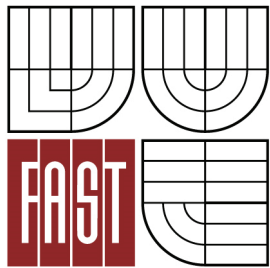




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV GEODÉZIE

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF GEODESY

# GEOMETRICKÉ PARAMETRY ZAŘÍZENÍ PRO ABSOLUTNÍ KALIBRACI GNSS ANTÉN

GEOMETRICAL PARAMETERS OF DEVICE FOR ABSOLUTE GNSS ANTENNA CALIBRATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. KATEŘINA BRÁTOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. RADIM KRATOCHVÍL, Ph.D.

BRNO 2014



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Diplomant</b>	Bc. Kateřina Brátová
<b>Název</b>	Geometrické parametry zařízení pro absolutní kalibraci GNSS antén
<b>Vedoucí diplomové práce</b>	Ing. Radim Kratochvíl, Ph.D.
<b>Datum zadání diplomové práce</b>	30. 11. 2013
<b>Datum odevzdání diplomové práce</b>	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**

1. Seznamte se s problematikou absolutních kalibrací GNSS antén a s funkcí zařízení vyvíjeného pro tento účel na Ústavu geodézie.
2. Spolupracujte na vytyčení při sestavení konstrukčních spoučastí přístroje.
3. Stanovte geometrické parametry přístroje, které je potřeba určit, navrhnete vhodné metody jejich měření a proveďte zaměření.
4. Vytvořte model pohybu zařízení a spolupracujte na jeho implementaci do výpočetního zpracování kalibračního měření.

## **Předepsané přílohy**

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

## Abstrakt

Předmětem práce je popis zařízení vyvíjeného pro absolutní kalibraci GNSS antén na VUT v Brně, Fakultě stavební, Ústavu geodézie. Pomocí kalibrace jsou zjišťovány parametry GNSS antény, o které je opraveno měření a je tak odstraněna chyba fázového centra antény. Zařízení se skládá z polohovacího ramene a řídicí jednotky. Polohovací rameno umožňuje kalibrovanou GNSS anténu nastavit do požadovaného azimutu a elevačního úhlu. Vlastní práce uvádí do problematiky absolutních kalibrací, dále se zabývá popisem polohovacího ramene a závěrečných kontrol při sestavování. Definuje geometrické parametry polohovacího ramene, popisuje jejich určení a nezávislé ověření alternativní metodou. Na závěr popisuje model pohybu anténního referenčního bodu.

## Abstract

The aim of this work is description of a device developed at Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Institute of Geodesy for the purpose of absolute calibration of geodetic GNSS antennas. Thanks to calibration it is possible to remove systematic error of antenna's phase centre. The device consists of moveable arm and processing unit. The moveable arm is able to set up calibrated antenna to required azimuth and elevation angle. This work introduces the issue of absolute calibration, describes the moveable arm and the process of its assembling. Further, it defines geometrical parameters of moveable arm, describes their determination and their independent verification by geodetic method. Finally, the model of movement of antenna's reference point is described.

## Klíčová slova

GNSS, absolutní kalibrace, polohovací rameno, geometrické parametry, model pohybu

## Key words

GNSS, absolute calibration, moveable arm, geometrical parameters, model of movement





### **Bibliografická citace**

BRÁTOVÁ, K. *Geometrické parametry zařízení pro absolutní kalibraci GNSS antén*. Brno, 2014. 46 str. 26 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce Ing. Radim Kratochvíl, Ph.D.



**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně, dne 30. května 2014

.....

Bc. Kateřina Brátová



### **Poděkování:**

Děkuji svému vedoucímu, Ing. Radimovi Kratochvílovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat Ivu Grebíkovi za pomoc při sestavování přístroje. V neposlední řadě mé díky patří spolužačkám Bc. Tereze Hynčicové za spolupráci při měření a Bc. Veronice Sládkové za materiálovou aj. pomoc.

## Obsah

<b>1. ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>2. KALIBRACE GNSS ANTÉN</b> .....	<b>10</b>
2.1 Účel kalibrace .....	10
2.2 Přístupy ke kalibraci.....	11
2.3 Absolutní kalibrace .....	12
2.3.1 Zařízení pro absolutní kalibraci v Geo++ .....	13
2.3.2 Vliv Multipathu .....	14
2.3.3 Přesnost absolutní kalibrace.....	15
2.3.4 Vliv azimutu na PCV a další vlivy .....	16
<b>3. POLOHOVACÍ ZAŘÍZENÍ STANCA</b> .....	<b>19</b>
3.1 Popis konstrukce polohovacího zřízení .....	20
3.2 Definice geometrických parametrů polohovacího ramene .....	21
3.3 Výchozí pozice přístroje.....	23
3.4 Činnosti předcházející finálnímu sestavení přístroje .....	23
<b>4. URČENÍ GEOMETRICKÝCH PARAMETRŮ PŘÍSTROJE</b> .....	<b>25</b>
4.1 Zaměření úhlu $\omega_1$ a převýšení $h$ .....	25
4.2 Testování míry mimoběžnosti $m$ .....	27
4.3 Určení excentricit $e_1$ a $e_2$ .....	28
4.4 Zaměření úhlů $\omega_2$ a $\omega_3$ , převýšení $d$ .....	29
4.5 Zaměření polohy $p$ a převýšení $k$ .....	29
4.6 Zaměření převýšení $j$ .....	29
4.7 Výsledné hodnoty parametrů a jejich grafický zakres .....	30
4.7.1 Přesnost určených parametrů .....	31
<b>5. NEZÁVISLÉ OVĚŘENÍ GEOMETRICKÝCH PARAMETRŮ</b> .....	<b>32</b>
5.1 Zaměření pohybu geodetickou metodou .....	32
5.1.1 Schéma měření .....	32
5.1.2 Problematika signalizace, měřické podmínky .....	33
5.1.3 Měřické přístroje.....	34
5.1.4 Měřené veličiny a postup měření .....	35
5.2 Výpočet polohy pozic hrotu H3.....	35
5.2.1 Určení souřadnic signalizačních kuliček N, E a jejich výšky U.....	36
5.2.2 Určení polohy hrotu H3 v NEU.....	37
5.2.3 Přesnost určení souřadnic.....	37



<b>5.3</b>	<b>Zkoumání pohybu .....</b>	<b>39</b>
<b>5.3.1</b>	<b>Vliv nájezdu .....</b>	<b>39</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Ověření některých geometrických parametrů.....</b>	<b>40</b>
<b>6.</b>	<b>MODEL POHYBU .....</b>	<b>41</b>
<b>7.</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>42</b>
<b>8.</b>	<b>SEZNAM LITERATURY .....</b>	<b>43</b>
<b>9.</b>	<b>SEZNAM ZKRATEK .....</b>	<b>44</b>
<b>10.</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....</b>	<b>45</b>
<b>11.</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>45</b>

## 1. Úvod

V současné době se stále více uplatňuje měření použitím GNSS (Globálních navigačních družicových systémů). Tyto technologie se dnes často využívají pro různé druhy geodetických měření. Obecně lze pomocí přesných geodetických GNSS přijímačů zajistit centimetrovou až milimetrovou přesnost.

Při vysoce přesných měřeních, jako je například dlouhodobé měření v geodetických sítích, je potřeba co nejvíce eliminovat systematické chyby k dosažení požadované přesnosti. Systematické chyby lze rozdělit do tří základních skupin: chyby způsobené družicí, chyby vyvolané prostředím šíření signálu a chyby způsobené přijímačem. Tato práce souvisí s určením chyby fázového centra, kterou řadíme do poslední skupiny. (Švábenský, 1995)

Obecně se v sítích často používají různé typy antén, což zvyšuje nutnost přesného určení fázových center antény. Antény se liší nejen mezi výrobci, ale i mezi jednotlivými kusy stejného typu modelu. Většinou je každá anténa popsána od výrobce pouze typovou střední hodnotou vertikální složky svého fázového centra. Hodnoty fázového centra se ale mohou značně lišit od své střední hodnoty pro jednotlivé typy antén a právě při požadavku vysoké přesnosti na měření je potřeba využít individuální kalibrace fázového centra antény. (Bilich, 2010)

Tato práce popisuje polohovací zařízení a konstrukční součásti jeho polohovacího ramene vyvíjeného na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě stavební, Ústavu geodézie, za účelem sestavení přístroje pro absolutní kalibraci anténních fázových center. Tato práce navazuje na projekty specifického výzkumu FAST-S-11-66/1441 „Vývoj zařízení a metod pro absolutní kalibraci antén GNSS“ a FAST-S-11-2468 „Testování zařízení a vývoj výpočetního zpracování pro absolutní kalibraci antén GNSS“.

Dále jsou definovány geometrické parametry polohovacího ramene, je popsán postup sestavení polohovacího ramene se záměrem minimalizace odchylek od ideálního stavu. Je zvolena metoda zaměření definovaných geometrických parametrů, zaměřené geometrické parametry jsou vyhodnoceny a dosažené difference jsou graficky vyobrazeny.

Následně je zaměřen pohyb přístroje sloužící k ověření některých definovaných geometrických parametrů. Zaměření pohybu je provedeno geodetickou metodou, je proveden výpočet prostorových souřadnic v jednotlivých krocích pohybu a z porovnání souřadnic jednotlivých poloh jsou prokázány některé difference získané při předchozím zaměření geometrických parametrů. Na závěr je uveden model pohybu, který bude sloužit k výpočtu polohy anténního referenčního bodu v lokální topocentrické soustavě při zpracování dat kalibrace GNSS antén.

## 2. Kalibrace GNSS antén

Tím, že je v současné době technologie GNSS hojně využívanou nejen v geodézii, dochází ke zvyšování požadavků na přesnost určení polohy bodu. Nejčastěji se kalibrují antény pro měření v sítích permanentních stanic, kde je důležité, aby parametry všech použitých antén byly co nejpřesnější a homogenní, dále pak antény pro tvorbu geodetických polohových základů, pro geodynamický výzkum, ale i v přesných aplikacích v oblasti inženýrské geodézie, zejména ve výstavbě. Se zvyšujícími se požadavky na přesnost současně roste i požadavek na eliminaci systematických chyb, mezi které patří i určení excentricit a variací fázových center antén.

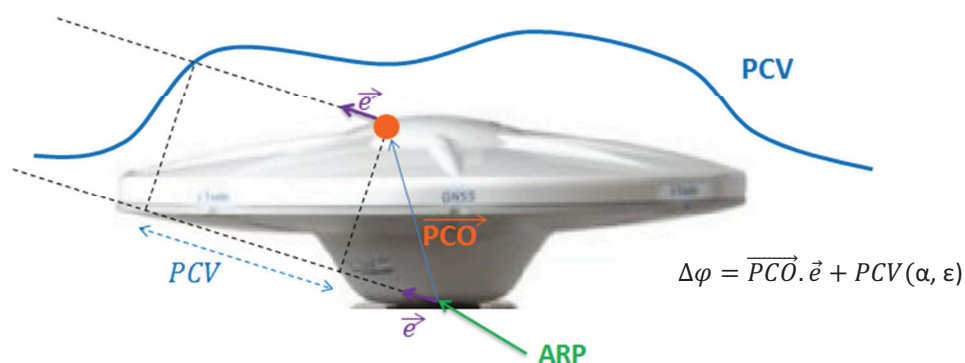
### 2.1 Účel kalibrace

Pro přesný výpočet polohy z fázových měření se zavedením korekcí fázového centra a jeho variací je vyžadována právě kalibrace antény. Obecně se předpokládá, že všechna měření pomocí GNSS antén jsou vztažena k jednomu specifickému bodu antény. Pozice a stabilita takového bodu přímo ovlivňuje přesnost určení polohy pomocí GNSS, a tudíž i určených souřadnic. Avšak skutečný bod příjmu signálu se mění v závislosti na směru (azimutu a elevačním úhlu) přijímaného signálu. (Schimtz, 2008)

Pro účely kalibrace je nutné definovat anténní rámec. Anténní rámec je vázaný na konstrukci antény a k jeho popisu je využíván souřadný systém NEU (North – East – Up). Základem anténního rámce je anténní referenční bod (ARP), většinou jde o průsečík svislé osy upínacího závitu a spodní plochy pouzdra antény, viz *obrázek 2.1*. Kalibrací se určuje pohyb fázového centra antény (APC). Při modelování pohybu fázového centra se většinou v dnešní době využívá určení střední hodnoty fázového centra (PCO) a jeho variací (PCV). PCO si lze představit jako hodnotu vektoru vyjadřujícího střední polohu místa příjmu signálu, která je získána na základě kalibračního měření. PCV jsou pak délkové opravy fázového měření, viz *obrázek 2.1*. PCV jsou popisovány jako funkce vertikálního (elevačního) úhlu, anebo jako funkce elevačního a azimutálního úhlu. Uvedená teorie slouží k opravě fázového měření takovým způsobem, aby se jevílo jako měřené v jednom bodě bez závislosti na směru příjmu signálu. (Bilich, 2010)

PCO a PCV závisí i na pozorované frekvenci, a tudíž jsou odlišné pro frekvence L1 a L2. Každý signál tak vyžaduje vlastní kalibraci. Dle (Schmitz, 2008) se kalibrace stává komplexnější, pokud do ní zapojíme i různé frekvence ruských satelitů GLONASS.

Podle (Wübbena, 2000) někteří uživatelé stále používají typové hodnoty vertikální složky uváděné výrobcem a to při využití ve vysoce přesných aplikacích není dostačující. Zanedbané PCV korekce mohou vést až k několika-centimetrovým chybám ve fázovém měření.



Obrázek 2.1 Anténní rámeček

## 2.2 Přístupy ke kalibraci

Kalibraci, kterou získáme parametry antény, je možno provádět dvěma různými způsoby. Jedná se o relativní a absolutní kalibraci.

