -180^\circ$ a $M2(Y) = 0^\circ$, následně je ramenem otáčeno kolem osy $M1$ v intervalu $\langle -180^\circ; +180^\circ \rangle$ s krokem 1° po 1 s.

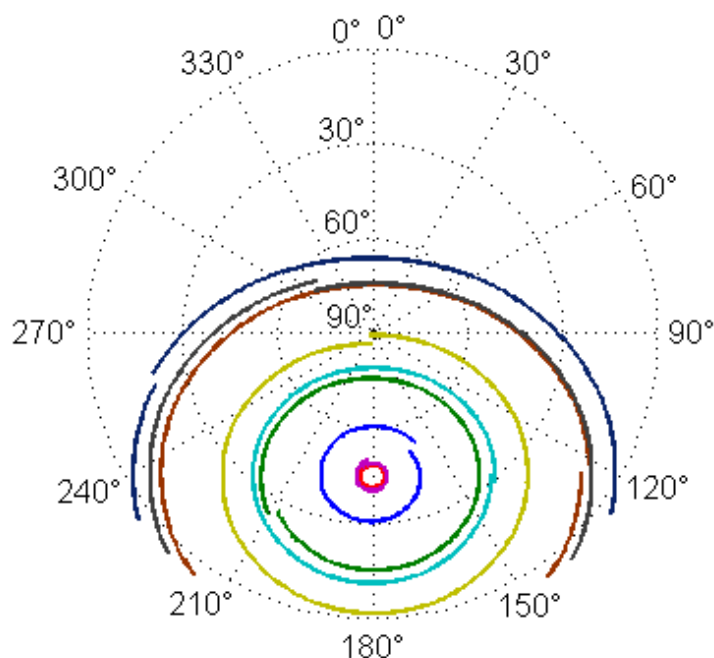
Realizovaný pohyb antény: $M1 \in \langle -180^\circ; 180^\circ \rangle$, $M2 = \text{konst.} = 0^\circ$



Obr. 41: Pozice satelitů v anténním referenčním rámci - ukázka č. 1

2. Polohovací rameno s anténou je nastaveno do výchozí pozice $M1(X) = -180^\circ$ a $M2(Y) = 45^\circ$, následně je ramenem otáčeno kolem osy $M1$ v intervalu $\langle -180^\circ; +180^\circ \rangle$ s krokem 1° po 1 s.

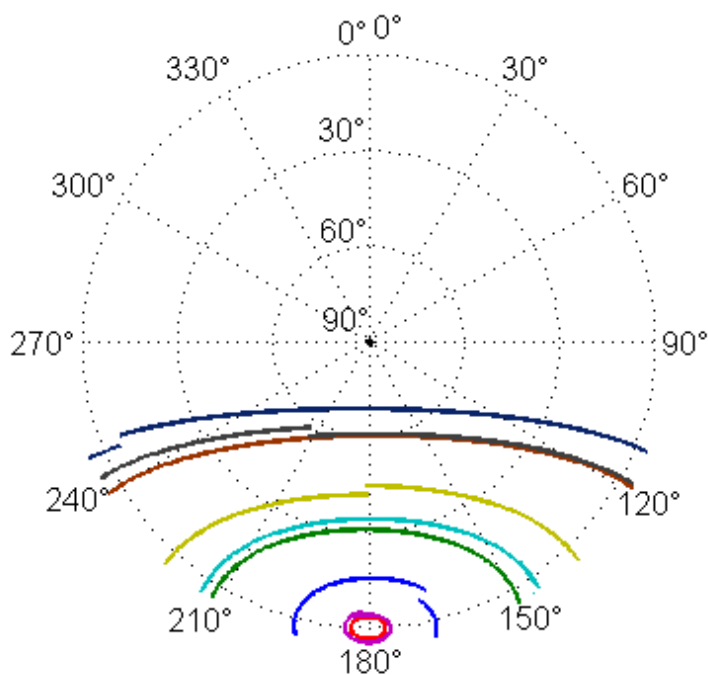
Realizovaný pohyb antény: $M1 \in \langle -180^\circ; 180^\circ \rangle$, $M2 = \text{konst.} = 45^\circ$



Obr. 42: Pozice satelitů v anténním referenčním rámci - ukázka č. 2

3. Polohovací rameno s anténou je nastaveno do výchozí pozice $M1(X) = -180^\circ$ a $M2(Y) = 90^\circ$, následně je ramenem otáčeno kolem osy $M1$ v intervalu $\langle -180^\circ; +180^\circ \rangle$ s krokem 1° po 1 s.

