

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra měření



Stabilizovaný tříosý cívkový systém pro kalibrace magnetometru

Stabilized Triaxial Coil System for Magnetometer Calibrations

Diplomová práce

Praha, 2019

Michal Dressler

Abstrakt

Obsahem diplomové práce je návrh a vývoj systému umožňující provádění kalibrací zejména tříosých senzorů magnetického pole pomocí existujících cívkových systémů v přítomnosti magnetických variací a rušení nejen v podmínkách školní laboratoře. Originální řešení problému kompenzace rušení využívá, oproti jiným systémům, referenční magnetometr umístěný blízko cívek. Z toho plyne i nutná modifikace postupů cívkové kalibrace, kdy s navrhovaným systémem nelze vytvářet absolutně známé vektory magnetického pole, z důvodu přítomnosti stálé složky Zemského magnetického pole.

Součástí práce je úvod do standardních metod pro kalibrace, vývoj systému kompenzace rušení, vývoj modifikované cívkové kalibrace s využitím relativních skoků a především vyhodnocení výsledků včetně sady provedených měření pro ověření dříve získaných parametrů existujícího cívkového systému a použitých magnetometrů. Práce navíc obsahuje postup a implementaci využití výsledků vektorové kalibrace k získání vzájemné orientace vnitřního a vnějšího souřadného systému magnetometrů.

Klíčová slova

magnetometr, tříosé kalibrace, variace pole, kompenzace variací, úplná kalibrace vychýlení

Abstract

The goal of this diploma thesis is design and development of system enabling calibrations of in particular tri-axial magnetic sensors in the presence of magnetic field variations and disturbances in an environment of a school laboratory, using existing coil systems. A novel method for disturbance canceling uses opposed to conventional methods, reference magnetometer situated closely to the coil system. It follows necessary modification of the vectorial coil calibration method since the proposed system cannot create truly known arbitrary vectors of a magnetic field, due to the presence of Earth magnetic field baseline.

The thesis describes standard methods used for calibration, development of disturbance canceling system, modified calibration method using relative field steps and primarily evaluates of results including set of conducted measurements needed to verification of previously known coil system calibration coefficients and parameters of used magnetometers itself. In addition to basic calibration, a separate method for obtaining sensor-frame to body-frame misalignment is described and implemented.

Keywords

magnetometer, tri-axial calibration, field variations, variations cancelling, misalignment calibration

Čestné prohlášení autora práce

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

Podpis autora práce

Poděkování

Na úvod bych chtěl velice poděkovat vedoucímu práce panu Michalu Janoškovi, Ph.D. za věcné připomínky a rady během konzultací a zejména za velkou trpělivost projevenou během finalizace textu této práce. Mimo to děkuji panu Vojtěchu Petruchovi, Ph.D., který je hlavním autorem použitých tříosých cívek, za další nejen odborné rady a hlavně za provedení skalární kalibrace testovaných magnetometrů, bez níž by této práci chyběl podstatný kus reference k porovnání výsledků. V neposlední řadě děkuji také panu docentu Antonínu Platilovi za neméně důležité připomínky a umožnění provádění měření do pozdních odpoledních hodin.

Dále děkuji zbytku skupiny magnetických měření a jmenovitě pak kolegům Andreyi Chirtsovovi, Lukáši Pavelkovi a Davidu Novotnému za spolupráci nejen v týmovém projektu. Děkuji také katedře měření za finanční podporu a možnost pracovat i na dalších projektech skupiny MAGLAB.

V poslední řadě děkuji své rodině a přátelům za průběžnou motivaci k dalšímu studiu.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dressler** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **434809**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Studijní obor: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Stabilizovaný tříosý cívkový systém pro kalibrace magnetometru

Název diplomové práce anglicky:

Stabilized Triaxial Coil System for Magnetometer Calibrations

Pokyny pro vypracování:

Sestavte SW a HW pro stabilizaci magnetických variací a rušení během kalibrací magnetických senzorů - systém bude využitelný i v prostorách laboratoří na ČVUT FEL. Využijte existující proudové zdroje a tříosé kalibrační cívky. Vyhodnoťte úroveň potlačení rušení a dosažitelnou nejistotu kalibrace magnetometru v rozsahu +/- 100 uT. Implementujte a vyhodnoťte vhodnost metody "thin-shell".

Seznam doporučené literatury:

- [1] OLSEN, Nils, et al.: In-Flight Calibration Methods Used For The Orsted Mission. Technical University of Denmark, 2001
- [2] Zikmund, A.: Magnetic calibration by using non-linear optimization method. Disertační práce, ČVUT FEL, 2014
- [3] Brauer, P., et al.: Magnetic calibration of vector magnetometers: linearity, thermal effects and stability. In: Workshop on Calibration of Space-Borne Magnetometers, TU-Braunschweig, 1999
- [4] Petrucha, V.: Kalibrace vybraných senzorů pro aplikaci ve vesmíru. Disertační práce, ČVUT FEL, 2012
- [5] Včelák, J. Application of magnetic sensors for navigation systems. Shaker Verlag, 2009.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Michal Janošek, Ph.D., katedra měření

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **12.02.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce:

do konce letního semestru 2019/2020

Ing. Michal Janošek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Obsah

1	Teoretický úvod a rozbor používaných řešení.....	1
1.1	Zemské magnetické pole a observatoře	1
1.2	Model magnetometru a souřadnicové systémy	2
1.3	Postupná kalibrace senzorů magnetometru	4
1.4	Manuální obecná kalibrace s teodolitem	5
1.5	<i>Thin shell</i> kalibrace	6
1.6	Skalární kalibrace.....	7
1.7	Vektorová cívková kalibrace	10
1.8	Znamé metody řízení pole uvnitř cívkového systému.....	12
1.9	Úplná kalibrace magnetometru	16
1.9.1	V zemském magnetickém poli.....	16
1.9.2	V cívkových systémech	18
2	Návrh vlastního kalibračního systému s kompenzací rušení.....	20
2.1	Relativní skoky magnetického pole	21
2.2	Použitý hardware.....	23
2.2.1	Proudový zdroj MAGLAB	23
2.2.2	Dostupné cívkové systémy a jejich umístění.....	26
2.3	Charakteristika rušení v laboratoři T2:F1-17	29
2.3.1	Parametry použitých magnetometrů	32
2.3.2	Filtrace digitálních dat z magnetometrů	33
2.4	Kompenzace rušení MP blízkým referenčním magnetometrem	34
2.4.1	Ideální kompenzace.....	36
2.5	Odhad reálných limitů kompenzace a diskuze vlivu na nejistotu	38
2.5.1	Vliv zpoždění kompenzace	42
2.5.2	Vliv nevykompenzovatelných rušení na výběrová rozdělení	44
2.5.3	Důsledky nedokonalosti kompenzace na nejistotu měření různých vektorů pole	45
2.6	Odvození kalibrace v cívkách pro úplnou kalibraci v netriviálním případě	46
3	Realizace software.....	48
3.1.1	Modul provádění (<i>thin-shell</i>) kalibrace	50
3.1.2	Modul řízení proudového zdroje s kompenzací rušení	51
3.1.3	Modul zpracování hrubých dat z magnetometrů.....	53
3.2	Návrh syntetických cívek	54
3.2.1	Bez započtení nehomogenity:	54
3.2.2	Se započtením nehomogenity z ANSYS:	54
4	Díličí výsledky a měření	55