Podle (Bilich, 2010) je při relativní kalibraci testovaná (kalibrovaná) anténa umístěna na pilíři nedaleko referenční antény. Observace, při které se sbírají příslušná fázová data, probíhá déle jak 24 hodin a měření je prováděno současně na obou aparaturách. PCO referenční antény je znám nebo odhadnut pro obě frekvence L1 a L2 a PCV referenční antény jsou nastaveny na nulu pro obě frekvence.

Měření na krátké základně bývá uskutečněno ve dvou základních etapách, přičemž ve druhé etapě dochází k záměně referenční a testované antény. Z měřených dat jsou určeny rozdíly PCO a PCV kalibrované antény relativně vůči referenční anténě, jejíž parametry známe a považujeme je za neměnné. Pro odstranění vlivu konfigurace družic by základní etapa měla trvat nejméně 12 siderických hodin. Dále lze také využít metody, kdy je v dalších etapách měření otočeno nejprve s referenční anténou a poté s testovanou anténou o 2R, čímž lze získat absolutní hodnoty horizontální složky PCO. (Nohejl, 2006)

Avšak díky zbytkovým vlivům multipathu (vícecestného šíření signálu) je obtížné určit azimutální závislost polohy APC nebo dokonce jeho chování v elevačním úhlu pod 10°. Výsledky tak nejsou dostačující pro různě orientované antény, natočené či nakloněné antény a antény ve velkých sítích. Obecně používaná referenční anténa AOADM/T má PCV závislé na elevaci v řádu 1-2 cm. (Wübbena, 2000)

Druhým přístupem, kterým se práce podrobněji zabývá v následující kapitole 2.3, je absolutní kalibrace. Dnes se absolutní kalibrací zabývá např. státní agentura NGS (National Geodetic Survey) v Americe, společnost Geo++ v Německu, Universita v Hannoveru a Universita v Bonnu. Pro vysvětlení principů a funkce absolutní kalibrace byl vybrán postup společnosti Geo++.

Společnost Geo++ ve spolupráci s Universitou v Hannoveru vynalezla robota pro absolutní kalibraci GNSS antén a prokázala, že určení APC je při použití této metody



kompletně nezávislé na vlastnostech referenční antény a lokalitě, kde kalibrace probíhá. Kalibrovaná anténa je upevněna na rameno trojosého robota, který umožňuje kalibrovanou anténou natáčet do požadovaných azimutů a naklánět do příslušných elevačních úhlů.

Koncept staniční kalibrace je založen na měření dvou antén na krátké základně, kdy kalibrovanou anténou je otáčeno do několika tisíců různých anténních orientací (poloh o různé rotaci a náklonu přístroje), a na nutnosti eliminování vlivu multipathu při výpočetním zpracování. Díky zmíněným vlastnostem metody mohou být variace fázového centra určeny přesně nejen v závislosti na elevačním úhlu, ale i na azimutu. Stejně spolehlivě lze určit PCV pro elevační úhly blízké nule. Spolehlivost výsledků určení PCO a PCV pro individuální antény byla potvrzena mnohonásobnou kalibrací v různých místech, s různými roboty a různými observačními plány. (Wübbena, 2000)

### 2.3 Absolutní kalibrace

Absolutní staniční kalibrace s použitím robota určuje chování APC kalibrované GNSS antény. Při kalibraci antény je zásadní použití takové procedury, která není ovlivněna multipath efektem a současně je nezávislá na referenční anténě, čehož lze docílit např. pomocí pohybujícího se kalibrovaného robota, který s vysokou frekvencí umožňuje změnu náklonu a natočení testované antény.

K provedení kalibrace bez systematických vlivů (multipath, vliv referenční antény) je při kalibraci antény nezbytné použití rychle se pohybujícího robota. Jsou-li časové odchylky mezi po sobě následujícími epochami jen několik sekund, dochází pak k vysoké korelaci multipathu mezi dvěma po sobě následujícími epochami a multipath může být lehce eliminován matematickou metodou (Kalmanův filtr). Pro vyloučení rizika potenciálního multipathu nevyložitelného matematickou metodou, je zaváděna vysoká elevační maska (např.  $18^\circ$ ), která je dynamicky aplikována i na nakloněné orientace. (Schmitz, 2008)

Obecně chyby spojené s přijímačem dělíme na chyby statické a chyby závislé na čase. Multipath bývá posuzován jako chyba závislá na čase, protože ovlivňujícími faktory mohou být změny v konstelaci družic. Pro PCO antény lze naopak předpokládat statické (stálé) chování avšak bez ohledu na faktory jako je teplotní závislost a změna materiálových vlastností v čase. Pro získání charakteristik zmíněných chyb je vždy důležité kalibrovat celý anténní systém. Výsledky kalibrace popisují chování APC společně s působením blízkého okolí např. z groundplane či horní části konstrukce aparatury. (Wübbena, 2000)

Další chyby způsobované ionosférou, troposférou a chyby drah družic jsou vyloučeny použitím blízké referenční stanice. Díky tomuto pozorovacímu postupu je možné nakonec získat parametry APC bez zbytkových systematických efektů. Dle (Schmitz, 2008) lze absolutní anténní kalibrací pomocí robota zajistit přesnost anténních parametrů lepší než 1 mm pro obě pozorované frekvence L1 a L2.

### 2.3.1 Zařízení pro absolutní kalibraci v Geo++

Následující kapitola vychází z článku (Wübbena, 2000). Podle zmíněného článku je kalibrace založena na třech základních konceptech. Prvním konceptem je automatizace postupu pomocí kalibrovaného robota. Jedná o trojosého robota, na jehož rameno je upevněna kalibrovaná anténa, přičemž rameno umožňuje kalibrovanou anténou natáčet do požadovaných azimutů a naklánět do příslušných elevačních úhlů, viz *obrázek 2.2*.

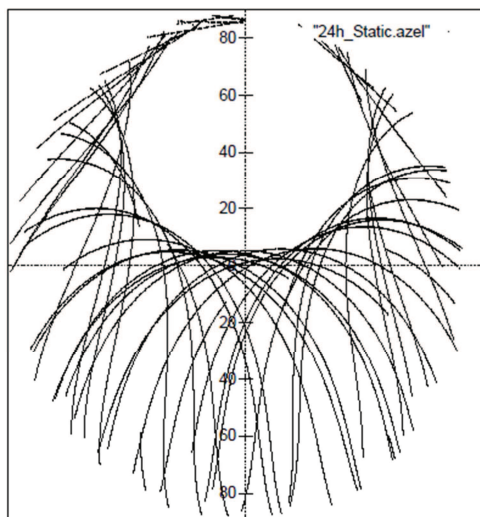


*Obrázek 2.2 Robot v Geo++*

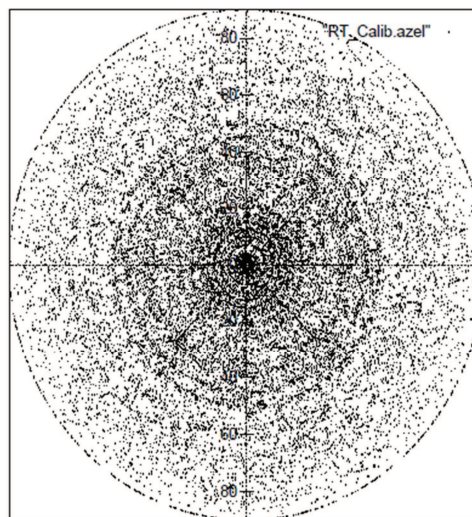
Pro určení pozic s co nejvyšší přesností byl do výpočtu kalibrace zaveden model chyb robota. Parametry modelu jsou délka ramene, úhlový offset, rotace a posuny souřadného systému pro každý prvek robota. Dále jsou do modelu zavedeny váhové koeficienty pro zohlednění různých silových momentů. Zaměření robota je provedeno s vysokou přesností systémem TMS (theodolit measurement system). Několik stovek pozic robota je změřeno s přesností přibližně 0,1 mm a určené parametry jsou ověřeny dalšími nezávislými měřeními TMS. Celková přesnost různě orientovaných anténních pozic s použitím vah leží mezi 0,2 až 0,3 mm. Zaměřené parametry jsou následně použity pro výpočet polohy robota při kalibraci antény.

Druhým konceptem je automatizace postupu celého observačního programu. Pro vysokou přesnost určení parametrů antény je vyžadován vysoký počet pozic. Měřicí program automatizovaně pro určení požadované pozice využívá aktuální konstelaci družic, stanovuje délku observační doby a očekávanou přesnost PCV. Tak je dosaženo konzistentního a homogenního pokrytí anténní hemisféry i v horizontu antény. Observační programy jsou individuálně sestavené na základě konstelace družic tak, aby redukovaly vliv systematických chyb. *Obrázek 2.3* ukazuje pokrytí hemisféry antény observacemi ze staniční absolutní kalibrace v reálném čase v porovnání s *obrázkem 2.4*, který ukazuje 24 hodinové statické měření na téže stanici. U obrázku se statickou polohou antény lze pozorovat nepokrytou oblast v severní oblasti, která je způsobena konstelací

druhic navigačních systémů. Naopak při absolutní kalibraci s pohyblivým robotem lze pozorovat husté homogenní pokrytí celé hemisféry antény. Průměrná hodnota počtu pozic leží mezi 6000 – 8000 v závislosti na čase a momentální konstelaci družic.



Obrázek 2.3 Statická observace



Obrázek 2.4 Staniční absolutní kalibrace

Třetí koncept souvisí s eliminací multipathu. Automatizace dovoluje používat elevační masku, přičemž observace ze satelitů nižší elevace nejsou použity k určení parametrů antény. Tato maska je používána dynamicky v závislosti na aktuální anténní inklinaci, a proto je multipath většinou vyloučen již během procesu kalibrace. Více o vlivu a významu vyloučení multipathu lze nalézt v kapitole 2.3.2.

Homogenní pokrytí společně s vyloučením multipathu je potřebné pro přesné řešení určovaného fázové centra. V průběhu vývoje byly později používány observace záporného elevačního úhlu na anténě (až  $-5^\circ$ ) za účelem stabilizace PCV v horizontu antény. Tyto observace ze spodní hemisféry stabilizují PCV v nízkých elevacích a díky tomu nedeformují výsledky.

Funkčnost celého procesu byla několikrát testována. Nejdůležitějším ověřovacím testem je (mimo ověření PCV korekcí v různých aplikacích) porovnání nezávisle určeného PCV vzoru vycházejícího z různých kalibrací identické antény. Obdobné výsledky získané při opakování procedury s různými roboty na různých stanicích a v různé denní době (odlišné difference multipathu, jiné počasí, různá konstelace, měřicí program, prostředí stanice, nastavení) potvrzují vysokou přesnost (kvalitu) a nezávislost určovaného absolutního PCO a PCV na vnějších podmínkách.

### 2.3.2 Vliv Multipathu

Oddělení vlivu multipathu a parametrů antény je prvotním požadavkem pro jejich přesné určení. PCV GNSS antény a multipath jsou dvě dominantní na orientaci antény

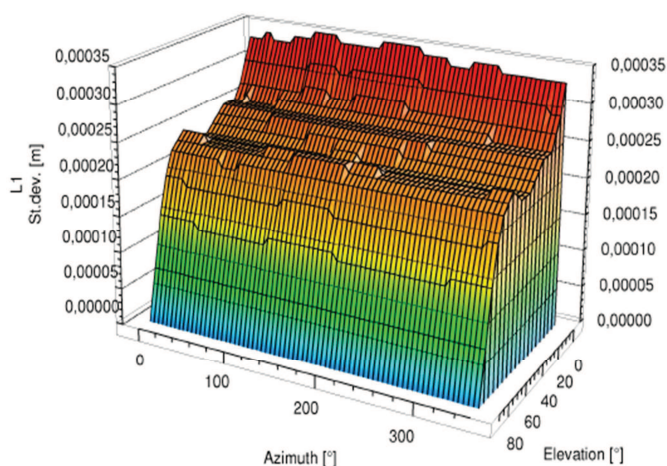
závislé chyby, které mají významnou spojitost s přesným určováním polohy v GNSS aplikacích. Následující kapitola je převzata z článku (Wübbena, 2006).

PCV jsou určeny pouze pokud je významně redukován vliv multipathu. Neeliminované chyby multipathu, které jsou způsobeny vlastnostmi a prostředím antény výrazně modifikují hodnoty určených parametrů. Vliv místa na multipath lze rozdělit na efekty blízkého a vzdáleného okolí, které mají odlišné vlastnosti. Efekty blízkého okolí jsou převážně způsobeny odraznými plochami v těsné blízkosti antény jakožto i dalšími elektromagnetickými vlivy okolí (např. ohyb signálu přímo na konstrukčních prvcích antény) a způsobují systematické chyby hlavně ve výškové složce. Nemá význam se snažit tyto efekty odstranit, naopak je výhodné je zahrnout do určovaných kalibračních parametrů. Efekty vzdáleného okolí nemá naopak význam zahrnovat do určovaných parametrů, protože jsou závislé na podobě okolí observačního stanoviště, což umožňuje jejich eliminaci dostatečnou délkou observace.

Je známo, že z předmětů v blízkém okolí antény způsobuje multipath efekt i vlastní povrch observačního pilíře, na kterém je anténa připevněna. K posouzení vlivu tohoto efektu byla firmou Geo++ provedena kalibrace s podloženými deskami čtvercového a kruhového tvaru simulujícími povrch observačního pilíře. Z kalibrace byl prokázán vliv na hodnoty PCV až o velikosti 7,5 mm pro nízké elevační úhly, 5 mm pro elevační úhel  $10^\circ$  a pro některé intervaly hodnot azimutů byl prokázán dokonce efekt větší. Multipath způsobený odraznou plochou pilíře výrazně ovlivňuje výškovou složku při určení polohy zejména u kruhového pilíře.