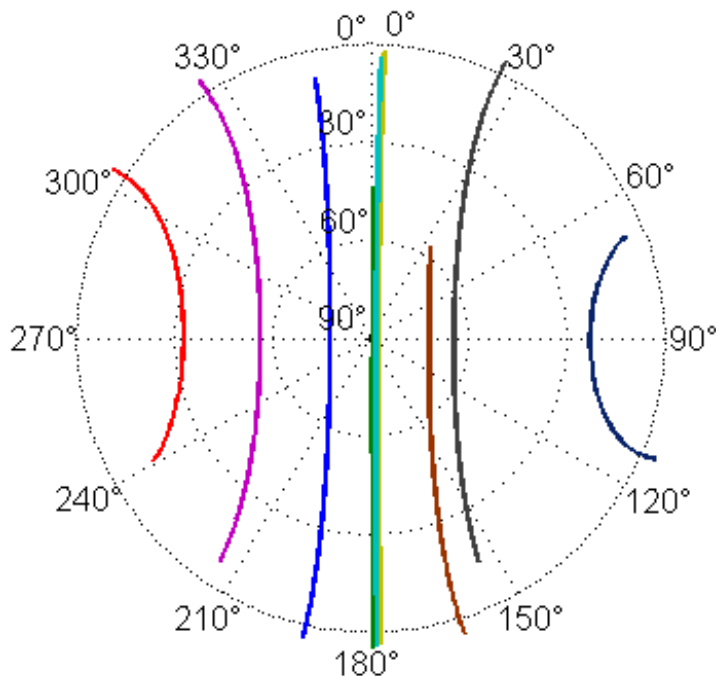
Realizovaný pohyb antény: $M1 \in \langle -180^\circ; 180^\circ \rangle$, $M2 = \text{konst.} = 90^\circ$



Obr. 43: Pozice satelitů v anténním referenčním rámci - ukázka č. 3

4. Polohovací rameno s anténou je nastaveno do výchozí pozice $M1(X) = 0^\circ$ a $M2(Y) = 90^\circ$, následně je ramenem otáčeno kolem osy $M2$ v intervalu $\langle +90^\circ; -90^\circ \rangle$ s krokem 1° po 1 s.

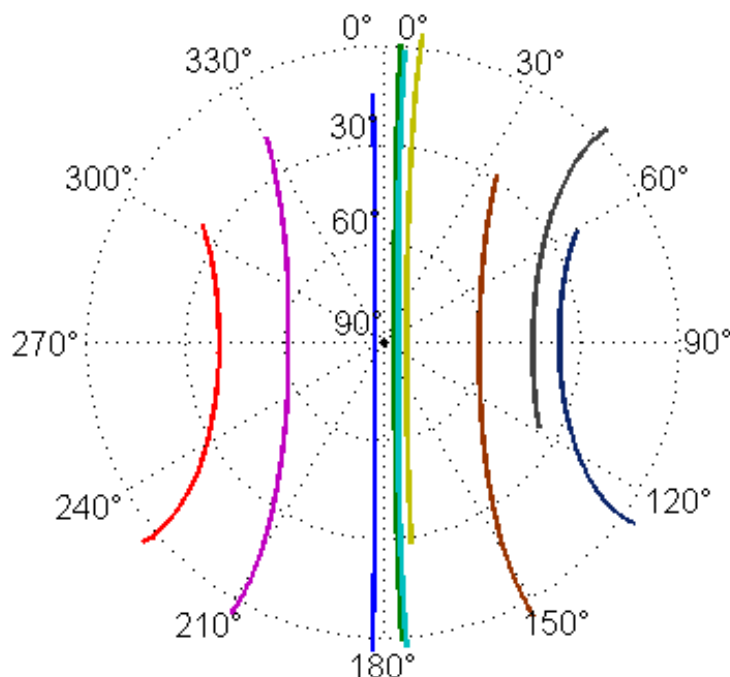
Realizovaný pohyb anteny: $M1 = \text{konst.} = 0^\circ$, $M2 \in \langle 90^\circ; -90^\circ \rangle$