4.1	Úspěšnost samotné kompenzace (stabilizace magnetického pole).....	55
4.2	Vliv gradientu magnetického pole.....	58
4.3	Lineární metoda kalibrace s kompenzací	59
4.3.1	Lineární kalibrace z publikace [34]	59
4.3.2	Kalibrace s novým software	62
4.4	Rychlá <i>thin-shell</i> kalibrace bez kompenzace	64
4.5	Homogenita cívek jak zdroj majoritní chyby kalibrací.....	69
4.6	Ověření úhlových kalibrací přímým měřením	70
4.6.1	Měření s teodolitem.....	70
4.6.2	Syntetické cívky – ověření vlivu nehomogenit	72
4.7	Ověření jednotlivých citlivostí senzorů rychlou lineární kalibrací.....	73
4.8	Snaha o získání cívkových neortogonalit pomocí pseudoskalární kalibrace	74
4.9	Ověření metody pro nalezení vzájemné orientace	75
5	Vyhodnocení výsledků a budoucí úpravy	77
5.1	Samotná kompenzace rušení	77
5.2	Vyhodnocení nejistot kalibrací	78
5.2.1	Nejistoty typu A.....	78
5.2.2	Nejistoty typu B	79
5.3	Budoucí úpravy a další kroky	80
6	Závěr	81
7	Citované zdroje.....	82
8	Tabulky	84
9	Obrázky.....	84

Obsahem mé diplomové práce je popis návrhu a realizace HW a SW částí systému stabilizující rušení magnetického pole využitelného během následných kalibrací senzorů magnetického pole a implementace základních postupů samotné kalibrace. Primárním cílem je odladění na cívkovém systému MAGLAB ve školní laboratoři v Dejvicích, s možností následného budoucího přenesení do pracoviště v Průhonicích. Navíc oproti zadání je uveden rozbor provádění úplné kalibrace magnetometru, jejíž možnost vyplula na povrch v průběhu implementace cívkové kalibrace.

V úvodní kapitole stručně popisuji problematiku měření zemského magnetického pole a uvádím základní metody pro kalibraci tříosých magnetometrů, zejména ty, které jsou používány přímo magnetickou skupinou MAGLAB při Katedře měření FEL ČVUT. Většina těchto metod již byla v minulosti popsána v mnoha odborných publikacích a diplomových resp. disertačních pracích, na tyto se snažím navázat a při výkladu těchto metod se tak omezím pouze na stručný popis nutný pro uvedení do problematiky a pochopení požadavků kladených na kalibrační systém. Také uvedu obecně používané metody řízení kalibračních cívkových systémů vzhledem ke zvláštním požadavkům vyplývajících z umístění systému.

Ve druhé kapitole popisuji hlavní myšlenku navrhované metody kompenzace rušení a způsobu provádění kalibrace pomocí relativních skoků v takto kompenzovaném systému. Dále udávám přehled použitého hardware s popisem jeho vývoje a aplikací. Na to navazuji návrhem metody pro úplnou kalibraci magnetometru bez nutnosti použití specializovaných zaměřovacích přístrojů. Součástí kapitoly je i počáteční rozbor posouzení úspěšnosti kompenzace a určení teoretických limitů při očekávatelných nedokonalostech kompenzačního systému, včetně pokusu o identifikaci hlavních zdrojů rušení.

Na začátku třetí kapitoly nejdříve shrnuji a popisuji implementované podprogramy nutné jak pro samotnou kompenzaci rušení, tak i pro provádění kalibrační sekvence, včetně skriptu pro následné zpracování dat. Během vývoje vzniklo i několik verzí skriptů pro vytváření simulovaných dat kalibrací vzhledem k možnostem testování vlivu rušení v datech a hlavně k testování vlivu nehomogenity cívek na výsledek kalibrace.

Čtvrtá kapitola obsahuje výsledky dílčích částí kompenzace, výsledky kompenzované jednoosé kalibrace, a pak zvláště výsledky rychlé nekompenzované tříosé *thin-shell* kalibrace v laboratorních cívkách. Kvůli nehomogenitě těchto cívek jsem provedl sadu měření pro ověření výsledků kalibrace, s uvážením nejistoty kalibračních cívkových konstant a konstant citlivosti použitých magnetometrů.

Závěrečná kapitola shrnuje dílčí výsledky, upravuje dříve představený rozpočet nejistot a diskutuje budoucí možné úpravy pro vylepšení samotné kompenzace rušení a také pro další snížení nejistot výsledků kalibrace.

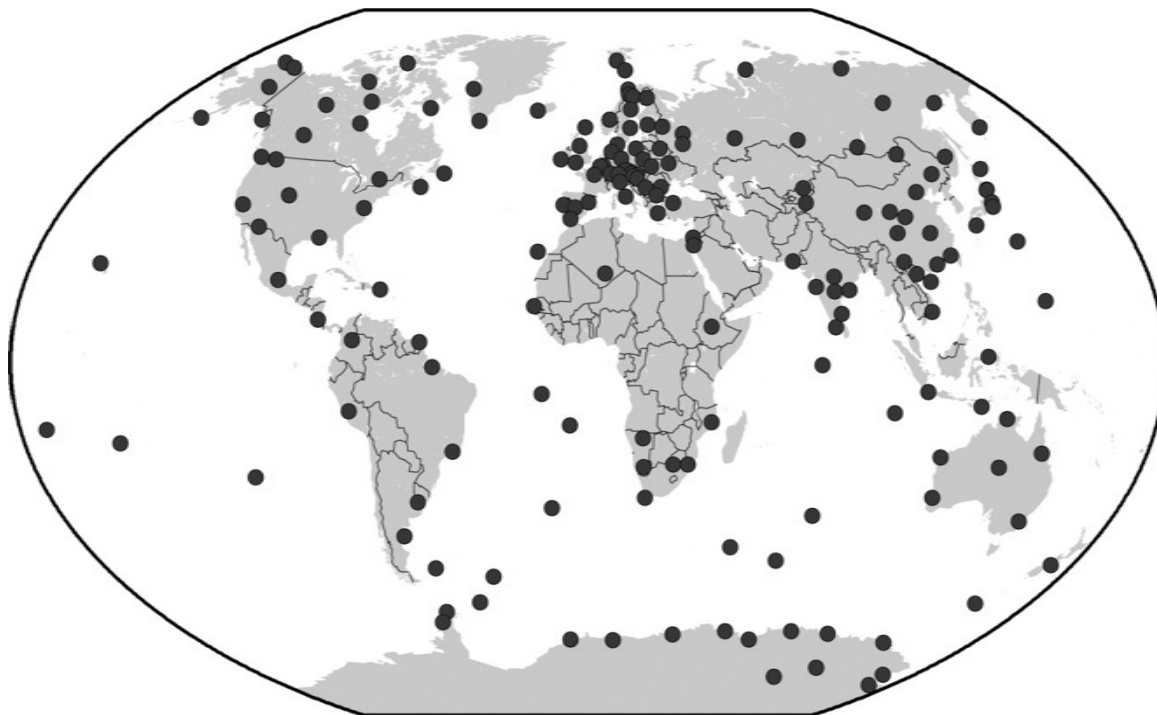
1 Teoretický úvod a rozbor používaných řešení