### 2.3.3 Přesnost absolutní kalibrace

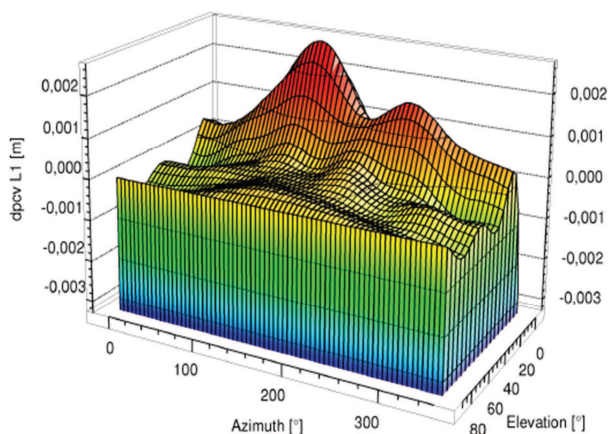
Směrodatná odchylka určení parametrů antény je obecně pro všechny azimuty homogenní v rozsahu 0,2-0,3 mm, pouze v okrajových zónách elevace do  $5^\circ$  nabývá 0,4 mm, jak lze vidět na *obrázku 2.5*.



Obrázek 2.5 Směrodatná odchylka určení PCV



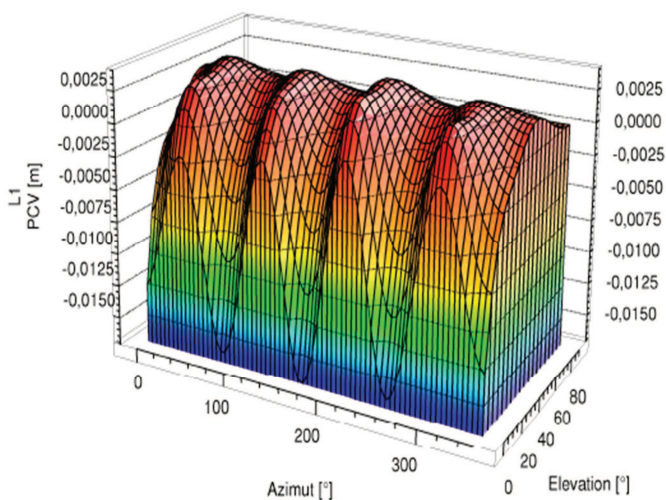
Obrázek 2.6 zobrazuje graf opakovatelnosti nezávislých kalibračních měření. Lze zde vidět diference mezi dvěma kalibracemi stejné antény s různými roboty, na různých stanicích, v různé dny. Rozdíly dvojí kalibrace dosahují hodnot  $\pm 0,5$  mm v elevačním rozsahu 90-10°. Blíže k horizontu lze nalézt diference okolo 1 mm (zde lze dokonce vidět jeden vrchol o hodnotě 2 mm, ten je způsoben špatným chováním antény, které je v blízkosti horizontu typické pro většinu antén). (Wübbena, 2000)



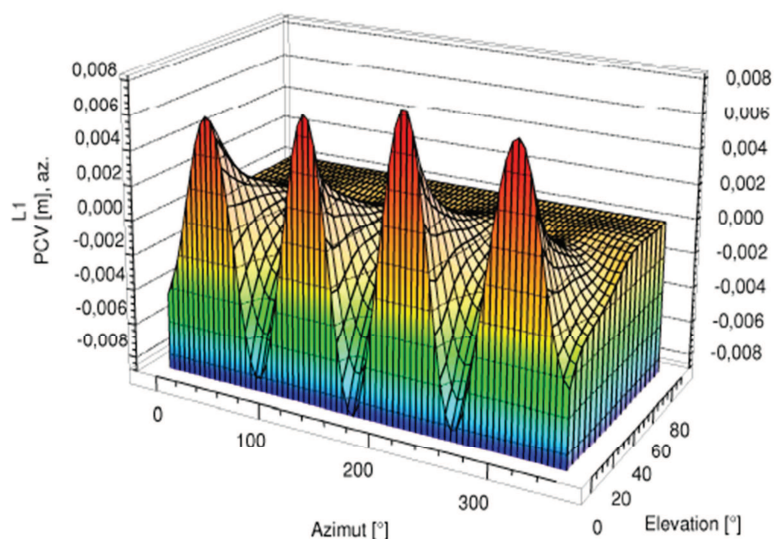
Obrázek 2.6 Odchyly nezávise určeného PCV

### 2.3.4 Vliv azimutu na PCV a další vlivy

Některé typy antén mají závislost PCV na azimutu tak výraznou, že ji nelze zanedbat. Na obrázku 2.7 lze vidět variace vykazující eliptický průběh. Efekty individuálního offsetu jsou zde odstraněny a lze vidět, že variace mají dominantnější vliv v azimutu. Pokud z tohoto měření odstraníme jak efekt offsetu, tak elevace, je možné na obrázku 2.8 rozlišit čisté variace závislé pouze na azimutu. Ty lze pozorovat hlavně v úrovni horizontu. Minima a maxima těchto variací mohou být korelovány s hranou a povrchem krytu antény. (Wübbena, 2000)

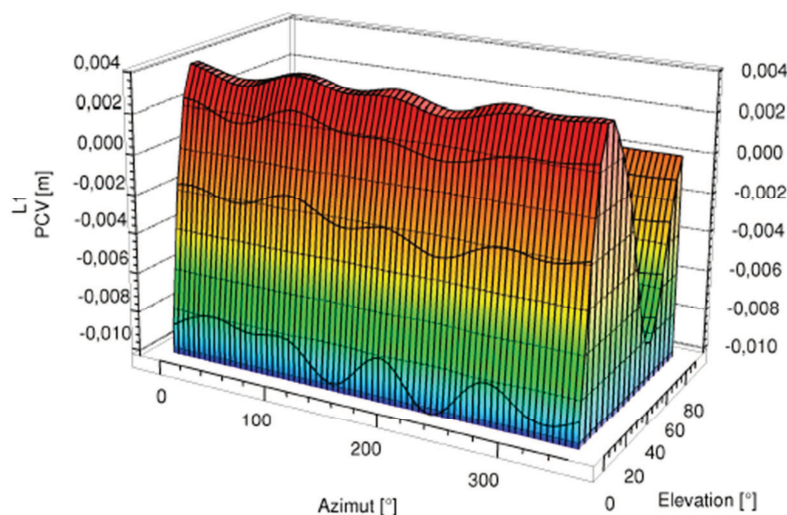


Obrázek 2.7 PCV závislé na azimutu



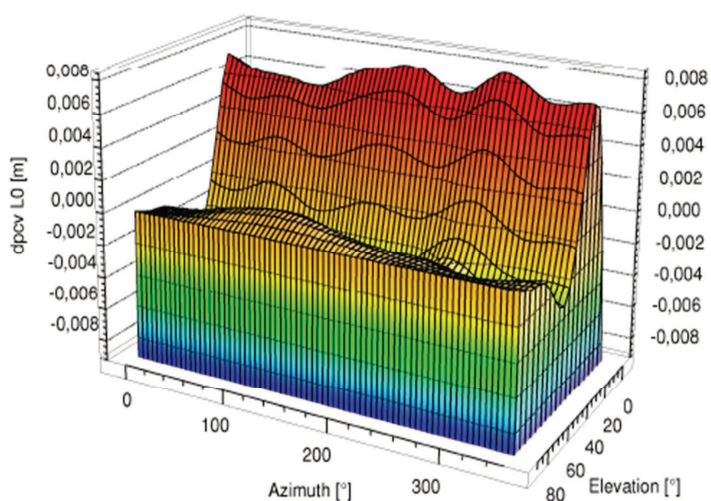
Obrázek 2.8 PCV závislé na azimutu bez ostatních vlivů

Na obrázku 2.9 lze vidět parametry antény, ke které byl připojen groundplane. Groundplane je plochým nebo téměř plochým vodorovným povrchem, který může být součástí antény a slouží k odrazení radiových prvků z konstrukčních prvků antény. Nejčastěji je používán kovový disk situovaný pod kalibrovanou anténou. Groundplane ukazuje vliv změn anténních elementů v blízkém poli a radikálně mění fázový vzor. Oproti obrázku 2.8 zde význam variace závislé na azimutu téměř mizí, naopak jsou zde pozorovatelné velké gradienty PCV závislé na elevaci (1mm/1deg). (Wübbena, 2000)



Obrázek 2.9 Vliv groundplane

Dalším faktorem ovlivňujícím fázový vzor je konstrukce anténní kopule. Na *obrázku 2.10* je znázorněn vliv anténního krytu, který je připevněn k oddělenému groundplane (kovový kruh). Vliv groundplane byl potvrzen několika experimenty a bylo prokázáno, že mění vzor v rozsahu asi 0,8 cm. Při změně vzdálenosti groundplane od antény vykázaly výsledky kalibrace opět významné difference v porovnání s originálním sestavením. Nejvýznamnější difference jsou ve fázovém vzoru variací zapříčiněny hlavně změnami v blízkém okolí antény (např. typ a vzdálenost groundplane, přidavný groundplane). (Wübbena, 2000)



*Obrázek 2.10 Vliv konstrukce antény*

### 3. Polohovací zařízení StAnCa

StAnCa (Station Antenna Calibration) je polohovací zařízení pro absolutní kalibraci antén globálních navigačních satelitních systémů.

Tato kapitola se zabývá popisem polohovacího zařízení vyvíjeného na Ústavu geodézie, Fakulty stavební na VUT v Brně. Je zde popsána konstrukce polohovacího zařízení, které umožní kalibrovanou anténou, obdobně jako přístroj v Geo++, natáčet do požadovaného azimutu a naklánět do příslušného elevačního úhlu. Polohovacímu zařízení jsou zde také definovány geometrické parametry, jejichž zaměření je popsáno v další kapitole.

Dále se tato kapitola zabývá činnostmi, které proběhly při sestavování přístroje do finálního stavu. Finálním stavem se rozumí stav, ve kterém je zajištěna kompaktnost přístroje. Soudržnost byla zajištěna zalepením a vzájemným zakolíčkováním jednotlivých částí přístroje, což znemožní jakýkoliv pohyb či posun částí přístroje i během jeho přenosu. Smyslem těchto činností bylo vytyčení některých základních geometrických parametrů a možnost minimalizace vznikajících odchylek od jejich projektovaného stavu. Tyto parametry bude nutno v dalších fázích implementovat do výpočtu polohy fázového centra a jeho variací.

Pro popis zařízení a následné vyobrazení získaných diferencí byly jako podklad využity výkresy vytvořené Ing. Markem Kalinou v rámci specifického výzkumu FAST-S-11-66/1441 „Vývoj zařízení a metod pro absolutní kalibraci antén GNSS“. Tyto výkresy byly aktualizovány a jako schémata použity k popisu zařízení a k vyobrazení získaných diferencí.



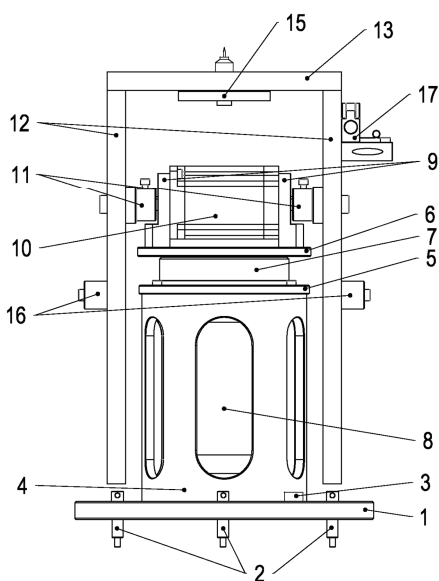
Obrázek 3.1 StAnCa – polohovací rameno



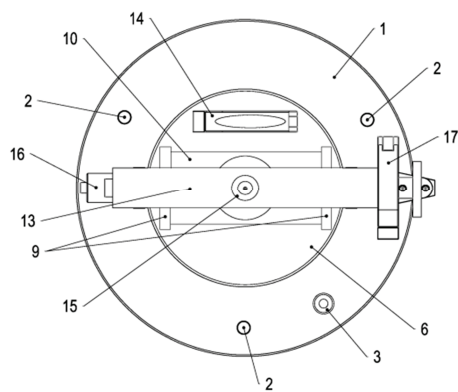
### 3.1 Popis konstrukce polohovacího zřízení

StAnCa se skládá z polohovacího ramene a řídicí jednotky. Polohovací rameno (viz *obrázek 3.1*) se sestává ze spodní nepohyblivé části, kterou je možno centricky upevnit na pilíř, a pohyblivé části, určené pro připevnění antény, která umožňuje natáčení antény do požadovaných poloh. Části polohovacího ramene jsou znázorněny na *obrázcích 3.2* a *3.3*.

Centrické postavení polohovacího ramene na pilíř zajišťuje trojnožka (1), tvořená ocelovou deskou o průměru 324 mm a výšce 20 mm. Trojnožkou prochází 3 závitové stavěcí šrouby (2), které umožňují horizontaci přístroje. Na trojnožce je připevněna krabicová libela (3) umožňující hrubou horizontaci. Trojnožka je k pilíři upevněna pomocí speciálně vytvořeného systému upínacích šroubů z mosazi. Do trojnožky je shora upevněn černý dutý ocelový tubus (4) s pěti otvory. Tubus o průměru 179 mm, výšce 226 mm a tloušťce stěny 11 mm je shora zakončen ocelovou horní deskou (5) o průměru 187 mm a tloušťce 10 mm. Vrchní otáčivá deska (6) ze stejného materiálu a o stejné velikosti je s (5) spojena pomocí radiálního ložiska (7). K horní desce (5) je zespod upevněn motor M1 (8), jehož rotační osa prochází touto deskou volně a je pevně uchycena do vrchní otáčivé desky (6). Jedná se o krokový motor s jednostrannou hřídelí, pomocí kterého lze s vrchní otáčivou deskou otáčet kolem vertikální osy.