Obr. 44: Pozice satelitů v anténním referenčním rámci - ukázka č. 4

5. Polohovací rameno s anténou je nastaveno do výchozí pozice $M1(X) = 45^\circ$ a $M2(Y) = 90^\circ$, následně je ramenem otáčeno kolem osy $M2$ v intervalu $\langle +90^\circ; -90^\circ \rangle$ s krokem 1° po 1 s.

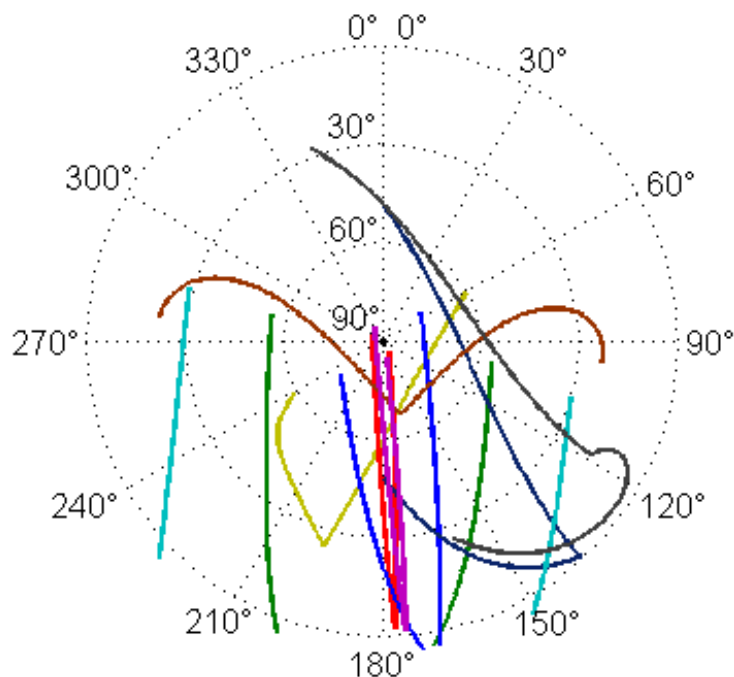
Realizovaný pohyb anteny: $M1 = \text{konst.} = 45^\circ$, $M2 \in \langle 90^\circ; -90^\circ \rangle$



Obr. 45: Pozice satelitů v anténním referenčním rámci - ukázka č. 5

6. Polohovací rameno s anténou je nastaveno do výchozí pozice $M1(X) = 0^\circ$ a $M2(Y) = 0^\circ$, následně je ramenem otáčeno kolem osy $M1$ v intervalu $\langle 0^\circ; +180^\circ \rangle$ a kolem osy $M2$ v intervalu $\langle 0^\circ; 90^\circ \rangle \cup \langle 90^\circ; 0^\circ \rangle$ s krokem 1° po 1 s.

Realizovaný pohyb anteny: $M1 \in \langle 0^\circ; 180^\circ \rangle$, $M2 \in \langle 0^\circ; 90^\circ \rangle \cup \langle 90^\circ; 0^\circ \rangle$



Obr. 46: Pozice satelitů v anténním referenčním rámci - ukázka č. 6

Finální algoritmus pro automatizovanou tvorbu pozorovacích programů by měl tedy dle aktuální konfigurace satelitů, rozložení již realizovaného měření na hemisféře antény a uvedených závislostí pozic satelitů na poloze antény volit nejvhodnější pozice a pohyby kalibrované antény pro získání co nejideálnějšího pokrytí daty.



7 Závěr

Cílem této práce bylo čtenáře seznámit s principem a metodami kalibrace GNSS antén, představit robotické zařízení pro absolutní kalibraci GNSS antén vyvíjené na Ústavu geodézie FAST VUT v Brně a především provést plánování a analýzu jeho pohybu.