Hlavním zájmem je kalibrace pomalých observatorních magnetometrů používaných při měření zemského magnetického pole (ZMP). Z toho vyplynou hlavní požadavky na kalibrační postupy, jako jsou rychlost měření a přesnost kalibrace.

1.1 Zemské magnetické pole a observatoře

ZMP má dipólový charakter a jeho intenzita se v závislosti na poloze na planetě pohybuje v rozsahu 25-65 μT . Kromě vlastní polohy jsou rozdílné intenzity zapříčiněny také různým složením geologického podloží. Zdroje variací ZMP a rušení se dělí převážně z časového hlediska. Na jedné straně jsou dlouhodobé variace způsobené změnami v samotném zemském jádře a na druhé krátkodobé variace. Někdy se dále dělí na diurnální variace způsobené elektrickými proudy v ionosféře na Sluncem ozářené straně planety a na magnetické bouře způsobené změnami v magnetosféře vlivem Slunečního větru. Mezi (antropogenní) rušení se pak obecně řadí vliv blízkých elektrických rozvodů, elektrická trakce, ale také změny způsobené přesunem blízkých zmagetovaných a feromagnetických předmětů. Kromě velikosti intenzity ZMP se pozoruje jeho deklinace, inklinace, ale také třeba posuv magnetických pólů.

Magnetické observatoře sledují a zaznamenávají tyto změny v současné době zejména pomocí vektorových *fluxgate* magnetometrů a rezonančních skalárních magnetometrů. Typická magnetická observatoř se nachází v magneticky klidné lokalitě s homogenním polem a sestává z vzdáleností oddělených nemagnetických budov pro absolutní a variační měření z důvodu přísných požadavků na minimální vzájemné rušení mezi přístroji. Organizace INTERMAGNET sdružuje více než 100 observatoří po celém světě a poskytuje tyto zaznamenávané údaje ať už v podobě sekundových či minutových záznamů nebo ročenek pro další vědecké účely [1].



Obr. 1-1 Rozmístění magnetických observatoří INTERMAGNET [převzato [2]]

1.2 Model magnetometru a souřadnicové systémy

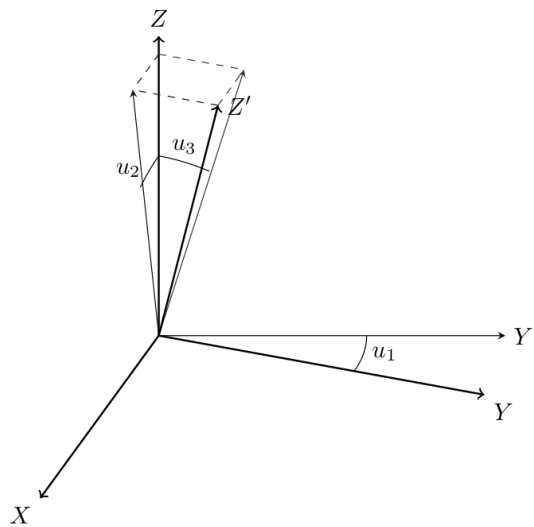
Vektorové magnetometry jsou typicky sestaveny ze třech samostatných senzorů a kromě jejich citlivostí a offsetů tak model magnetometru musí obsahovat i chybu ortogonalit mezi jeho jednotlivými osami, které je nutné korigovat kalibrací. Měřené magnetické pole (MP) pak lze v nejjednodušším lineárním případě popsat vztahem:

$$[b_{\text{mag}X} \ b_{\text{mag}Y} \ b_{\text{mag}Z}]^T = \mathbf{b}_{\text{mag}} = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{S}^{-1}(\mathbf{e}_{\text{mag}} - \mathbf{b}_o), \quad (1-1)$$

kde \mathbf{S} je diagonální matice s prvky citlivosti jednotlivých os senzorů S_i , vektor \mathbf{b}_o představuje sloupcový vektor offsetů senzorů a matice \mathbf{P} transformační matici jejich neortogonalit. Vektor bezrozměrného výstupu magnetometru je $[e_{\text{mag}X} \ e_{\text{mag}Y} \ e_{\text{mag}Z}]^T = \mathbf{e}_{\text{mag}}$. Matici neortogonalit \mathbf{P} lze dle způsobu definice os zahrnout několika způsoby. Jedním z nich je následující popis:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\sin(u_1) & \cos(u_1) & 0 \\ \sin(u_2) & \sin(u_3) & \sqrt{(1 - \sin^2(u_2) - \sin^2(u_3))} \end{bmatrix}. \quad (1-2)$$

Tvar rovnice (1-2) s dolní trojúhelníkovou maticí vychází z popisu os podle [3] a [4], kde je osa senzoru X sesouhlasená s ortogonálním ideálním systémem a úhly výchylek ostatních os jsou definovány v následujícím pořadí uvedeném na Obr. 1-2. Předpokládá se měření dostatečně homogenního pole, a proto lze uvažovat všechny tři senzory v jednom bodě a zanedbat tak jejich reálnou vzdálenost.



Obr. 1-2 Použitá definice úhlů neortogonalit podle [3, 4],

V případě alternativního sesouhlasení osy Z, nevychází matice neortogonalit \mathbf{P} v trojúhelníkovém tvaru a nehodí se pro snadnou maticovou dekompozici během výpočtu některých kalibrací. Vztah (1-1) stále popisuje vektor pole vztahovaný pouze k souřadnicovému systému vzhledem k vnitřním magnetickým osám bez ohledu na vnější konstrukci nebo montáž senzoru. K úplnému popisu výstupu senzoru vztahovaného k mechanické referenci je tak nutné ještě zavést změnu orientace/rotaci vektoru prostřednictvím transformační matice \mathbf{A} , složené z některých kombinací rotací \mathbf{R}_X , \mathbf{R}_Y a \mathbf{R}_Z například

$$\mathbf{R}_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, \mathbf{R}_Y = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}, \mathbf{R}_Z = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1-3)$$