Obrázek 3.2 Přední pohled



Obrázek 3.3 Horní pohled

Na vrchní otáčivou desku je pomocí duralových nosníků (9) a ložisek uložen motor M2 (10). Motor M2 je rovněž krokovým motorem s oboustrannou hřídelí, na jehož rotační osu jsou prostřednictvím mosazných úchyťů (11) z obou dvou stran upevněna nosná ramena (12), která jsou pevně spojena s horním překladem (13) a společně tvoří tvar „obráceného U“. Nosná ramena jsou z duralu o rozměrech 20 x 40 x 435 mm. Taktéž horní překlad je z duralu a jeho rozměr je 250 x 40 x 20 mm. Současně je na vrchní otáčivou

desku umístěna trubicové libela (14) ve směru osy motoru M2, umožňující jemnou horizontaci. Do středu horního překladu je umístěn mosazný úchytný šroub (15), na který se uchytí kalibrovaná anténa GNSS. Pomocí nosných ramen lze tuto anténu sklápět kolem horizontální (klopné) osy motoru M2. Nosná ramena jsou osazena zatěžovacím závažím (16), které slouží k vyvážení hmotnosti kalibrované antény. Na vrchní část pravého nosného ramene je umístěna druhá trubicová libela s kolimátorem (17), sloužící k urovnání nosných ramen do svislého směru a k orientaci polohovacího ramene.

Pomocí motorů M1 a M2 a ovládací řídicí jednotky lze vertikální osu nosného ramene vychýlit do obecného azimutu a elevačního úhlu. Rozsah vertikálního vychýlení (sklápění) ramene je  $\langle 0^\circ, 90^\circ \rangle$  popř.  $\langle 0^\circ, -90^\circ \rangle$ . Horní otáčivou deskou lze vertikální osu polohovacího ramene natočit do libovolného azimutu  $\langle 0^\circ, 360^\circ \rangle$  resp.  $\langle -180^\circ, 180^\circ \rangle$ .

Polohovací rameno je ovládáno řídicí jednotkou, která se skládá ze zdroje stejnosměrného napětí, ze dvou driverů ovládajících motory, z univerzální vstupně/výstupní karty s programovatelným hradlovým polem a vlastním oscilátorem, ze switche a z osobního počítače (PC) s operačním systémem LinuxCNC, který obsahuje nástroje pro ovládání přístroje.

### 3.2 Definice geometrických parametrů polohovacího ramene

Pro další práci s přístrojem při následném kalibrování GNSS antén je zapotřebí znát geometrické charakteristiky přístroje. Pro určení základních geometrických parametrů mezi součástmi uvedenými v předchozí kapitole byly na přístroj umístěny signalizační hroty. Hroty jsou vytvořeny z oceli a vysoustruženy do špičky, viz *obrázek 3.4*. Celkem se jedná o 3 hroty označené H1, H2 a H3.



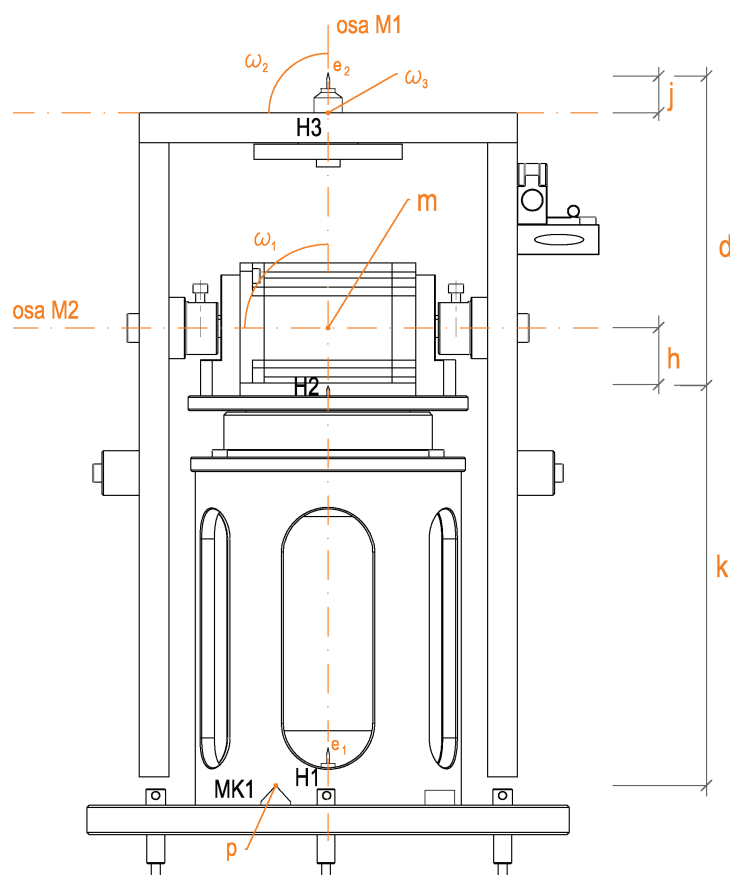
Obrázek 3.4 Signalizační hrot

Hrot H1 je umístěn do středu trojnožky, konkrétně do středu upínacího šroubu, kde signalizuje osu upínacího čepu pilíře a současně upínací otvor trojnožky. Hrot H2 je umístěn do středu osy motoru M1 a je definován jako střed pohyblivé soustavy. Špičku hrotu lze pozorovat nad vrchní otáčivou deskou. Hrot H3 je umístěn na přístroji nejvýše, konkrétně do úchytného šroubu v horním překladu, a signalizuje osu kalibrované antény. Dále byl do trojnožky umístěn mosazný kužel MK1, ke kterému bude vztažena výška při staničním měření na terase fakulty B.

Byly definovány základní geometrické parametry. Některé z nich byly kontrolovány při sestavení konstrukčních dílů polohovacího ramene a všechny níže definované geometrické parametry byly zaměřeny a určeny, což je popsáno v kapitole 4.

Základní geometrické parametry jsou následující:

- $m$  – vzdálenost os motorů M1 a M2 (míra mimoběžnosti)
- $\omega_1$  – úhel sevření os motorů M1 a M2
- $\omega_2$  – úhel sevření vrchní roviny horního převladu vůči ose M1 (směr E)
- $\omega_3$  – úhel sevření vrchní roviny horního převladu vůči ose M1 (směr N)
- $e_1$  – vektor excentricity H1 vůči ose M1
- $e_2$  – excentricita H3 vůči ose M1
- $p$  – poloha mosazného kuželu MK1 v trojnožce
- $k$  – převýšení mezi vrcholem mosazného kužele MK1 a hrotem H2
- $h$  – převýšení mezi hrotem H2 a středem osy motoru M2
- $d$  – převýšení mezi hroty H2 a H3
- $j$  – vzdálenost mezi hrotem H3 a vrchní rovinou horního převladu.



Obrázek 3.5 Zákres základních geometrických parametrů

### 3.3 Výchozí pozice přístroje

Výchozí (nulová) pozice, se kterou bylo pracováno při zaměřování geometrických parametrů (a dále bude při staničním měření na terase), je určena orientací trojnožky na sever pomocí vyznačené šipky na trojnožce. Po horizontaci polohovacího ramene je osa motoru M2 natočena kolmo k záměře (ve směru šipky) realizované měřickým přístrojem, přičemž nosné rameno s trubicovou libelou a kolimátorem (rameno SL) je umístěno napravo jako při pohledu na *obrázku 3.5*.

Zároveň byl brán ohled i na orientaci přístroje na terase při staničním měření. Přístroj bude umístěn na JZ pilíř terasy, který je dostupný pouze ze severní a východní strany. S ohledem na přístupnost byla na přístroj umístěna krabicová libela, vývod kabelů do řídicí jednotky a trubicová libela s kolimátorem na vhodném nosném rameni. Kolimátorem bude pohyblivou částí polohovacího ramene cíleno na definovaný bod v jižním směru, čímž bude docíleno vždy stejné výchozí pozice. Ramena tak budou natočena v západovýchodním směru, přičemž rameno SL bude směřovat na západ. Na závěr bude nosné rameno v této pozici urovňováno (nakloněno) hrotem H3 do osy motoru M1.

### 3.4 Činnosti předcházející finálnímu sestavení přístroje

Cílem prací v této fázi byla možnost minimalizace diferencí některých základních geometrických parametrů polohovacího ramene, jedná se vzdálenost motorů  $m$ , úhly sevržení  $\omega_1$  a excentricity  $e_1$  a  $e_2$ , vznikajících sestavováním přístroje. Práce uváděné v této kapitole proběhly v srpnu a počátkem září roku 2013.

V první fázi byla kontrolována excentricita  $e_1$  vůči ose motoru M1, která je signalizovaná hrotem H2. Osa motoru M1 byla uvedena do svislice horizontací pomocí stavěcích šroubů a příložné libely Kinex (trubicová libela na přístroji ještě nebyla upevněna) postupem, který eliminuje chybu seřízení libely. Citlivost příložné libely Kinex je 35". Určení citlivosti příložné libely lze nalézt v *příloze č. 1*. Při pohledovém zkoumání teodolitem Zeiss Theo 010B, kdy svislým vláknem záměrného kříže bylo zacíleno na hrot H2, bylo zjištěno, že hrot H1 vykazuje mírnou excentricitu  $e_1$ . Vznikla tak nutnost posunu tubusu po trojnožce a kvůli tomu byla zvětšena drážka pro usazení tubusu. Následně byl realizován posun a tubus byl pevně přichycen k trojnožce zakolíčkováním. Spodní hrana horní desky byla ve třech místech přilepena k vrchní hraně černého tubusu speciálním lepidlem na kov.

V druhé fázi bylo testováno centrické umístění otvorů na ose M2. Teodolitem bylo zacíleno na rozhraní sádra/kov, osou M2 bylo otáčeno do  $+90^\circ$  a  $-90^\circ$  a bylo sledováno, zdali horizontální záměrná ryska kříže je stále na uvedeném rozhraní. Kontrola proběhla na obou koncích osy v pořádku.

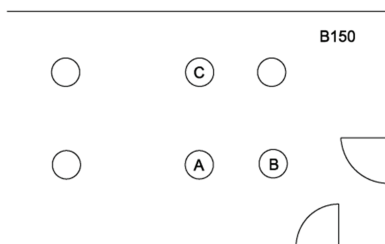
Dále bylo potřeba zjistit velikost úhlu  $\omega_1$  mezi osou motoru M2 a osou motoru M1. Osa motoru M2 prochází středem hřídele napojené na motor M2, na jejíchž koncích jsou z výroby vyvrtány otvory kulatého tvaru (lze je vidět při sundání mosazných úchytků a nosných ramen). Kulatý otvor byl vyplněn sádrkou a do sádky byla centricky vyznačena černá tečka signalizující osu motoru. Teodolitem bylo zacíleno na tečku a přístrojem bylo pomocí počítače otočeno o  $180^\circ$  kolem svislé osy a bylo shledáno, že osa motoru M2 je ve vodorovné rovině.

V třetí fázi byla určována míra mimoběžnosti  $m$  os M1 a M2 a její minimalizace. K zaměření mimoběžnosti bylo využito vytvořených teček na ose M2. Bylo zacíleno na hrot H2 a přístrojem bylo otočeno tak, aby tečka signalizující osu M2 splývala se svislým vláknem znázorňujícím osu M1. V programu byly nastaveny nulové hodnoty a přístrojem bylo pomocí programu otočeno o  $180^\circ$  kolem svislé osy. Vzniklá odchylka je dvojnásobkem vzdálenosti os motorů, a proto byl motor M2 posunut o poloviční hodnotu na opačnou stranu, než je zjištěná odchylka. V této posunuté poloze byl motor M2 zajištěn utažením imbusových šroubů procházejících duralovými nosníky a ty byly následně zakolíčkovány.

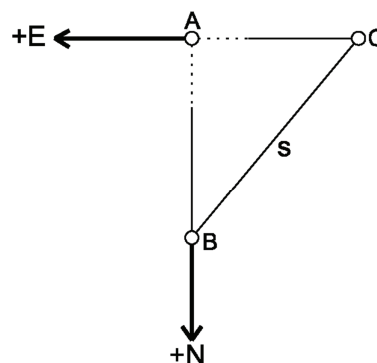
V poslední fázi, před započítím zaměřování geometrických parametrů přístroje, byla na přístroj nasazena nosná ramena s horním převodem. Nosná ramena byla pomocí teodolitu a svislé záměrné přímky zarovnána do svislého směru. Byla rektifikována trubicová libela instalovaná z boku nosného ramene. Pomocí této libely bude hrot H3 (při anténní kalibraci poloha ARPu) natáčen do svislé osy motoru M1. Současně byla kontrolována excentricita  $e_2$  hrotu H3 obdobným postupem jako  $e_1$ , byla zjištěná mírná excentricita, která byla zmenšena posunutím horního převodu. V této poloze byl horní převod zakolíčkován k nosným ramenům a nosná ramena byla zakolíčkována k úchytkům, čímž tvoří nosný celek.

## 4. Určení geometrických parametrů přístroje

K zaměření výše definovaných geometrických parametrů byly využity pilíře v učebně B150. Schéma použitých pilířů lze vidět na *obrázku 4.1*. Polohovací rameno bylo umístěno na pilíři A, geometrické parametry byly zaměřovány z pilíře B, a pokud to bylo metodou vyžadováno, byl použit i pilíř C.