První část analýzy pohybu byla zaměřena na ověření správného navázání pohybu zařízení na čas UTC. Bylo potvrzeno, že polohovací rameno zařízení se nachází v okamžiku plánovaného GNSS měření ve statické pozici a že pohyb ramene není zpoždován průchodem signálu z počítače přes další součásti řídicí jednotky.

V rámci plánování pohybu byly nejprve analyzovány pohybové vlastnosti zařízení. Porovnáním skutečných úhlů natočení polohovacího ramene zařízení s nominálními hodnotami úhlů natočení ramene byl získán soubor korekcí, které lze implementovat do observačního programu, a tak využít k opravě chodu zařízení v ose M2 (Y).

Na základě určených skutečných úhlů náklonu vyváženého a nevyváženého polohovacího ramene bylo taktéž konstatováno, že při kalibraci bude třeba pro každou anténu polohovací rameno individuálně vyvážit pomocí vhodně navrženého systému plynule posunovatelného protizávaží.

Neméně důležité je při plánování pohybu zařízení vhodně zvolit interval měření GNSS vzhledem k času, který je potřebný k přesunu ramene s kalibrovanou anténou o požadovanou úhlovou hodnotu. Proto je v práci vysvětleno, jak je pohyb ramene s ohledem na čas UTC řízen a jak lze tyto časy závislé na zvolených hodnotách rychlosti a zrychlení pohybu zařízení vypočítat.

Poslední část práce je věnována plánování pohybu s ohledem na rovnoměrné rozložení kalibračního měření. Jsou zde uvedena především grafická znázornění závislosti pozice satelitů vyjádřené v anténním referenčním rámci v závislosti na natočení a sklonu kalibrované antény.



Literatura

- ALEXANRED MEIER ELEKTRONIK (2009) *Operation Manul - Video Time-Inserter TIM-10*, Revision 4, February 2nd 2009.
- BILICH, A., MADER, G. L. (2010) *GNSS Absolute Antenna Calibration at the National Geodetic Survey*. Proceedings of the International Technical Meeting, ION GNSS 2010, Portland, Oregon, USA, pp. 1369-1377. Dostupné z http://www.ngs.noaa.gov/CORS/Articles/Bilich-and-Mader_ION2010.pdf
- BORRE, K. (2009a) *GPS EASY11* [software]. Dostupné z: <http://kom.aau.dk/~borre/easy2/easy11/>
- BORRE, K. (2009b) *GPS EASY Suite II: A Matlab Companion*. InsideGNSS, Vol. 4, No. 2., pp. 48-52. Dostupné z: <http://www.insidegnss.com/auto/marapr09-borre.pdf>
- BRÁTOVÁ, K. (2014) *Geometrické parametry zařízení pro absolutní kalibraci GNSS antén*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí diplomové práce Ing. Radim Kratochvíl, Ph.D. V době vydání diplomová práce čeká na obhájení.
- FIXEL, J., MACHOTKA, R. (2007a) *Geodetická astronomie a kosmická geodézie I*. Modul 01 - Sférická astronomie, studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, Brno, 2007
- FIXEL, J., MACHOTKA, R. (2007b) *Geodetická astronomie a kosmická geodézie II*, Modul 01 - Kosmická geodézie, studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, Brno, 2007
- HANÁK, P. (2012) *Data z dějin zeměměřictví*. Praha: Klaudivian Praha, s. r. o., 2012, 2. vydání. ISBN 978-80-902524-4-8
- HARTLEY, R., ZISSERMAN, A. (2003) *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003, second edition. ISBN 0521 54051 8
- KALINA, M., KRATOCHVÍL, R., KURUC, M., VOLAŘÍK, T. (2013) *Polohovací zařízení pro kalibraci GNSS antén*. Juniorstav 2013, Brno
- KOKTAVÝ, B. (2006) *Mechanika hmotného bodu*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 2006, 2. vydání. ISBN 80-7204-474-5.
- KOMAČKA, J. (2011a) *Sledování dynamických jevů geodetickými metodami*. Brno, 2011. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí diplomové práce Ing. Radovan Machotka, Ph.D.
- KOMAČKA, J. (2011b) *camera.exe* [software].
- KOMAČKA, J. (2014) *homography.exe* [software].
- LINUX (2012a) *LinuxCNC User Manual V2.5*, verze 2012-08-25. Dostupné z http://linuxcnc.org/docs/2.5/pdf/LinuxCNC_User_Manual.pdf
- LINUX (2012b) *LinuxCNC Integrator Manual V2.5*, verze 2012-10-15. Dostupné z http://linuxcnc.org/docs/2.5/pdf/LinuxCNC_Integrator_Manual.pdf