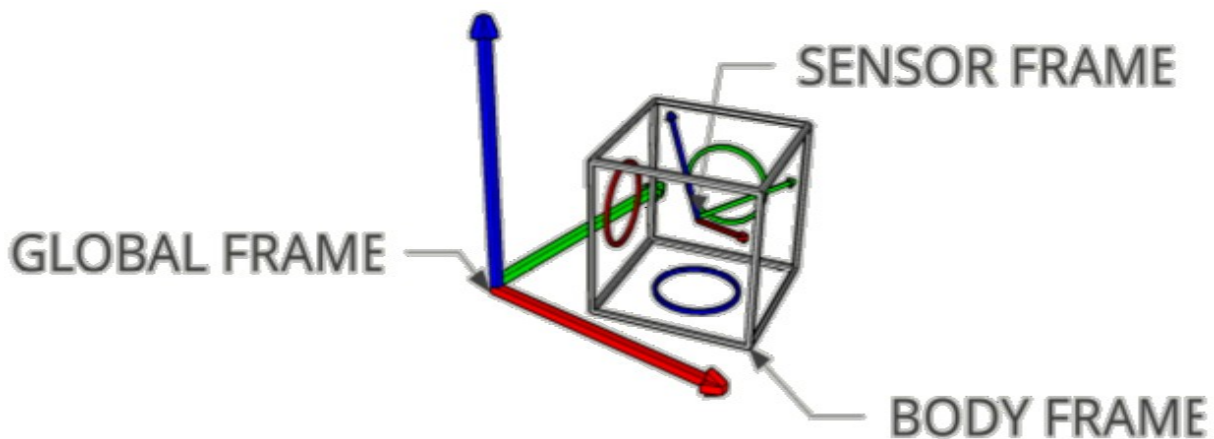
Rovnice (1-1) poté úpravou započtením transformace souřadnic a sloučením matic $\mathbf{R}^{-1}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{S}^{-1} = \mathbf{A}$ přejde do tvaru

$$\mathbf{b}_{\text{mag}} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{S}^{-1}(\mathbf{e}_{\text{mag}} - \mathbf{b}_0) = \mathbf{A}(\mathbf{e}_{\text{mag}} - \mathbf{b}_0), \quad (1-4)$$

respektive, vztah pro bezrozměrný výstup magnetometru lze vyjádřit z rovnice výše jako

$$\mathbf{e}_{\text{mag}} = \mathbf{SPR}\mathbf{b}_{\text{mag}} + \mathbf{b}_0 = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}_{\text{mag}} + \mathbf{b}_0. \quad (1-5)$$

Pro potřeby mé práce bude tedy odlišovat tři různé souřadnicové systémy. **Vnitřní magnetický systém senzoru** (*sensor frame*), **vnější mechanický systém senzoru** (*body frame*) a **systém kalibračního cívkového systému** (*global frame*), viz Obr. 1-3. Jiné referenční systémy vztahované k zeměpisným souřadnicím nebo využívané pro navigační úlohy jsou více popsány v [5].



Obr. 1-3 Znáznornění systému souřadnic v prostoru

Předpokladem modelu jsou totožné počátky soustav souřadnic. Otočení mezi souřadnicovými systémy budu pro zjednodušení nazývat **vzájemnou orientací**. Ve skutečnosti je nutné brát zřetel na nejasnosti týkající se pohledu na způsob provedení rotace a rozdíl mezi aktivní a pasivní transformací. Dalším zdrojem obvyklých nedorozumění je pořadí skládání rotačních matic a Eulerových úhlů, které většinou není úplně ustálené. Matici vzájemné orientace tak dále nebudu rozepisovat na dílčí rotace, pokud to nebude nutné pro porovnání.

Jinou skupinou parametrů možných modelů magnetometru jsou takzvané *hard-iron*, *soft-iron* a *cross-field* chyby, které se většinou definují u magnetometrů s AMR senzory používaných v inerciálních měřicích jednotkách a kompasech, posléze v dronech nebo mobilních telefonech [6]. *Cross-field* chyba vyjadřuje citlivost senzoru na MP kolmé k základní ose a je typická pro nekompensované AMR senzory. Ostatní chyby jsou způsobené materiály v okolí senzoru pevně svázanými s jeho orientací. *Hard-iron* chybou se rozumí přítomnost zmagetovaného materiálu, například v reproduktoru mobilního telefonu nebo obecně remanentní pole u feromagnetik. *Soft-iron* chybu způsobí přítomnost materiálu s permeabilitou $\mu \gg 1$, který ovlivňuje měření v závislosti na natočení vůči ZMP. Tyto chyby jsou ale v případě precizních *fluxgate* magnetometrů ideálně zanedbatelné a nejsou tak v této práci podrobně rozebírány.

1.3 Postupná kalibrace senzorů magnetometru

Obecně platí, že počet hledaných parametrů při kalibraci pro základní lineární model magnetometru je 9 (3 offsety, 3 citlivosti a 3 neortogonalita), respektive 12 (3 úhly rotací) v případě úplné kalibrace. Kromě toho lze model rozšířit o další parametry, jako jsou teplotní závislosti citlivostí nebo koeficienty polynomů pro započtení nelinearity senzorů.

V případě kalibrací citlivostí a offsetů lze použít metody používané při kalibracích jednoosých senzorů. Offset senzoru MP lze nejlépe měřit umístěním do vícevrstvého magnetického stínění, chybu danou remanencí stínění je možné potlačit rotací magnetometru. Zjednodušenou kalibraci citlivosti a offsetu lze provést i v jednoosých Helmholtzových cívkách komutací pole a zaznamenáním odezvy magnetometru. Pro dosažení požadované přesnosti je ale nutné ustavit osu senzoru souhlasně s osou cívek. Úhlová odchylka 1° však vytvoří systematickou chybu kalibrace citlivosti pouze 150 ppm ($\sin(89) = 0,999\ 847$), která ale není ve většině případů dominantní, protože větší chybu způsobí už nehomogenita pole daná konečným rozměrem cívek a jejich provedení.

Postup získání úhlů neortogonalit pomocí jednoosých cívek je obtížný a proto se využívají tříosé konfigurace cívek [7]. Metoda postupného získání úhlů orientace jednotlivých senzorů v cívkách a následný přepočítání na neortogonalitu magnetometru je včetně analytického řešení popsán například v diplomové práci [8].