Obrázek 4.1 Schéma použitých pilířů



Obrázek 4.2 Orientace souřadné soustavy

Vzdálenosti mezi používanými pilíři A, B, C byly zaměřeny totální stanicí Topcon GPT 3003N, v. č. 4D0513, jejíž střední chyba měřené délky  $s$  je  $m_s = 3 + 2 \text{ ppm}$ . Souhrnné technické parametry použitých měřických přístrojů (totálních stanic) jsou uvedeny v *příloze č. 2*. Před zaměřením délek bylo provedeno testování konstanty použitého hranolu. Testování součtové konstanty hranolu je uvedeno společně se zaměřenými vzdálenostmi v *příloze č. 3*. Výsledkem testování je, že průměrná hodnota součtové konstanty  $PSM = 0,5 \text{ mm}$  je menší než mezní chyba součtové konstanty:

$$\delta_{PSM} = m_{PSM} \cdot t = 0,3 \text{ mm} \cdot 2 = 0,6 \text{ mm},$$

kde  $t = 2$  je součinitel konfidence,  $m_{PSM}$  je střední chyba určení součtové konstanty. Konstantu hranolu není potřeba přenastavit. (Švábenský, 2006)

### 4.1 Zaměření úhlu $\omega_1$ a převýšení $h$

Při zaměřování geometrických parametrů úhlu sevření  $\omega_1$  os motorů M1 a M2 a převýšení  $h$  byly využity pilíře A (umístění StAnCy) a B (umístění totální stanice). K měření byla použita totální stanice Topcon GPT-9001A, v. č. 5C2008. Na nosná ramena polohovacího ramene byly umístěny signalizační terčíky. Tyto terčíky byly umístěny nad šestihranné upínací šrouby, které upínají nosná ramena k mosazným úchytům, viz *obrázek 4.3*. Nosná ramena byla rozlišena na rameno s trubicovou libelou (SL) a bez trubicové libely (BL).

Následující postup měření byl proveden vždy zaměřením příslušného bodu v obou polohách přístroje (totální stanice) s dvojitým cílením. Při měření byly zaznamenávány zenitové úhly, které jsou uvedeny v *příloze č. 4*. Zaměřovanými body byla špička hrotu H2 a středy terčíků na obou nosných ramenech.



Obrázek 4.3 Signalizační terčik

Totální stanicí bylo zacíleno na špičku hrotu H2, vodorovný směr byl zafixován, totální stanicí bylo přecíleno do výškové úrovně osy M2 a polohovací rameno bylo nosným ramenem s libelou (SL) pomocí softwaru natočeno přibližně kolmo na realizovanou záměru. V této pozici byla v softwaru nastavena hodnota vodorovného úhlu (nula) tak, aby mohlo být později přístrojem otočeno o  $180^\circ$ . Důvodem vynulování je rozsah otáčení přístroje, který je v intervalu  $\langle -180^\circ, 180^\circ \rangle$ . Ramenem SL bylo nakloněno do elevačního úhlu  $+90^\circ$  (vlevo) a poté do  $-90^\circ$  (vpravo). V obou polohách byly odečteny příslušné hodnoty zenitového úhlu a polohovacím ramenem bylo otočeno o  $180^\circ$  kolem svislé osy a ramenem BL bylo natočeno nejprve do pozice  $-90^\circ$  (vlevo) poté do pozice  $+90^\circ$  (vpravo). Na závěr bylo opět zacíleno na hrot H2.

Při výpočtu byly hodnoty dvojího cílení zprůměrovány a byl odstraněn vliv indexové chyby. Dále byl určen zenitový úhel pro hrot H2 jako průměr z prvního a posledního měření. Zenitový úhel výškové úrovně osy M2 byl pro obě ramena vypočten také jako průměr z hodnoty náklonu vlevo a vpravo.

Pro výpočet převýšení a výškového rozdílu mezi oběma konci osy bylo využito základního trigonometrického vzorce:

$$dh = s \cdot \cot g z,$$

kde  $dh$  je hledané převýšení (od horizontu totální stanice),  $s$  je vodorovná vzdálenost od totální stanice k příslušnému bodu a  $z$  je zenitový úhel.

Jelikož je hledáno převýšení mezi body v různých výškách, je třeba vzorec upravit na rozdíl dvou hledaných převýšení bodu 1 a 2:

$$dh = s_1 \cdot \cot g z_1 - s_2 \cdot \cot g z_2,$$

přičemž bod 1 je bodem ve vyšší výškové úrovni. Při aplikaci výše zmíněného vzorce na konkrétní situaci je potřeba použít vzdálenosti k přední hraně nosného ramene, ke které bylo úhlově měřeno.



Zaměřené převýšení obou konců osy M2 bylo přepočteno na úhlovou hodnotu sklonu. Výsledky jsou určeny jako průměr z obou měření. Měření a výpočty parametrů úhlu sevření  $\omega_1$  os motorů M1 a M2 a převýšení  $h$  jsou uvedeny v příloze č. 4. Kapitola 4.7 uvádí výsledné hodnoty s grafickým zákresem parametrů.

## 4.2 Testování míry mimoběžnosti $m$

Testování míry mimoběžnosti lze definovat jako určení nejkratší vzdálenosti mezi dvěma mimoběžnými přímkami, kterými jsou v tomto případě osy M1 a M2. V ideálním případě by tato vzdálenost měla být nulová a osy M1 a M2 by se měly protínat.

Mimoběžnost  $m$  byla testována obdobným postupem jako kolmost  $\omega_1$  při postavení přístrojů na pilířích A, B a k ověření mimoběžnosti byla opět použita totální stanice Topcon GPT-9001A, v. č. 5C2008. K zaměření byly využity terčíky z předchozího testování, včetně způsobu naklání ramen. Měření bylo opět provedeno zaměřením příslušných bodů v obou polohách přístroje (totální stanice) s dvojím cílením. Při měření byly zaznamenávány horizontální úhly. Zaměřovanými body byl hrot H2 a středy terčíků na obou nosných ramenech.

Nejprve bylo totální stanicí zacíleno na hrot H2, poté bylo nosným ramenem SL pootočeno tak, aby bylo kolmo na záměrnou přímkou a byly zaměřeny horizontální úhly na terčík v obou náklonech. Při výpočtu bylo zjištěno, že osa motoru M2 je natočena do směru záměrné přímky a přístrojem bylo pootočeno o  $180^\circ$  kolem svislé osy. Na druhém rameni BL byly také zaměřeny horizontální úhly terčíku v obou náklonech ramene.

Při výpočtu byly hodnoty dvojího cílení zprůměrovány a byl odstraněn vliv kolimační chyby. Horizontální úhel pro oba konce osy M byl vypočten jako průměr měřeného úhlu při náklonu vlevo a vpravo pro obě nosná ramena.

Výsledná vzdálenost os motorů byla vypočtena z rozdílu úhlů mezi směrem na hrot H2 a směrem na rameno BL následovně:

$$m = s \cdot tg\Delta m,$$

kde  $\Delta m$  je zjištěný úhlový rozdíl výše jmenovaných směrů,  $s$  je vodorovná vzdálenost od pilíře B po rameno StAnCy na pilíři A. Změřené hodnoty a následné výpočty jsou uvedeny v příloze č. 5. Výsledná hodnota je uvedena v kapitole 4.7.

Metoda natočení ramene kolmo na záměrnou přímkou přístroje byla ověřena. Postup této metody je následující: je zacíleno na hrot H2, nosným ramenem SL je natočeno do poloh vpravo a vlevo, je vypočten úhel mezi těmito polohami, polovina zjištěného úhlu je připočtena ke směru na hrot H2, vypočtený směr je nastaven na totální stanici a ramenem SL v poloze vpravo je natočeno do této polohy. Na počátku ověřování metody nebylo rameno přístroje úmyslně nastaveno kolmo. Po opakovaném provedení popsáno



postupu byla zjištěna rychlá konvergence. Již při druhém kroku iterace bylo téměř dosaženo požadovaného směru. Tím bylo ověřeno, že použitá metoda je správná (funkční).

### 4.3 Určení excentricit $e_1$ a $e_2$

Dalšími určovanými parametry byly excentricity  $e_1$  a  $e_2$ , hrotů H1 a H3 od osy M1. Excentricita  $e_1$  hrotu H1 vůči ose M1 (signalizované hrotem H2) byla určena ze dvou navzájem kolmých směrů AB a AC. Měření probíhalo současně, přičemž z pilíře B bylo měřeno opět totální stanicí Topcon GPT-9001A, v. č. 5C2008 a z pilíře C bylo měřeno totální stanicí Leica TC 1700, v. č. 413682.

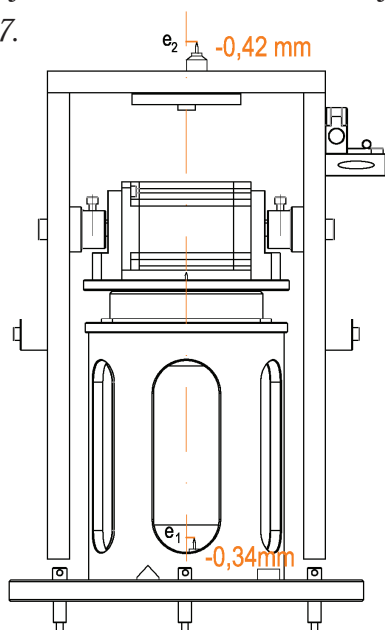
Při měření byly zaznamenávány horizontální úhly k příslušným hrotům. Měření bylo provedeno ve dvou polohách přístroje s dvojitým cílením. Zaměření excentricity  $e_1$  bylo provedeno dvakrát v různých polohách upínacího šroubu. Excentricita  $e_2$  byla zaměřena z pilíře B ve výchozí poloze a v poloze polohovacího ramene otočeného o  $180^\circ$  kolem svislé osy.

Při určování excentricit předpokládáme velmi malé hodnoty, a proto lze ve výpočtu použít přímo měřených vzdáleností mezi pilíři AB a AC a tím vypočítat excentricity pomocí základního trigonometrického vzorce:

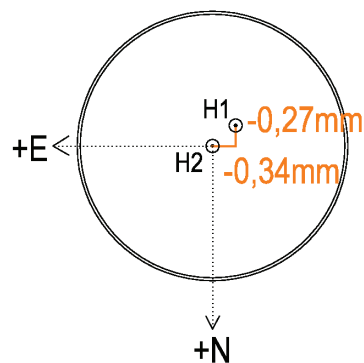
$$e_i = s_i \cdot \text{tg} \Delta\omega,$$

kde  $s_i$  je vzdálenost mezi příslušnými pilíři v určovaném směru a  $\Delta\omega$  je naměřený úhlový rozdíl.

Excentricita  $e_1$  je určena jako vektor, který má 2 složky – ve směru os E a N (viz *obrázek 4.5*). Excentricita  $e_2$  je hodnota pouze ve směru osy E, jelikož její určení ve směru N nemá význam. Změřené hodnoty a výpočty excentricit jsou uvedeny v *příloze č. 6*. Excentricity jsou zobrazené na následujících obrázcích a číselně jsou také uvedeny v *kapitole 4.7*.



Obrázek 4.4 Vyobrazení excentricit



Obrázek 4.5 Vyznačení excentricity  $e_1$

#### 4.4 Zaměření úhlů $\omega_2$ a $\omega_3$ , převýšení $d$

Úhel sevření  $\omega_2$  mezi vrchní rovinou horního překladu a osou motoru M1 ve směru osy E a úhel sevření  $\omega_3$  ve směru N byly ověřeny pomocí příložné libely Kinex s citlivostí 35".

Hodnota sklonů byla v obou případech větší než rozsah použité libely, a proto byla nejprve libela vyrovnána podložním několika papíry. Následně byla určena hodnota změny sklonu pro tloušťku papíru v příslušném směru. Výsledná hodnota sklonu byla extrapolována do pozice bez podložení papírem. Výpočet měření je uveden společně s následujícím určením převýšení  $d$  v příloze č. 7.

Převýšení  $d$  mezi hroty H2 a H3 bylo zaměřeno totální stanicí Topcon GPT-9001A, v. č. 5C2008, z pilíře B. Měřeny byly zenitové úhly vztažené ke špičkám příslušných hrotů, bylo měřeno v obou polohách přístroje s dvojitým cílením.

Výsledné převýšení bylo vypočteno vzorcem:

$$d = s_1 \cdot \cot g z_1 - s_2 \cdot \cot g z_2,$$

kde  $d$  je hledané převýšení (od horizontu totální stanice),  $s_i$  je vodorovná vzdálenost od totální stanice k příslušnému bodu a  $z_i$  je příslušný zenitový úhel. Hodnoty a grafické znázornění výsledků jsou uvedeny v kapitole 4.7.

#### 4.5 Zaměření polohy $p$ a převýšení $k$

Poloha  $p$  mosazného kuželu MK1, který lze umístit do trojnožky je určena v souřadném systému NEU. Ke špičce kužele bude vztažena výška přístroje při staničním měření na terase školy.

Poloha i převýšení byly určeny ze dvou navzájem kolmých směrů AB a AC. Měření probíhalo současně, přičemž z pilíře B bylo měřeno totální stanicí Topcon GPT 3003N, v. č. 4D0510 a z pilíře C bylo měřeno totální stanicí Topcon GPT 3003N, v. č. 4D0513.

Měření polohy  $p$  i převýšení  $k$  bylo vztaženo k hrotu H2. Horizontální a zenitové úhly byly měřeny zvlášť. Měření bylo provedeno ve dvou polohách přístroje s dvojitým cílením.

Poloha a převýšení byly vypočteny v softwaru Matlab R2011b, s využitím metody protínání z úhlů se základnou BC a určení výšky použité v následující kapitole 5.1. Zaměřené hodnoty a skript pro tento výpočet je přiložen v příloze č. 8. V kapitole 4.7 jsou uvedeny vypočtené hodnoty s grafickým zakreslením.