- MACHOTKA, R., VONDRÁK, J. (2009) *Využití motorizované totální stanice pro automatizaci astronomických měření*. Geodetický a kartografický obzor, roč. 2009, č. 4, s. 87-92. ISSN 0016-7096, Vesmír, Praha. Dostupné z: <http://archivnimapy.cuzk.cz/zemvest/cisla/Rok200904.pdf>
- MADER, G. L. (1999) *GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey*. GPS Solutions, Vol. 3, No. 1, pp. 50-58, doi: 10.1007/PL00012780. Dostupné z <ftp://cors.ngs.noaa.gov/pub/abilich/calibPapers/Mader1999.pdf>
- MENGE, F., SEEBER, G., VÖLKSEN, C., WÜBBENA, G., SCHMITZ, M. (1998) *Results of Absolute Field Calibration of GPS Antenna PCV*. Proceedings of the International Technical Meeting, ION GPS 1998, Nashville, Tennessee, USA, pp. 31-38. Dostupné z: <http://geopp.de/download/ion98.pdf>
- NOAA [online]. 2014 [cit. 2014-01-20]. Dostupné z: <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/FAQ.jsp>
- NOHEJL, M. (2006) *Relativní kalibrace GPS antén*. Brno, 2006. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí diplomové práce Prof. Ing. Otakar Švábenský, CSc.
- PRAVDA, M. (2008) *Protokoly k synchronizaci času pro paketovou síť*. *Access.feld.cvut.cz* [online]. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2008. [cit. 2014-01-22]. Dostupné z <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2008100001>
- ROTHACHER, M. (2001) *Comparison of Absolute and Relative Antenna Phase Center Variations*. GPS Solutions, Vol. 4, No. 4, pp. 55-60. Dostupné z <ftp://www.ngs.noaa.gov/pub/abilich/calibPapers/Rothacher2001.pdf>
- SCHMITZ, M., WÜBBENA, G., PROPP, M. (2008) *Absolute Robot-Based GNSS Antenna Calibration - Features and Findings*. Extended abstract submitted to the International Symposium on GNSS, Space-based and Ground-based Augmentation Systems and Applications, November 11-14, 2008, Berlin, Germany. Dostupné z: http://geopp.de/media/docs/pdf/gpp_gnss08_antenna_fxa.pdf
- VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ (2013) *Polohovací zařízení pro kalibraci antén globálních navigačních satelitních systémů*. IPC: G12S 19/23, H01Q 3/00, H01Q 3/08. Česká republika. Užitený vzor, CZ 25325 U1. 2013-06-05. Dostupné také z: <http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0025/uv025325.pdf>
- WIKI UBUNTU [online]. 2012 [cit. 2014-01-22]. Dostupné z: <http://wiki.ubuntu.cz/ntp>
- WÜBBENA, G., MENGE, F., SCHMITZ, M., SEEBER, G., VÖLKSEN, C. (1996) *A New Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations*. Proceedings of the International Technical Meeting, ION GPS 1996, Kansas City, Missouri, USA, pp. 1205-1214. Dostupné z: <http://geopp.de/download/ion96.pdf>
- WÜBBENA, G., SCHMITZ, M., MENGE, F., BÖDER, V., SEEBER, G. (2000) *Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real-Time*. Proceedings of the International Technical Meeting, ION GPS 2000, Salt Lake City, Utah, USA, pp. 2512-2522. Dostupné z: http://geopp.de/download/Ion2000_presented_at.pdf