Z hlediska praktického využití jsou zajímavější kalibrační metody, umožňující získání více parametrů najednou. Proces samotných kalibrací lze rozdělit podle míry nutné obsluhy, typu vstupních dat magnetického pole a matematického aparátu použitého pro výpočet parametrů kalibrace. Většina těchto metod využívá numerického řešení, pro které je nutné získat sadu vstupních rovnic. Hlavní rozdělení je na metody pracující pouze se ZMP a na metody využívající cívkových systémů. Ze zjednodušeného tvaru rovnice (1-5) výstupu magnetometru

$$\mathbf{e}_{\text{mag}} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}_{\text{mag}} \quad (1-6)$$

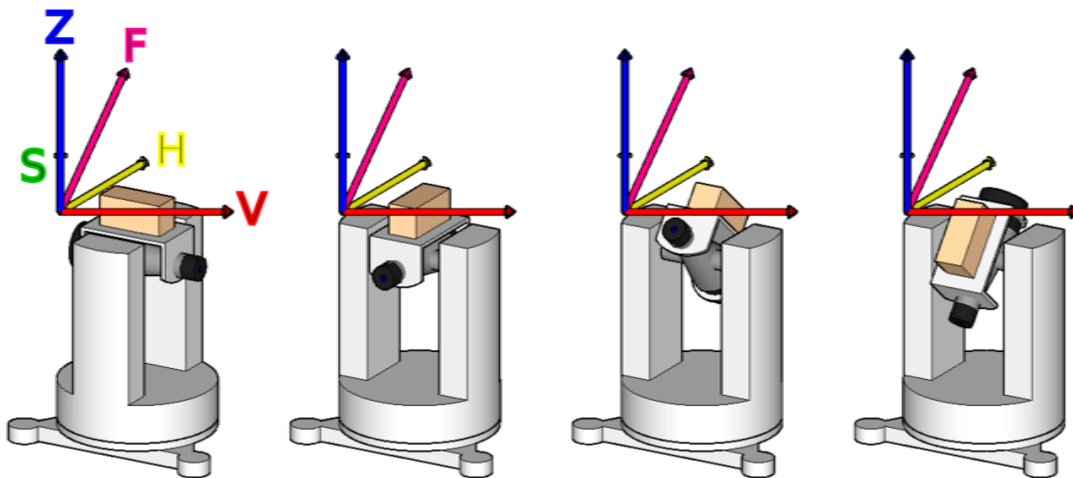
tak pro dané rozdělení plynou tři varianty vstupních rovnic podle [9]:

- Konstantní \mathbf{A} : Metody využívající variací ZMP, kde \mathbf{b}_{mag} je měřeno referenčním magnetometrem. Senzor je fixně umístěn v zemském poli a jeho přirozené variace zajistí získání soustavy rovnic. Tento postup se používá například pro vzájemné srovnání měření variometrů na observatořích (IAGA [1] str. 162). Zde jsou variace typicky malé, proto je vhodné využívat aktivních dnů, přesto je nutná delší doba záznamu.
- Konstantní \mathbf{A} a \mathbf{b}_{mag} vytvářeno cívkovým systémem. Tuto metodu využívají všechny cívkové kalibrace, statickou složku ZMP je nutné pro většinu metod odstranit. Jeho variace také představují problém a musí se aktivně potlačit během kalibrace. Tato metoda umožňuje nejsnazší automatizaci procesu kalibrace.
- Ideálně konstantní \mathbf{b}_{mag} , kdy matice \mathbf{A} se mění změnou orientace magnetometru. Variace ZMP je vhodné v průběhu kalibrace alespoň měřit. Dále je možné rozeznat varianty závislé na orientaci a nezávislé na orientaci dle způsobu výpočtu kalibrovaných parametrů. Měřené vektory typicky představují povrch koule (po kalibraci) nebo tenkou slupku („*thin-shell*“).

Další existující metody pro *online/in-field* kalibraci magnetometrů v družicových systémech, raketových nosičích a podobné adaptivní metody budou vynechány. Zaměřím se převážně na *offline* laboratorní a observatorní kalibrace aplikovatelné s vyvíjeným kompenzovaným cívkovým systémem.

1.4 Manuální obecná kalibrace s teodolitem

Jen pro zdůraznění výhod automatizace procesu kalibrace uvedu zjednodušený postup ruční kalibrace prvních 9 parametrů pomocí teodolitu, kterým se získávají parametry postupně a ne najednou. Tuto kalibraci je nutné provádět v lokalitě s homogenním ZMP, ideálně v čase s minimálními variacemi a rušením. Teodolit je zařízení umožňující velmi přesné měření horizontálního a vertikálního úhlu, zejména v geodézii [10]. Umístí-li se magnetometr na dalekohled teodolitu tak, aby jedna z jeho os byla ideálně totožná s jeho optickou osou, pak lze citlivost dané jedné osy změřit natočením senzoru do směru Zemského magnetického pole. Postup zarovnání senzoru je totožný, jako v případě standardního měření deklinace a inklinace s pomocí jednoosého magnetometru popsaného například v příručce IAGA [1]. V praxi se z toho důvodu pro teodolit s jednoosým magnetometrem používá název „DI-Flux“.



Obr. 1-4 DI Flux Teodolit při měření inklinace a deklinace

Využívá se kosinové odezvy výstupu senzoru v závislosti na natočení vůči magnetickému poli. Nulový výstup se detekuje snadněji než hledání maxima intenzity. Postup je zřejmý z Obr. 1-4. Nejdříve se celý teodolit ustaví do vodorovné polohy pomocí trubčové libely a dalekohled se srovná do nulové vertikální výchylky. Senzor se horizontálním otáčením teodolitu uvede do nulového výstupu, v ten moment je senzor natočen kolmo na vektor ZMP, následně se otočí přesně o 90°. Výstupem senzoru je intenzita horizontální složky ZMP. Horizontální úhel od zeměpisného severu je magnetická deklinace.

Poté se postup opakuje s naklápěním dalekohledu. Jakmile je osa senzoru v posledním kroku srovnána s vektorem ZMP, jeho výstupní hodnota je určena v ideálním případě intenzitou ZMP. Úhel vektoru od vodorovné roviny se nazývá magnetickou inklinací.

Kalibraci citlivosti lze zjednodušeně provést například srovnáním s intenzitou ZMP měřenou skalárním magnetometrem. Offset senzoru lze vypočítat z rozdílu měření při otočení dalekohledu o 180° (změna znaménka ZMP). Reálně je ale nutné, kvůli minimalizaci chyby sesouhlasení optické a magnetické osy, postup opakovat pro všechny orientace a měření vyžaduje hodně času zaškolené obsluhy.

S pomocí teodolitu lze neortogonalitu mezi dvojicí os nalézt nejsnadněji urovnáním některého ze senzorů trojice do vertikální roviny (při otáčení teodolitu musí být výstup daného senzoru neměnný) a měřením projekce horizontální složky ZMP do jiného senzoru při různém natočení teodolitu. Detailní postup kalibrace s teodolitem včetně odvození je uveden v diplomové práci [8].