#### 4.6 Zaměření převýšení $j$

Převýšení  $j$  je převýšením mezi horní rovinou překladu a špičkou hrotu H3. Určení převýšení  $j$  je významné pro určení výškové roviny horního překladu – výšky bodu upnutí kalibrované antény ARPu. Převýšení bylo zaměřeno digitálním posuvným měřidlem

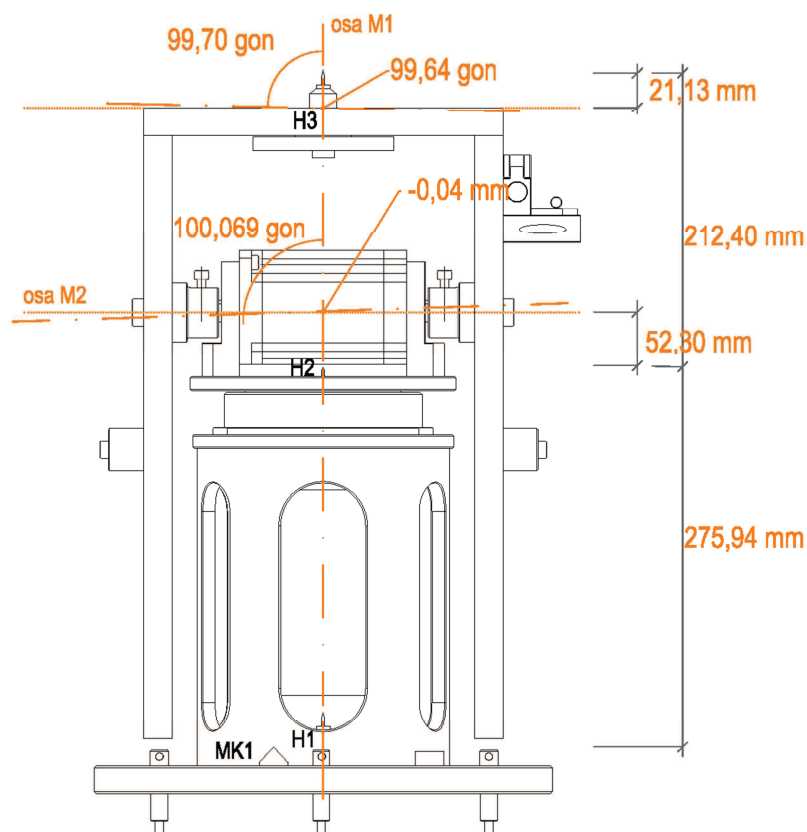
postupem uvedeným v příloze č. 9. Hodnota převýšení je uvedena s grafickým znázorněním v kapitole 4.7.

#### 4.7 Výsledné hodnoty parametrů a jejich grafický zakres

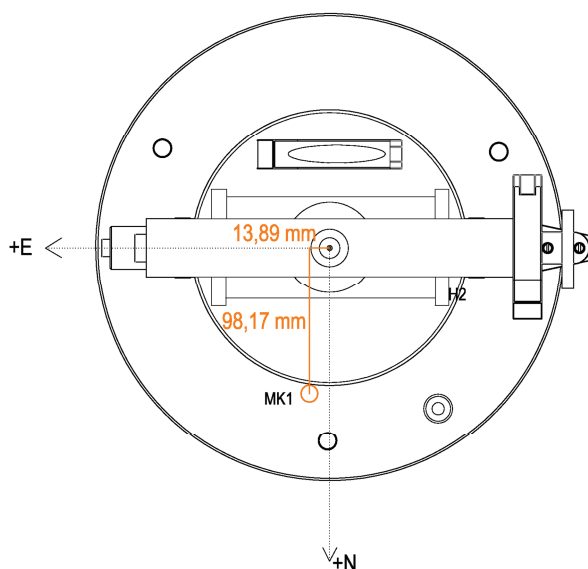
V této kapitole jsou v tabulce 4.1 uvedeny hodnoty všech geometrických parametrů. Dále jsou tyto parametry graficky vyobrazeny na obrázku 4.6 a poloha  $p$  mosazného kužele je vyobrazena na obrázku 4.7.

Tabulka 4.1 Hodnoty geometrických parametrů

Parametr	ozn.	Hodnota[mm]
vzdálenost os motorů M1 a M2	$m$	-0,04
úhel sevření os motorů M1 a M2	$\omega_1$	100,069 gon
vrchní roviny horního převladu vůči ose M1 (směr E)	$\omega_2$	99,70 gon
vrchní roviny horního převladu vůči ose M1 (směr N)	$\omega_3$	99,64 gon
vektor excentricity H1	$e_1$	[N;E] = [-0,34; -0,27]
excentricita H3	$e_2$	[E] = [-0,42]
poloha MK1	$p$	[N;E] = [98,17; 13,89]
převýšení MK1 a H2	$k$	275,94
převýšení středu osy M2 a H2	$h$	52,30
převýšení H2 a H3	$d$	212,40
převýšení H3 od vrchní roviny převladu	$j$	21,13



Obrázek 4.6 Grafické vyobrazení geometrických parametrů



Obrázek 4.7 Poloha p

#### 4.7.1 Přesnost určených parametrů

Hodnoty parametrů  $m$ ,  $e_1$ ,  $e_2$ ,  $h$ ,  $d$  byly určeny se střední chybou  $m = 0,02 \text{ mm}$ , která je získána z dvojic měření (cílení) v daném směru na vzdálenost  $s = 3,095 \text{ m}$ . Pro výpočet bylo použito 30 směrů a výsledná střední chyba úhlu v jedné poloze se určí následujícím vztahem:

$$m_{\omega}^I = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{2n}} \cdot \sqrt{2} = 9^{cc}.$$

Výše uvedené parametry byly zaměřeny ve dvou polohách přístroje s dvojitým cílením a výsledná střední chyba úhlu je vyjádřena následujícím vztahem:

$$m_{\omega} = \frac{m_{\omega}^I}{\sqrt{2}\sqrt{2}} = 4,5^{cc}.$$

Přesnost úhlu  $\omega_1$  byla získána jako přepočítání výše uvedené délkové přesnosti na šířku ramen a její hodnota je:

$$m_{\omega_1} = \text{arctg} \frac{0,02}{250} = 0,005 \text{ gon}.$$

Přesnost úhlů  $\omega_2$  a  $\omega_3$  je odvozena z citlivosti příložné libely:

$$m_{\omega_2} = m_{\omega_3} = 0,01 \text{ gon}.$$

Přesnost polohy  $p$  a určení převýšení  $k$  je závislá na přesnosti metody protínání z úhlů, jejíž přesnost je vypočtena v kapitole 5.2.3, dosahuje hodnot:

$$m_p = 0,13 \text{ mm} \text{ a } m_k = 0,08 \text{ mm}.$$

## 5. Nezávislé ověření geometrických parametrů

V předchozích kapitolách byly definovány a určeny základní geometrické parametry polohovacího ramene. Účelem této kapitoly je popis nezávislého zaměření některých geometrických parametrů z pohybu polohovacího ramene. K zachycení pohybu byl vybrán hrot H3. Je zde uveden popis metody zaměření a pohybu přístroje, výpočty a zpracování, které byly provedeny v programech Matlab R2011b a Microsoft Office - Excel 2010.

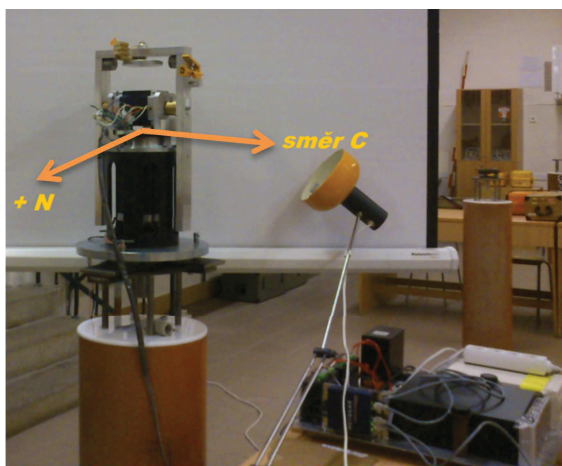
### 5.1 Zaměření pohybu geodetickou metodou

Měření proběhlo v laboratorních podmínkách v učebně B150. Pro zaměření pohybu byla zvolena metoda protínání z úhlů. K určení souřadnic zaměřovaných bodů jsou měřeny vodorovné směry. Požadovanými danými veličinami jsou pouze souřadnice výchozích bodů. Pohyb byl zaměřen ve zvolené místní soustavě, a proto byla mezi danými body zaměřena délka základny, jejíž hodnota je uvedena v příloze č. 3. (Nevosád, 2002)

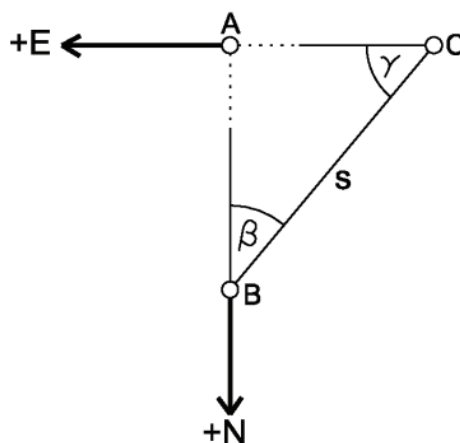
#### 5.1.1 Schéma měření

Polohovací rameno bylo postaveno na pilíři A a bylo nastaveno do nulové (výchozí) pozice. Ve výchozí pozici je přístroj natočen překladem a ramenem s libelou směrem k pilíři C. Směr na pilíř B (směr osy N) je výchozím směrem pro horizontální i vertikální náklon přístroje.

Osy místního souřadnicového systému NEU byly zvoleny tak, aby odpovídaly směru pohybu přístroje. Kladný směr otáčení je ve směru chodu hodinových ručiček při pohledu shora na polohovací rameno ve výchozí poloze. Kladný směr náklonu je realizován v kladném směru osy N z výchozí pozice. Počátečním bodem souřadnicové soustavy byl zvolen vrchol hrotu H2. Schéma měření je patrné z následujícího obrázku 5.2.



Obrázek 5.1 Výchozí pozice



Obrázek 5.2 Schéma měření

### 5.1.2 Problematika signalizace, měřické podmínky

Polohovací rameno bylo umístěno na pilíři A a jeho pohyb byl zaměřen ze dvou navzájem kolmých směrů, z pilířů B a C totálními stanicemi.

Záměrem měření bylo určit prostorovou polohu špičky hrotu H3 při nájezdu ramene do požadovaných pozic, ale v některých pozicích polohovacího ramene není hrot H3 viditelný, a proto musela být zvolena jiná vhodná signalizace.

Pro signalizaci bodu bylo třeba nalézt předmět, nejlépe kulového tvaru o vhodné velikosti na délku záměry 2,5 – 3 metry. Byla vybrána ocelová ložisková kulička o průměru 1 mm. Tato kulička byla nalepena na špendlík s odříznutou hlavičkou. Špendlík byl zapíchnut do dřevěného úchytu, který byl upevněn pod horní překlad přístroje. Úchyt byl vyroben v potřebné výšce, aby byla zajištěna viditelnost i v odlehlých polohách polohovacího ramene.

Dřevěný úchyt byl na přístroj přichycen přibližně ve směru osy N. Do úchytu byly zapíchnuty dva špendlíky, jeden sloužící pro cílení při náklonu v kladném směru a druhý při náklonu v záporném směru. Aby nedošlo k záměně měřených bodů v pozicích, kde jsou viditelné oba špendlíky, byly špendlíky barevně rozlišeny. Náklonu v kladném směru byl přiřazen špendlík růžové barvy a byl označen R+. Zápornému náklonu byl přiřazen špendlík oranžové barvy s označením O-. Umístění dřevěného úchytu na přístroji je vidět na *obrázku 5.4*. Ukázkou barevného rozlišení špendlíků lze vidět na *obrázku 5.3*.



*Obrázek 5.3 Signalizace kladného a záporného náklonu*

Pro zajištění co nejlepších měřických podmínek byl přístroj nasvětlen lampičkou. Pro odstranění rušivých vlivů v pozadí bylo za přístroj nainstalováno bílé projekční plátno, které umožnilo jasnou identifikaci a přesné cílení na signalizaci bodů. Viz následující *obrázek 5.4*.





Obrázek 5.4 Podmínky při měření

### 5.1.3 Měřické přístroje

Měření proběhlo současně dvěma totálními stanicemi Topcon GPT-3003N, v. č. 4D0510 a 4D0513. Jejich technické parametry jsou uvedeny v příloze č. 2.

Mezi základní systematické přístrojové chyby patří kolimační chyba, způsobená nekolmostí záměrné osy dalekohledu k točné ose dalekohledu, a úklonná chyba, která vzniká nekolmostí točné osy dalekohledu na svislou osu přístroje. Obě tyto chyby lze odstranit měřením v obou polohách přístroje. Při zaměření pohybu polohovacího ramene je měření v obou polohách dalekohledu zdlouhavé a neefektivní, a proto byly oběma totálními stanicím vypočteny kompenzační hodnoty pro korekci kolimační a úklonné chyby.

Postup nastavení je následující a vychází z návodu (Geodis Brno s.r.o., 2005):

- Pečlivá horizontace přístroje a protočení dalekohledem.
- Zacílení na bod A ( $\pm 3^\circ$  od horizontu) 5x v první poloze, 5x ve druhé poloze dalekohledu.
- Zacílení na bod B (více než  $10^\circ$  od horizontu) 5x v první poloze, 5x ve druhé poloze dalekohledu.

Následně byly vypočteny kompenzační hodnoty pro kolimační chybu a náklon. Po nastavení kompenzačních hodnot do interní paměti přístroje byla ověřena správnost a funkčnost nastavení pomocí zacílení ve dvou polohách na bod jak v horizontálním, tak ve vertikálním směru. Ani v jednom případě nebyl překročen součet obou poloh o více

jak střední chybu úhlu přístroje. Přístroje bylo možno považovat za správně nastavené a mohlo proběhnout následné měření pouze v jedné poloze přístroje, bez ztráty přesnosti měření.

#### 5.1.4 Měření veličiny a postup měření

Na začátku měření byla provedena vzájemná orientace mezi stanovisky, která byla realizována vzájemným cílením na středy kolimátorů totálních stanic. Zaměření bylo provedeno vždy dvojím cílením na začátku i na konci měření. Dále byla dvojím cílením zaměřena špička hrotu H2, která byla zvolena za počátek místní souřadnicové soustavy NEU, zaměření bylo provedeno opět na začátku i na konci měření.

Poté následovalo zaměření špičky hrotu H3 a signalizačních kuliček (špendlíků) R+ a O- ve výchozí pozici přístroje. Po zaměření základní trojice bodů byly zaměřeny všechny ostatní pozice dle sestaveného programu.