- WÜBBENA, G., SCHMITZ, M., BOETTCHER, G., SCHUMANN, C. (2006a) *Absolute GNSS Antenna Calibration with a Robot: Repeatability of Phase Variations, Calibration of GLONASS and Determination of Carrier-to-Noise Pattern*. Submitted to Proceedings of the IGS Workshop 2006 „Perspectives and Visions for 2010 and beyond“, May 8-12, ESOC, Darmstadt, Germany. Dostupné z: http://geopp.de/media/docs/pdf/gppigs06_pabs_g.pdf
- WÜBBENA, G., SCHMITZ, M., BOETTCHER, G., SCHUMANN, C. (2006b) *Near-field Effects on GNSS Sites: Analysis using Absolute Robot Calibrations and Procedures to Determine Corrections*. Submitted to Proceedings of the IGS Workshop 2006 „Perspectives and Visions for 2010 and beyond“, May 8-12, ESOC, Darmstadt, Germany. Dostupné z: http://geopp.de/media/docs/pdf/gppigs06_pnf_g.pdf
- ZEIMETZ, P., KUHLMANN, H. (2008) *On the Accuracy of Absolute GNSS Antenna Calibration and the Conception of a New Anechoic Chamber*. Proceedings of FIG Working Week 2008, Stockholm, Sweden. Dostupné z: http://www.fig.net/pub/fig2008/papers/ts05g/ts05g_01_zeimetz_kuhlmann_2901.pdf
- ZEIMETZ, P., KUHLMANN, H. (2010) *Validation of the Laboratory Calibration of Geodetic Antennas based on GPS measurements*. Proceedings of FIG Congress 2010, Sydney, Australia. Dostupné z: http://www.fig.net/pub/fig2010/papers/ts05c%5Cts05c_zeimetz_kuhlmann_4308.pdf

Seznam zkratk

APC	Fázové centrum antény
ARP	Referenční bod antény
CNO	Poměr signálu k šumu
ČUZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
DM-T	(Anténa) typu Dorne Margolin
FPS	Počet snímků za vteřinu (jednotka snímkové frekvence)
GDV	Variace skupinového zpoždění
GMT	Střední světový čas
GNSS	Globální družicové navigační systémy
GNU GPL	Všeobecná veřejná licence GNU
GPS	Globální polohový systém
GPST	Čas systému GPS
IERS	Mezinárodní organizace pro rotaci Země
IGS	Mezinárodní GNSS služba
LTS	Dlouhodobě podporovaná (licence)
MNČ	Metoda nejmenších čtverců
MP	Vícecestné šíření signálu



NTP	Síťový protokol času
PCO	Ofset fázového centra
PCV	Variace fázového centra
RANSAC	Konsenzus náhodného výběru
SW	Počítačový program
TAI	Mezinárodní atomový čas
UTC	Koordinovaný světový čas
VTI	Vkládač času
WGS-84	Světový geodetický systém 1984

Seznam obrázků

Obr. 1: Střední fázové centrum a variace GNSS antény (na základě Wübbena, Schmitz et al. 2000) ..	12
Obr. 2: První fáze vývoje polohovacího zařízení (Wübbena, Menge et al. 1996)	15
Obr. 3: Druhá fáze vývoje polohovacího zařízení (Wübbena, Schmitz et al. 2000)	15
Obr. 4: Pokrytí GNSS antény signály v klidu a při pohybu (Wübbena, Schmitz et al. 2000)	16
Obr. 5: Střední chyby PCV, anténa TRM22020.00+GP (Wübbena, Schmitz et al. 2000)	17
Obr. 6: Rozdíl nezávisle určených PCV pro frekvenci L1, anténa TRM22020.00+GP (Wübbena, Schmitz et al. 2000)	17
Obr. 7: Kalibrační základna v NGS (Bilich a Mader 2010).....	19
Obr. 8: Polohovací zařízení v NGS (Bilich a Mader 2010).....	19
Obr. 9: Schéma kalibračního zařízení v anechoické komoře (Zeimetz a Kuhlmann 2008)	20
Obr. 10: Směry simultánně přijímaných signálů (na základě Menge, Seeber et al. 1998).....	23
Obr. 11: Komunikace klient-server (Pravda 2008)	26
Obr. 12: Struktura časových serverů (Wikipedie)	27
Obr. 13: Výpis stavu synchronizace času v Linux Ubuntu	28
Obr. 14: Schéma polohovacího ramene (VUT v Brně 2013)	30
Obr. 15: Fotografie polohovacího ramene.....	30
Obr. 16: Schéma snímání obrazu kamerou	33
Obr. 17: Hardwarové součásti systému MAAS-1 (Komačka 2011a)	33
Obr. 18: Schéma pohybu ramene při snímání	34
Obr. 19: Pořízený snímek - polohovací rameno se značkou	35
Obr. 20: Grafické znázornění pohybu ramene v závislosti na čase.....	36
Obr. 21: Ukázka šumu v původních datech a efektu klouzavých průměrů.....	37