1.5 *Thin shell* kalibrace

V případě metod k získání všech parametrů z jedné sady dat, jsou vstupní data většinou ve formě rovnoměrně rozložených bodů na povrchu koule (tenké slupky) s poloměrem odpovídajícím konstantní intenzitě MP. Název metody, tak jak je obecně chápán v [8, 11] popisuje i specifický iterační postup získání kalibrační matice. V některé literatuře [12] se ale jako *thin-shell* označuje až metoda s využitím cívkového systému a rozvojem do sférických harmonických funkcí pro model magnetometru, ale to je nad rámec této práce. Proto zde bude dále pro účely zadání *thin-shell* označovat pouze kalibraci s daným tvarem vstupních dat nezávisle na následném způsobu jejich zpracování. Většina následujících kalibrací popsanych v kapitolách 1.6 a 1.7, tak bude chápána jako *thin-shell* kalibrace. S ohledem na plánované použití s pomalými magnetometry, budou vstupní data sadou diskretních vektorů pokrývajících povrch koule v 51 a 161 bodech, které jsou použité v disertační práci [4] kvůli lepšímu srovnání s již existujícími výsledky.

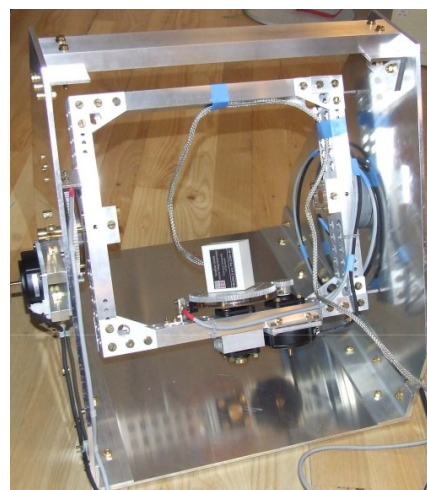
Body původně na povrchu koule jsou při měření nekalibrovaným magnetometrem deformovány na pootočený elipsoid. Kalibrace se vlastně snaží tuto deformaci naměřených bodů eliminovat. Výsledky různých kalibrací lze mezi sebou porovnávat velikostí reziduí intenzity jednotlivých bodů po kalibraci. Rezidua vznikají z nedokonalostí kalibračních výpočtů, šumem, nelinearitou a driftu offsetu senzorů a zejména nestálosti aplikovaného pole během kalibrace (nekompenzované změny ZMP dané antropogením rušením či geomagnetickými variacemi, gradient apod). Celkovým ukazatelem pro všechny body je pak zejména výběrová standardní odchylka reziduí RMSE podle vztahu

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i^N (\|\mathbf{b}_{\text{vec}}(i)\|_c - b_{\text{sca}}(i))^2}. \quad (1-7)$$

Důležitým faktem je, že tato rezidua dávají smysl pouze pro magnetometr odpovídající danému chybovému modelu, protože jakákoliv nelinearita senzorů (například *cross-field* chyba) se projeví zvětšením reziduí, i při nulovém rušení ZMP. Pokud senzory splňují předpoklady, pak RMSE vypovídá o celkové velikosti rušení MP během kalibrace. Samotné metody se neomezují pouze na kalibrace magnetometrů, ale jsou obecně použitelné i pro ostatní třísové senzory, například akcelerometry viz článek [11]. Méně přesné otáčení v ruce většinou nesplňuje požadavky na rovnoměrné rozložení bodů po povrchu koule a je nutné použití přípravků pro otáčení magnetometru nebo teodolitu. Pracnost obsluhy lze snížit s využitím automatické nemagnetické rotační platformy [13].



Obr. 1-5 Ruční rotační platforma



Obr. 1-6 Automatická platforma [převzato [13]]

1.6 Skalární kalibrace

Metoda využívající rotaci v konstantním poli se v literatuře většinou označuje jako skalární podle metody výpočtu, kdy se předpokládá konstantní skalární hodnota MP, resp. hodnota je zaznamenávána současně skalárním magnetometrem během otáčení kalibrovaného vektorového magnetometru. Ten by měl být umístěn v dostatečně vzdálenosti, aby nedocházelo k vzájemnému ovlivnění, ale pak je nutné korigovat případné gradienty MP mezi umístěním obou magnetometrů.

Za předpokladu opravdu stálé skalární velikosti MP bez variací a rušení lze očekávat, že velikost měřeného vektoru bude konstantní. Pak lze normu vektoru korigovaného výstupu magnetometru z rovnice (1-5) zapsat ve tvaru pro jeden ze sady vektorů (jedno měření) jako

$$\|\mathbf{b}_{\text{mag}}\| = \sqrt{\mathbf{b}_{\text{mag}} \cdot \mathbf{b}_{\text{mag}}} = \sqrt{\mathbf{b}_{\text{mag}} \mathbf{b}_{\text{mag}}^T} = \sqrt{(\mathbf{e}_{\text{mag}} - \mathbf{b}_0)^T \mathbf{A}^T \mathbf{A} (\mathbf{e}_{\text{mag}} - \mathbf{b}_0)} \quad (1-8)$$

Výraz pod odmocninou po roznásobení odpovídá obecné rovnici elipsoidu v maticovém tvaru kde vektor \mathbf{b}_0 určuje jeho střed a symetrická matice $\mathbf{A}^T \mathbf{A} = \mathbf{A}_e$ představuje matici zkosení, viz odvození v článku [14], ze kterého vychází i odvození nalezení jeho parametrů. Variantu s řešením pomocí metody lineárních nejmenších čtverců (MLNČ) lze najít položením umocněného výrazu (1-8) do rovnosti s kvadrátem předpokládané nebo skutečně měřené skalární hodnoty intenzity b_s

$$\mathbf{b}_{\text{mag}} \mathbf{b}_{\text{mag}}^T = \mathbf{e}_{\text{mag}}^T \mathbf{A}_e \mathbf{e}_{\text{mag}} - 2 \mathbf{b}_0^T \mathbf{A}_e \mathbf{e}_{\text{mag}} + \mathbf{b}_0^T \mathbf{A}_e \mathbf{b}_0 \equiv b_s^2, \quad (1-9)$$

a s pomocí následujících parametrizací

$$\mathbf{A}_e = \begin{bmatrix} p_1 & \frac{p_4}{2} & p_5 \\ \frac{p_4}{2} & p_2 & \frac{p_6}{2} \\ \frac{p_5}{2} & \frac{p_6}{2} & p_3 \end{bmatrix}, \mathbf{b}_0 = -\frac{1}{2} \mathbf{A}_e^{-1} \begin{bmatrix} p_7 \\ p_8 \\ p_9 \end{bmatrix}, p_{10} = \mathbf{b}_0^T \mathbf{A}_e \mathbf{b}_0 \quad (1-10)$$

$$\mathbf{d}^T = [e_x^2 \quad e_y^2 \quad e_z^2 \quad e_x e_y \quad e_x e_z \quad e_y e_z \quad e_x \quad e_y \quad e_z \quad 1] \quad (1-11)$$

$$\mathbf{p}^T = [p_1 \quad p_2 \quad p_3 \quad p_4 \quad p_5 \quad p_6 \quad p_7 \quad p_8 \quad p_9 \quad p_{10}]$$

lze rovnici (1-9) zapsat pro jeden bod měření ve tvaru

$$\mathbf{d}_i \cdot \mathbf{p} = \mathbf{d}_i^T \mathbf{p} = b_{s_i}^2. \quad (1-12)$$