Program pro ovládání přístroje byl sestaven tak, aby zajišťoval rovnoměrné rozmístění pozic polohovacího ramene, přičemž polohovací rameno vždy setrvává 10 s v klidové pozici a v ten okamžik je zaměřeno. Pohyb polohovacího ramene byl připraven ve formě G-kódů v programu LinuxCNC, více o programu v (Linux, 2012).

Přístroj byl ve vertikálním směru nakláněn z výchozí (nulové) pozice do kladného a záporného náklonu  $[90^\circ, 60^\circ, 30^\circ, -30^\circ, -60^\circ, -90^\circ]$ . V následujících vertikálních pozicích  $[-90^\circ, -60^\circ, 60^\circ, 90^\circ]$  bylo měřeno v horizontálním intervalu  $\langle -180^\circ, 180^\circ \rangle$  v kroku po  $30^\circ$ . Ve vertikálních pozicích  $[-30^\circ, 30^\circ]$  bylo měřeno v kroku  $45^\circ$ .

Nejprve byly zaměřeny všechny pozice polohovacího ramene v záporném náklonu (O-), poté byly zaměřeny všechny pozice v kladném náklonu (R+). Pro kontrolu určení souřadnic a ověření nájezdu polohovacího ramene do stejné pozice ze dvou směrů byly všechny pozice v obou náklonech zaměřeny ještě jednou při pohybu zpět. Na závěr měření byla opětovně zaměřena trojice základních bodů ve výchozí poloze.

Všechny body byly registrovány a označeny příslušným kódem dle zaměřovaného bodu (H2, H3, R, O). Současně s horizontálními úhly byly registrovány i úhly zenitové, které následně sloužily k trigonometrickému určení výšky U příslušného bodu.

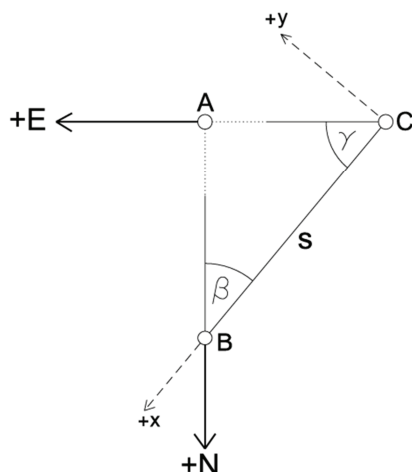
## 5.2 Výpočet polohy pozic hrotu H3

Tato kapitola popisuje postup výpočtu zaměřených bodů. Nejprve je popsáno určení souřadnic a výšek signalizačních bodů (špendlíků) ve zvolené souřadnicové soustavě NEU a poté jejich přepočtení pomocí definovaných rotačních matic na polohu bodu H3. Na závěr kapitoly jsou uvedena porovnání získaných výsledků z dvojího zaměření daných pozic a je určena přesnost výsledných bodů.



### 5.2.1 Určení souřadnic signalizačních kuliček N, E a jejich výšky U

Pro výpočet souřadnic bodu H2 byla nejprve zvolena pomocná soustava x, y, jejíž počátek je v bodě C, směr osy x vede ve směru na bod B a směr osy y doplňuje pravouhlou soustavu, viz *obrázek 5.5*. Souřadnice bodu H2 byly vypočteny metodou protínání z úhlů. Dále pomocí hrotu H2 byly zpětně vypočteny souřadnice stanovišek B, C v systému NEU.



Obrázek 5.5 Schéma soustav

Vstupními hodnotami do výpočtu souřadnic metodou protínání z úhlů, jsou úhly  $\beta$  a  $\gamma$ . Tyto úhly jsou vypočteny jako rozdíl směru ( $\psi_{B,C}$  nebo  $\psi_{C,B}$ ) na druhé stanoviško a směru na příslušný zaměřovaný bod  $\psi_i$ . Směry  $\psi_{B,C}$ ,  $\psi_{C,B}$  a  $\psi_{H_2}$  byly určeny jako průměr ze 4 měření, dvojího cílení na začátku a na konci měření.

Souřadnice  $N_i, E_i$  zaměřovaných pozic polohovacího ramene signalizované ocelovou kuličkou byly vypočteny následovně:

$$N_i = N_C + s_{B,C} \frac{\sin\beta_i}{\sin(\beta_i+\gamma_i)} \sin\sigma_{Ci},$$

$$E_i = E_C + s_{B,C} \frac{\sin\beta_i}{\sin(\beta_i+\gamma_i)} \cos\sigma_{Ci},$$

kde  $N_C, E_C$  jsou souřadnice stanoviška C,  $s_{B,C}$  je měřená vzdálenost mezi stanovišky,  $\sigma_{Ci} = (\beta_{H_2} + \gamma_i)$  je směrník určovaného bodu,  $\beta_i$  a  $\gamma_i$  jsou příslušné protínací úhly vypočtené dle vzorců:

$$\beta_i = \psi_{B,C} - \psi_{iB}, \quad \gamma_i = 2R - \psi_{C,B} + \psi_{iC}.$$

Dále byly určovány výšky  $U_i$ . Výšky byly určeny zvlášť z obou stanovišek. Pro výšku hrotu H2 byla zvolena konvenční hodnota  $U_{H_2} = 100,0000 \text{ m}$ . Nejprve byla vypočtena výška horizontů totálních stanic a poté byly dopočítány výšky zaměřovaných bodů dle základního trigonometrického vzorce:

$$U_{iC} = H_C + \frac{s_{B,C} \frac{\sin\gamma_i}{\sin(\beta_i+\gamma_i)}}{\text{tgz}_C}, \quad U_{iB} = H_B + \frac{s_{B,C} \frac{\sin\beta_i}{\sin(\beta_i+\gamma_i)}}{\text{tgz}_B},$$

kde  $U_{iC}$ ,  $U_{iB}$  jsou výšky zaměřovaných bodů ze zvoleného stanoviska,  $H_C$ ,  $H_B$  jsou příslušné výšky horizontů totálních stanic,  $\beta_i$  a  $\gamma_i$  jsou příslušné protínací úhly,  $z_C$  a  $z_B$  jsou příslušné měřené zenitové úhly.

Výsledná výška  $U_i$  je určena jako průměr z obou vypočtených výšek.

### 5.2.2 Určení polohy hrotu H3 v NEU

Výše vypočtené souřadnice se vztahují pouze k poloze signalizačních kuliček, avšak cílem zaměření pohybu polohovacího ramene je získání souřadnic špičky hrotu H3. Je zapotřebí provést transformaci souřadnic pomocí rotačních úhlů - natočení  $\alpha_i$  a aktuálního sklonu  $z_i$  polohovacího ramene. Hodnoty aktuálních pozic polohovacího ramene byly získány z předpisu G-kódů pro program LinuxCNC.

Ve výchozí pozici polohovacího ramene, při natočení  $\alpha = 0^\circ$  a naklonění  $z = 0^\circ$ , byly vypočteny vektory rozdílů souřadnic  $\Delta O'$ ,  $\Delta R'$  mezi hrotem H3 a signalizačními kuličkami (O-, R+). Tyto vektory byly transformovány v příslušných pozicích dle náklonu a natočení (Fixel, 2007):

$$\Delta O = R_{M1} \cdot R_{M2} \cdot \Delta O',$$

$$\Delta R = R_{M1} \cdot R_{M2} \cdot \Delta R',$$

$$R_{M1} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_i & \sin\alpha_i & 0 \\ -\sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_{M2} = \begin{bmatrix} \cos z_i & 0 & -\sin z_i \\ 0 & -1 & 0 \\ \sin z_i & 0 & \cos z_i \end{bmatrix},$$

kde  $\alpha_i$  je příslušný úhel natočení v rozsahu  $\langle -180^\circ, 180^\circ \rangle$  a  $z_i$  je příslušný zenitový úhel vyjadřující náklon v rozsahu  $\langle -90^\circ; 90^\circ \rangle$ .

Transformované vektory  $\Delta O$  a  $\Delta R$  jsou odečteny od původních souřadnic, čímž je získána hledaná poloha hrotu H3. Skript pro výpočet polohy signalizačních kuliček a přepočtení na polohu hrotu H3 včetně předpisu G-kódů je uveden v příloze č. 10.

### 5.2.3 Přesnost určení souřadnic

Přesnost výsledných souřadnic byla vypočtena pomocí zákona přenášení středních chyb na množině funkcí, podle (Weigel, 2005). Výpočet vychází z obecného funkčního předpisu:

$$\underline{y} = \underline{f}(\underline{x}^T),$$

kde parametry funkce jsou vstupní (měřené) veličiny:

$$y_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_i(\beta_i, \gamma_i, \beta_{H2}, z_{Ci}, z_{Bi}).$$

Uvažovanými funkcemi jsou:

- funkce pro souřadnici N:

$$f_1: N_i = N_c + s_{B,C} \frac{\sin\beta_i}{\sin(\beta_i + \gamma_i)} \sin(\beta_{H2} + \gamma_i)$$

- funkce pro souřadnici E:

$$f_2: E_i = E_c + s_{B,C} \frac{\sin\beta_i}{\sin(\beta_i + \gamma_i)} \cos(\beta_{H2} + \gamma_i)$$

- funkce pro souřadnici U:

$$f_3: U_i = \frac{H_C + H_B}{2} + \frac{s_{B,C} \frac{\sin\gamma_i}{\sin(\beta_i + \gamma_i)}}{2 \operatorname{tg} z_{Ci}} + \frac{s_{B,C} \frac{\sin\beta_i}{\sin(\beta_i + \gamma_i)}}{2 \operatorname{tg} z_{Bi}}.$$

Střední chyby určených souřadnic získáme z kovarianční matice výsledných funkčních hodnot  $\underline{C}_{yy}$ , na jejíž diagonále jsou kvadráty středních chyb určených funkcí:

$$\underline{C}_{yy} = \underline{F} \cdot \underline{M} \cdot \underline{F}^T,$$

matice  $\underline{F}$  je maticí parciálních derivací uvedených funkcí podle funkčních hodnot. Příslušné derivace jsou uvedené v příloze č. 11, struktura matice  $\underline{F}$  je následující:

$$\underline{F} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \beta_i} & \frac{\partial f_1}{\partial \gamma_i} & \frac{\partial f_1}{\partial \beta_{H2}} & \frac{\partial f_1}{\partial z_{Ci}} & \frac{\partial f_1}{\partial z_{Bi}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \beta_i} & \frac{\partial f_2}{\partial \gamma_i} & \frac{\partial f_2}{\partial \beta_{H2}} & \frac{\partial f_2}{\partial z_{Ci}} & \frac{\partial f_2}{\partial z_{Bi}} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \beta_i} & \frac{\partial f_3}{\partial \gamma_i} & \frac{\partial f_3}{\partial \beta_{H2}} & \frac{\partial f_3}{\partial z_{Ci}} & \frac{\partial f_3}{\partial z_{Bi}} \end{pmatrix}.$$

Matice  $\underline{M}$  je diagonální maticí přesností vstupních hodnot měření:

$$\underline{M} = \begin{pmatrix} m_\omega^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_\omega^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{m_\omega}{\sqrt{4}}\right)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_\omega^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_\omega^2 \end{pmatrix},$$

kde střední chyba měření úhlu je  $m_\omega = 18^{cc}$ . Přesnost zaměření úhlu byla získána testovacím měřením, směr na signalizační kuličku byl zaměřen 20x a přesnost byla určena ve formě střední výběrové chyby jednoho směru, z čeho byla následně odvozena přesnost zaměřovaného úhlu. Přesnost zaměřeného úhlu  $\beta_{H2}$  je podělena  $\sqrt{4}$ , protože úhel  $\beta_{H2}$  je určen průměrem ze 4 měření.

Přesnost souřadnic byla vypočtena pro všechny měřené veličiny (výchozí pozici a pozice polohovacího ramene při pohybu). Výsledná přesnost souřadnic je určena jako kvadratický průměr všech dosažených přesností. Výpočty byly provedeny v programu Matlab R2011b, skript výpočtu je uveden v příloze č. 12. Střední chyby souřadnic a výšky jsou následující:

$$m_N = m_E = 0,13mm,$$

$$m_U = 0,08mm.$$

### 5.3 Zkoumání pohybu

Z provedeného měření lze získat základní informaci o pohybu polohovacího ramene. Základní informací je posouzení, zdali se polohovací rameno vrátí do stejné polohy nezávisle na směru nájezdu u obou os motorů. Určován byl především rozdíl v nájezdech při otáčení kolem osy M1. Dále lze ověřit některé definované parametry – míru mimoběžnosti  $m$  a spolupůsobení excentricity  $e_2$  s náklonem způsobeným úhlem sevření  $\omega_1$ .

#### 5.3.1 Vliv nájezdu

Při zpracování dat byly nejprve mezi sebou porovnány pozice polohovacího ramene ve stejném náklonu při nájezdu z kladného a záporného směru. Vzniklé odchylky souřadnic N, E mohou být způsobeny nepřesností cílení na střed signalizační kuličky a nájezdem polohovací ramene do stejné polohy ze dvou směrů.

Pro každý zaměřený bod byl vypočten příslušný směrník. Poté byl vypočten úhel  $\Delta\alpha_i$ , jako rozdíl směrníků při nájezdu 'zprava-zleva' (pohyb zprava odpovídá pohybu polohovacího ramene z polohy  $-180^\circ$  do polohy  $+180^\circ$ , pohyb zleva je opačný).

Dále byl vypočten průměrný úhel rozdílného nájezdu  $\Delta\alpha$  zvlášť pro záporný a kladný náklon. Z výpočtu byly vyloučeny pozice  $-180^\circ$  a  $+180^\circ$ , jelikož jde o koncové pozice, do kterých nelze provést nájezd z opačné strany. Velikost tohoto úhlu byla přepočtena na příčnou odchylku  $q$  pro nejbližší polohu H3 od středu soustavy ( $s = 0,166$  m).