Obr. 22: Středové promítání jako příklad projektivní transformace (Hartley, Zisserman 2003)	41
Obr. 23: Lineární regrese versus RANSAC (Hartley, Zisserman 2003).....	42
Obr. 24: Schéma umístění měřické základny	43
Obr. 25: Schéma pohybu při testovacím měření	44
Obr. 26: Ukázka začátku observačního programu	45
Obr. 27: Fotografie upevněného kalibračního pole	45
Obr. 28: Fotografie z průběhu snímání	45
Obr. 29: Okno camera.exe s kalibračním polem	46
Obr. 30: Ukázka ze souboru transformed.log	47
Obr. 31: Rozmístění fotoaparátu a polohovacího zařízení.....	48
Obr. 32: Fotodokumentace druhého testovacího měření	49
Obr. 33: Ukázka ze skriptu pro výpočet definitivních úhlů	51
Obr. 34: Graf závislosti průměrné opravy pozice vyváženého ramene na jeho náklonu	53
Obr. 35: Graf závislosti průměrné opravy pozice vyváženého ramene na jeho náklonu	53
Obr. 36: Graf závislosti průměrné difference nájezdů ze záporného a kladného směru na náklonu ramene	54
Obr. 37: Ukázka struktury údajů pro kompenzaci chodu zařízení v dané ose (Linux 2012b)	55
Obr. 38: Graf závislosti průměrné difference nájezdu vyváženého a nevyváženého ramene do jednotlivých pozic na náklonu ramene	56
Obr. 39: Rozložení působících sil při pohybu nevyváženého ramene	57
Obr. 40: Schéma pohybu zařízení.....	58
Obr. 41: Pozice satelitů v anténním referenčním rámci - ukázka č. 1.....	60
Obr. 42: Pozice satelitů v anténním referenčním rámci - ukázka č. 2.....	61
Obr. 43: Pozice satelitů v anténním referenčním rámci - ukázka č. 3.....	61
Obr. 44: Pozice satelitů v anténním referenčním rámci - ukázka č. 4.....	62
Obr. 45: Pozice satelitů v anténním referenčním rámci - ukázka č. 5.....	62
Obr. 46: Pozice satelitů v anténním referenčním rámci - ukázka č. 6.....	63

Seznam tabulek

Tab. 1: Vypočtené průměrné difference	38
Tab. 2: Hodnoty časů potřebných pro přesun ramene o hodnotu $\Delta\varphi$	59



Seznam příloh

Příloha č. 1: Seznam souřadnic pozic značky - ověření časové synchronizace pohybu

Příloha č. 2: Protokol o pohybu - ověření časové synchronizace pohybu

Příloha č. 3: Dávkové soubory pro vykreslení grafů v SW Gnuplot

Příloha č. 4: Výpočet časů zahájení a ukončení pohybů zařízení

Příloha č. 5: Skript pro vyrovnání bodů na kružnici

Příloha č. 6: Skript pro výpočet charakteristik přesnosti vyrovnání

Příloha č. 7: Skript pro výpočet výsledných úhlů náklonu ramene (korelační maska)

Příloha č. 8: Objektové souřadnice pro vyrovnání, výstupní vyrovnané hodnoty a výsledné hodnoty úhlů

Příloha č. 9: Grafická interpretace výsledných dat

Příloha č. 10: Tabulka výsledných korekcí chodu zařízení

Příloha č. 11: Kompenzační soubor pro pohyb v ose M2 (Y)

Příloha č. 12: Modifikovaný soubor skriptů EASY11