Po sestavení do maticového tvaru z N měření

$$\mathbf{D} = [\mathbf{d}_1 \quad \mathbf{d}_2 \quad \mathbf{d}_3 \quad \dots \quad \mathbf{d}_N]^T, \mathbf{b}_s^{\text{sq}} = [b_{s_1}^2 \quad b_{s_2}^2 \quad b_{s_3}^2 \quad \dots \quad b_{s_N}^2]^T \quad (1-13)$$

$$\mathbf{D} \mathbf{p} = \mathbf{b}_s^{\text{sq}}$$

Lze vyřešit kalibraci metodou lineárních nejmenších čtverců jako přeúřčenou soustavu rovnic pomocí pseudoinverze

$$\mathbf{p} = (\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T \mathbf{b}_s^{\text{sq}}. \quad (1-14)$$

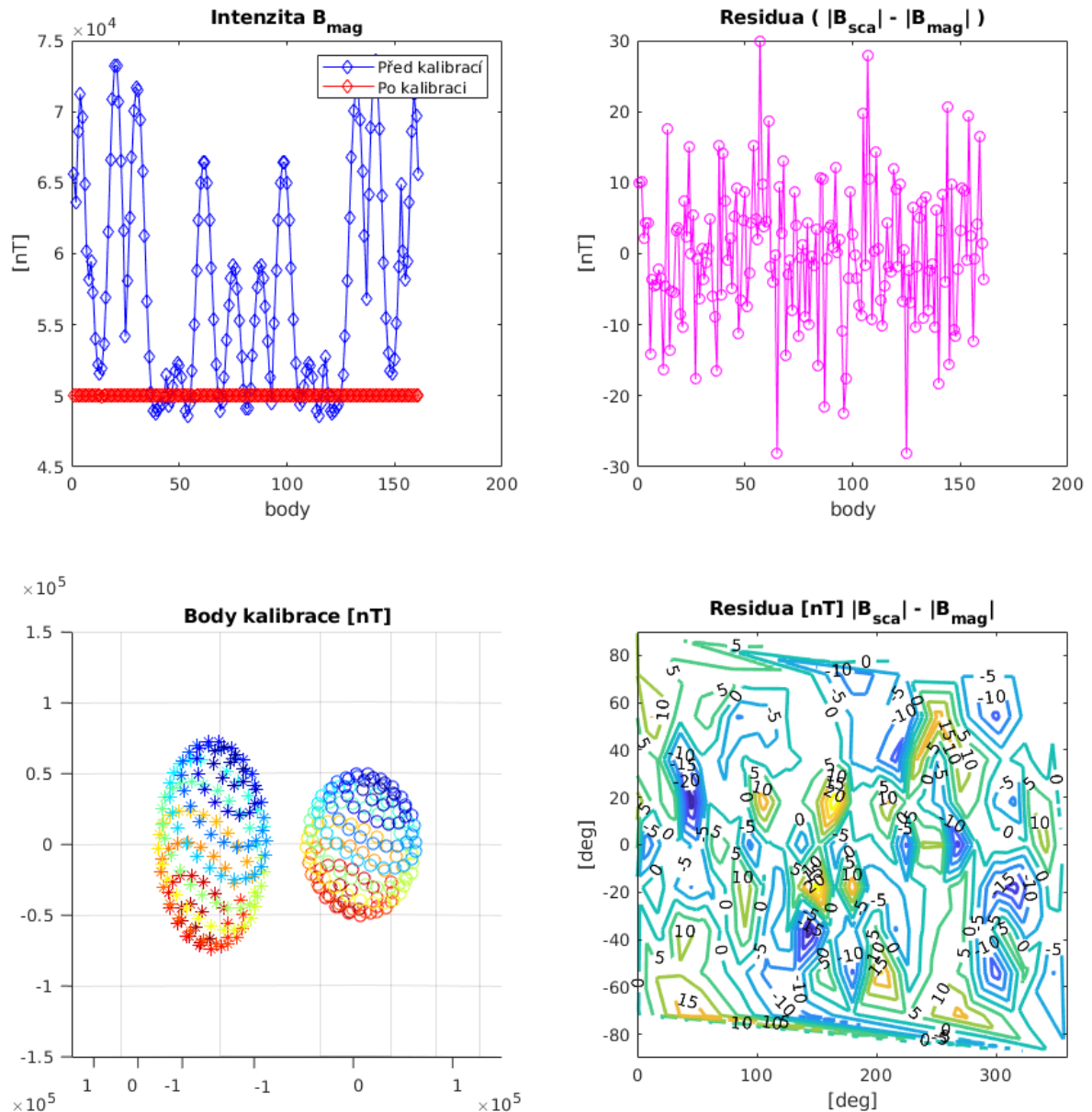
Obdobný postup s mírně odlišnou parametrizací je uveden v práci [11]. Existují i složitější možnosti nalezení vhodného elipsoidu, založené například na minimalizaci geometrických vzdáleností bodů, ale ty již vyžadují k nalezení řešení nelineární optimalizační metody.

Diagonalizací matice \mathbf{A}_e lze získat velikosti poloos elipsoidu z jejích vlastních čísel a osy elipsoidu z vlastních vektorů. Kombinovanou trojúhelníkovou matici citlivostí na matici neortogonalit $\mathbf{P} \mathbf{S}$ lze zpětně vypočítat z matice \mathbf{A}_e pomocí LU dekompozice na dolní a horní trojúhelníkový tvar (Choleskyho metoda).

Jiná metoda s parametrizací pomocí matic \mathbf{P} a \mathbf{S} z rovnice (1-2) je včetně odvození a implementace dostatečně popsána v článku [3] a disertační práci [4]. K řešení se využívá iterační *Gauss-Newton* metody optimalizující přímo v prostoru 9 parametrů vyjadřujících citlivosti, offsety a neortogonalitu, ze kterých jsou sestaveny matice \mathbf{P} a \mathbf{S} v následující v nelineární minimalizační funkci

$$f_{\min} = \sum_i (\|\mathbf{P}^{-1}\mathbf{S}^{-1}(\mathbf{e}_{\text{mag}}(i) - \mathbf{b}_0)\| - B_{\text{sca}}(i))^2. \quad (1-15)$$

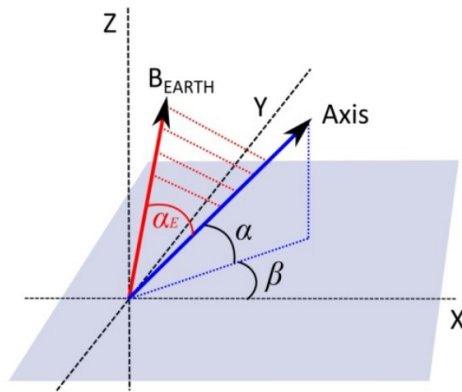
Výsledkem této kalibrace pak jsou hodnoty parametrů, jejich standardní odchylky a rezidua intenzity. Kvalitu získané kalibrace je vhodné vyhodnotit z rozložení grafu reziduí. Cokoliv vypadající rozdílně od náhodného šumu (normální rozložení) může signalizovat chybu. Vhodné je i vykreslení plošného rozložení reziduí – viz Obr. 1-7.