Jelikož vliv cílení byl zohledněn ve výpočtu středních chyb souřadnic, jsou dosažené příčné odchylky porovnávány s mezní chybou určení rozdílu souřadnic ze dvou poloh:

$$\delta_q = m_{N,E} \cdot \sqrt{2} \cdot t = 0,13 \cdot \sqrt{2} \cdot 2 = 0,37 \text{ mm}.$$

Provedené výpočty jsou uvedeny v příloze č. 13. Dosažené průměrné odchylky pro záporný (O-) a kladný (R+) náklon jsou:

$$q_{(O-)} = -0,15mm < \delta_q,$$

$$q_{(R+)} = -0,10mm < \delta_q.$$

Vliv nájezdu 'zprava a zleva' při nastavení polohovacího ramene do požadované pozice nebyl v rámci přesnosti měření prokázán. V dalších výpočtech byly použity souřadnice zprůměrované ze dvou protisměrných nájezdů polohovacího ramene při stejném náklonu nosných ramen.

### 5.3.2 Ověření některých geometrických parametrů

Při ověřování geometrických parametrů byly porovnány totožné pozice, kdy se bod nachází ve stejném místě při opačném náklonu a natočení přístroje. Totožnými polohami jsou např. pozice polohovacího ramene  $[60^\circ, -90^\circ]$  a  $[-120^\circ, 90^\circ]$ . Souřadnice navzájem si odpovídajících poloh s vypočtenými rozdíly v souřadnicích jsou uvedeny v příloze č. 14. Již při prvním pohledu na uvedenou tabulku ze sloupce  $\Delta U$  (rozdíl výšek při různých náklonech) lze vypočítat, že přístroj se v rámci přesnosti měření pohybuje v jedné výškové úrovni.

Vzdálenost  $m$  os motorů M1 a M2 lze při pohybu polohovacího ramene určit jako rozdíl vzdáleností aktuální polohy hrotu H3 od středu soustavy. Vypočtený rozdíl je dvojnásobkem ověřované vzdálenosti  $m$ . Výsledná hodnota byla určena jako průměr z 35 dvojic totožných pozic polohovacího ramene aritmetickým průměrem, viz příloha č. 15.

$$m_{\text{ověřená}} = -0,03 \text{ mm}$$

Z vypočtené hodnoty je patrné, že osa motoru M1 se ve výchozí pozici přístroje nachází před osou motoru M2. Získaná hodnota ověřuje hodnotu geometrického parametru  $m = -0,04 \text{ mm}$  určenou v kapitole 4.2.

Dalším ověřovaným parametrem je excentricita  $e_2$  hrotu H3 od osy motoru M1. Hodnota excentricity byla v rámci ověření určena z totožných poloh pouze v náklonu  $\pm 90^\circ$ . Byla zde určována příčná odchylka obdobným postupem jako při určování vlivu nájezdu z úhlu  $\Delta\alpha$ . Avšak zde ve výpočtech nebyla pro určení příčné odchylky zvolena konstantní délka, ale byly použity příslušné vzdálenosti bodů od středu soustavy. Excentricita byla vypočtena jako průměr ze 13 poloh, viz příloha č. 16.

Vypočtená hodnota excentricity bez vlivu náklonu je  $e'_{2\text{ověřená}} = -0,38 \text{ mm}$ . Pokud by byl započítán i vliv náklonu, který pro daný sklon činí 0,17 mm, měla by být získána excentricita rovna  $e_{2\text{ověřená}} = -0,55 \text{ mm}$ . Při porovnání hodnoty ověřené excentricity od excentricity určené v kapitole 4.3  $e_2 = -0,42 \text{ mm}$ , lze tvrdit, že parametr byl v rámci přesnosti měření ověřen.

## 6. Model pohybu

Při zpracování měření kalibrací antén bude potřeba znát pozici nakloněné a natočené antény (polohu ARPu). Právě pro tento účel byly určovány geometrické parametry polohovacího ramene, které jsou definovány v kapitole 3.2 a jejich hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Určené geometrické parametry jsou použity v následujícím matematickém modelu, který popisuje pohyb přístroje:

$$\begin{bmatrix} N \\ E \\ U \end{bmatrix}_{ARP} = \begin{bmatrix} -e_{1N} \\ -e_{1E} \\ k + h \end{bmatrix} + R_{M1} \left( \begin{bmatrix} m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + R_{M2} R_{\omega_1} \begin{bmatrix} 0 \\ e_2 - (d - h - j)(\omega_1 - R)/\rho \\ d - h - j \end{bmatrix} \right)$$

Model pohybu se skládá ze tří základních částí. První část znázorňuje posun celé soustavy od počátku vztahné soustavy v bodě H2 do středu upnutí polohovacího ramene na pilíři H1 a vztahuje výšku ke středu osy motoru M2.

Druhá část zohledňuje mimoběžnost motoru M2 od osy motoru M1. Realizuje tedy posun pohyblivé části přístroje v závislosti na natočení přístroje kolem osy M1. Natočení je realizováno rotační maticí  $R_{M1}$ , která odpovídá otočení přístroje kolem osy U. Tvar rotační matice je uveden v kapitole 5.2.2.

Třetí část bere v potaz pohyb nosných ramen, který je výškově vztažen k vrchní rovině horního překladu. Složka E vyjadřuje čistý posun hrotu H3 bez vlivu náklonu. Parametry jsou přepočteny rotačními maticemi podle aktuálního natočení kolem osy motoru M1 (matice  $R_{M1}$ ), natočení kolem osy motoru M2 je realizováno maticí  $R_{M2}$ , jejíž tvar je uveden také v kapitole 5.2.2. Do výsledné polohy ARPu je zaveden i náklon osy motoru M2 pomocí matice  $R_{\omega_1}$  jejíž tvar je:

$$R_{\omega_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega_1 - R) & \sin(\omega_1 - R) \\ 0 & -\sin(\omega_1 - R) & \cos(\omega_1 - R) \end{bmatrix}.$$

Vstupními hodnotami do výpočtu aktuální polohy ARPu jsou určené parametry polohovacího ramene a příslušné úhly natočení  $\alpha_i$  a naklonění  $z_i$ . Skript pro výpočet aktuální polohy je uveden v příloze č. 17.

## 7. Závěr

V úvodní části se práce věnuje základní problematice kalibrací GNSS antén, popisuje účel kalibrací a seznamuje se dvěma základními přístupy ke kalibracím. Věnuje se již existujícímu zařízení v německé společnosti Geo++ a poukazuje na vlivy, které s absolutní kalibrací úzce souvisejí.

Další dvě kapitoly jsou věnovány zařízení vyvíjenému na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě stavební, Ústavu geodézie. Zařízení pro anténní absolutní kalibraci se skládá z polohovacího ramene a z řídicí jednotky. Práce se zabývá popisem polohovacího ramene, definuje jeho geometrické parametry a popisuje činnosti při sestavování přístroje, jejichž účelem bylo dosažení ideálního stavu definovaných geometrických parametrů. Dále popisuje metody zaměření a určení geometrických parametrů.

Následující kapitola popisuje alternativní metodu zaměření přístroje, kdy byl nezávislou metodou zaměřen pohyb přístroje v předem stanovených pozicích. Kapitola se věnuje popisu metody zaměření, výpočtu poloh určovaného bodu a úzce souvisí s problematikou signalizace zaměřovaného bodu. Stanovuje přesnost určených souřadnic v lokální topocentrické soustavě NEU, zkoumá pohyb přístroje a popisuje možnost ověření některých geometrických parametrů.

V závěru práce je uveden a popsán matematický model pohybu polohovacího ramene. Pomocí modelu pohybu je možno vypočítat aktuální polohu anténního referenčního bodu pro požadovaný náklon a natočení polohovacího ramene v systému NEU, přičemž v modelu pohybu jsou zohledněny určené geometrické parametry.



## 8. Seznam literatury

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](http://www.ngs.noaa.gov/CORS/Articles/Bilich-and-Mader_ION2010.pdf)

FIXEL, J., MACHOTKA, R. (2007) *Geodetická astronomie a kosmická geodézie I*. Modul 01 - Sférická astronomie, studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, Brno, 2007.

GEODIS BRNO, s.r.o., (2005) *Elektronická pulsní totální stanice. Řada GPT 3000N - GPT 3007N*. Návod na použití, Květen 2005, Brno.

KALINA, M., KRATOCHVÍL, R., KURUC, M., VOLAŘÍK, T. (2013) *Polohovací zařízení pro kalibraci GNSS antén*. Juniorstav 2013, Brno.

KARBAN, P., (2006) *Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink*. Brno: Computer Press, a.s., první vydání, Brno, 2006. ISBN 80-251-1301-9.

LINUX (2012) *LinuxCNC User Manual V2.5*, verze 2012-08-25.

Dostupné z [http://linuxcnc.org/docs/2.5/pdf/LinuxCNC\\_User\\_Manual.pdf](http://linuxcnc.org/docs/2.5/pdf/LinuxCNC_User_Manual.pdf)

NEVOSÁD, Z., VITÁSEK, J., BUREŠ, J. (2002) *Geodézie IV – Souřadnicové výpočty*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., prosinec, 2002. ISBN 80-214-2301-3.

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.

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](http://geopp.de/media/docs/pdf/gpp_gnss08_antenna_fxa.pdf)

ŠVÁBENSKÝ, O., FIXEL, J., WEIGEL, J. (1995) *Základy GPS a jeho praktické aplikace*. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, 1995. str. 38. ISBN 80-214-0620-8.

ŠVÁBENSKÝ, O., VITULA, A., BUREŠ, J., (2006) *Inženýrská geodézie I*. Modul 03 – Návodů ke cvičením, studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, Brno, 2006.



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. Užité vzor, CZ 25325 U1. 2013-06-05. Dostupné také z: <http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0025/uv025325.pdf>

WEIGEL, J., (2005) *Teorie chyb a vyrovnávací počet I*. Modul 01 – Měřické chyby, studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, Brno, 2005.

WÜBBENA, G., MENGE, F., SCHMITZ, M., SEEGER, 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., SEEGER, 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](http://geopp.de/download/Ion2000_presented_at.pdf)

WÜBBENA, G., SCHMITZ, M., BOETTCHER, G., SCHUMANN, C. (2006) *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](http://geopp.de/media/docs/pdf/gppigs06_pnf_g.pdf)

## 9. Seznam zkratk

APC	Fázové centrum antény
ARP	Anténní referenční bod
GNSS	Globální navigační družicové systémy
NEU	Lokální topocentrická soustava North – East – Up
PCO	Offset fázového centra
PCV	Variace fázového centra
PSM	Součtová konstanta hranolu
StAnCa	Polohovací zařízení (Station Antenna Calibration)

## 10. Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 2.1 Anténní rámeček (Wübbena, 2000) - upraveno .....	11
Obrázek 2.2 Robot v Geo++ (Wübbena, 2000).....	13
Obrázek 2.3 Statická observace (Wübbena, 2000).....	14
Obrázek 2.4 Staniční absolutní kalibrace (Wübbena, 2000) .....	14
Obrázek 2.5 Směrodatná odchylka určení PCV (Wübbena, 2000) .....	15
Obrázek 2.6 Odchylky nezávisle určeného PCV (Wübbena, 2000).....	16
Obrázek 2.7 PCV závislé na azimutu (Wübbena, 2000) .....	16
Obrázek 2.8 PCV závislé na azimutu bez ostatních vlivů (Wübbena, 2000).....	17
Obrázek 2.9 Vliv groundplane (Wübbena, 2000).....	17
Obrázek 2.10 Vliv konstrukce antény (Wübbena, 2000).....	18
Obrázek 3.1 StAnCa – polohovací rameno .....	19
Obrázek 3.2 Přední pohled.....	20
Obrázek 3.3 Horní pohled.....	20
Obrázek 3.4 Signalizační hrot.....	21
Obrázek 3.5 Zákres základních geometrických parametrů.....	22
Obrázek 4.1 Schéma použitých pilířů .....	25
Obrázek 4.2 Orientace souřadné soustavy .....	25
Obrázek 4.3 Signalizační terčik .....	26
Obrázek 4.4 Vyobrazení excentricit .....	28
Obrázek 4.5 Vyznačení excentricity $e_1$ .....	28
Obrázek 4.6 Grafické vyobrazení geometrických parametrů .....	30
Obrázek 4.7 Poloha p.....	31
Obrázek 5.1 Výchozí pozice .....	32
Obrázek 5.2 Schéma měření .....	32
Obrázek 5.3 Signalizace kladného a záporného náklonu .....	33
Obrázek 5.4 Podmínky při měření .....	34
Obrázek 5.5 Schéma soustav .....	36
Tabulka 4.1 Hodnoty geometrických parametrů .....	30

## 11. Seznam příloh

Příloha č. 1 Určení citlivosti libel

Příloha č. 2 Technické parametry použitých přístrojů

Příloha č. 3 Určení součtové konstanty hranolu, zaměření délek

Příloha č. 4 Zaměření a určení parametrů  $\omega_1, h$

Příloha č. 5 Určení vzdálenosti os motorů M1 a M2 ( $m$ )

Příloha č. 6 Určení excentricit  $e_1, e_2$

Příloha č. 7 Určení parametrů  $d, \omega_2, \omega_3$

Příloha č. 8 Určení polohy  $p$  a převýšení  $k$

Příloha č. 9 Určení převýšení  $j$

Příloha č. 10 Zápisník měřených dat, předpis G-kódů, skript výpočtu polohy H3

Příloha č. 11 Parciální derivace matice F

Příloha č. 12 Skript k výpočtu přesnosti souřadnic a výšky

Příloha č. 13 Ověření nájezdu

Příloha č. 14 Souřadnice bodů a odchylky dvojího zaměření

Příloha č. 15 Ověření vzdálenosti os motorů  $m$

Příloha č. 16 Ověření excentricity  $e_2$

Příloha č. 17 Skript výpočtu modelu pohybu