Obr. 1-7 Ukázka výstupu skriptu skalární kalibrace převzatého a upraveného z [4] (syntetická data)

V plošném grafu reziduí mohou být čitelné nehomogenní oblasti způsobené nelinearitami senzorů. Protože je skalární metoda obecně nezávislá na výchozí orientaci a není vztažená k souřadnicovému systému, nemusí rozvinutá plocha odpovídat sférickým souřadnicím magnetometru. Nemusí pak být zřejmé, které osy jsou nelineární.

Pro úplnost uvedu ještě metodu skalární kalibrace s pomocí tříosého cívkového systému bez možnosti kompenzace ZMP, tak jak byla popsána v disertační práci [15] a článku [16]. Metoda spočívá v kombinaci skalárního měření intenzity ZMP a generování vektoru MP okolo fixně uloženého magnetometru. Velkou výhodou fixní polohy a tedy odstranění požadavku na rotační platformu, vyvažuje nutné zvětšení vzdálenosti skalárního magnetometru, který musí být vzdálený řádově vyšší desítky metrů, aby nebylo měření intenzity ZMP ovlivněno MP excitace cívek. Náhradní varianta, v případě nedostatečné vzdálenosti skalárního magnetometru, využívá měření intenzity při nulové excitaci, ale to prodlužuje dobu měření a vzniká problém s variacemi ZMP.



Obr. 1-8 Orientace sensorové osy magnetometru vůči s. s. cívek a vektoru ZMP [převzato [17]]

Každou složku výstupu magnetometru lze pak pro jedno měření vyjádřit následující nelineární rovnicí

$$e_i = S [b_{sca} \sin(\alpha_E) + b_{L1} \cos(\alpha)\cos(\beta) + b_{L2} \cos(\alpha)\sin(\beta) + b_{L3} \sin(\alpha)], \quad (1-16)$$

jejímiž neznámými jsou: úhel α_E natočení vektoru ZMP vůči ose daného senzoru, b_{sca} intenzita ZMP a α, β úhly natočení v cívkovém systému, viz Obr. 1-8. Vstupní data výpočtu se skládají ze složek MP tvořeného excitací cívek b_{L1}, b_{L2}, b_{L3} , výstupních dat z magnetometru e_x, e_y, e_z a intenzity ZMP b_E . Vhodnou kombinací generovaného MP (opět *thin-shell*) se vytvoří sada dat pro numerické řešení soustavy těchto nelineárních rovnic. K řešení je použita optimalizace metodou Levenberg-Marquardt.

Tento postup vychází z metody stejných autorů pro skalární kalibraci samotného cívkového systému, popsaného v článku [18]. Skalární magnetometr je umístěn naopak přímo v tříosých cívkách. Postup je podobný s principem „*dIdD*“ magnetometrů [19], které využívají skalární senzory a *vychylovací* vnější cívky pro měření vektoru ZMP ve směru osy cívek. Nejdříve se pro každou ze tří cívkových os zvlášť vypočítá jejich konstanta pomocí řešení přeурčené soustavy nelineárních rovnic se třemi neznámými (b_E intenzita ZMP, ε úhel osy vůči vektoru ZMP, S_i cívková konstanta):

$$b_{sca}^2 = (I_{Li} S_i + b_E \sin(\varepsilon))^2 + (b_E \cos(\varepsilon))^2. \quad (1-17)$$

Přeурčená soustava pochází z opakovaného měření různých kombinací excitací, typicky $I_{Li} = [-1 \ 0 \ 1]c$.

Neortogonalita tříosých cívek se získá postupně z úhlů mezi každou dvojicí cívek, které je možné nalézt obdobným způsobem, při jejich kombinované excitaci. Nelineární rovnice pro dvojici os je zapsána (již s kalibrovanou velikostí MP $b_i = I_{Li} S_i$) ve tvaru s neznámou úhlovou výchylkou dvojice cívek α , intenzitou ZMP b_E a úhlů natočení vůči ZMP δ, γ .

$$b_{sca}^2 = (b_{c1} + b_{c2} \cos(\alpha) + b_E \cos(\delta) \cos(\gamma))^2 + (b_{c2} \sin(\alpha) + b_E \cos(\delta) \sin(\gamma))^2 + (b_E \cos(\delta))^2 \quad (1-18)$$

Přeурčená soustava opět vznikne měřením při různých kombinacích b_{c1} a b_{c2} .

1.7 Vektorová cívková kalibrace

V případě cívkového systému umožňujícího nulování ZMP, respektive umožňujícím nastavit reálnou hodnotu vektoru MP i při uvážení superpozice MP excitace cívek a ZMP, lze proces kalibrace provést pomocí řešení jednoduché přeúřčené soustavy lineárních rovnic metodou nejmenších čtverců. Následující postup a odvození vychází z článku [20]. Korigovaný výstup magnetometru se vyjádří jako

$$\mathbf{b}_{\text{mag}} = \mathbf{P}_b^{-1} \left(\mathbf{e}_{\text{mag}} - \begin{bmatrix} o_1 \\ o_2 \\ o_3 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} S_1 & V_{12} & V_{13} \\ 0 & S_2 & V_{23} \\ 0 & 0 & S_3 \end{bmatrix} \left(\mathbf{e}_{\text{mag}} - \begin{bmatrix} o_1 \\ o_2 \\ o_3 \end{bmatrix} \right), \quad (1-19)$$

kde se využívá předpokladu malých neortogonalit, v důsledku čehož je matice \mathbf{P}_b^{-1} mírně odlišná od $\mathbf{P}^{-1}\mathbf{S}^{-1}$ uvedené v kapitole 1.2. Prvky S_i tvoří citlivosti a prvky V_{ij} souvisí s úhly neortogonalit u_i přibližnými vztahy

$$\cos(u_1) \approx -\frac{V_{12}}{S_2}, \cos(u_2) \approx -\frac{V_{13}}{S_3}, \cos(u_3) \approx -\frac{V_{23}}{S_3}. \quad (1-20)$$

Mezi souřadným systémem cívek a magnetometru, respektive MP excitace a měřeným MP, je zavedena opět matice vzájemné orientace \mathbf{R}

$$\mathbf{b}_{\text{civky}} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \mathbf{b}_{\text{mag}} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{b}_{\text{mag}}. \quad (1-21)$$

Pak lze obecně vztah mezi vektorem MP cívek a nekorigovaným výstupem magnetometru zapsat při sloučení matic $\mathbf{\Pi}^{-1} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{P}_b^{-1}$ jako

$$\mathbf{b}_{\text{civky}} = \mathbf{\Pi}^{-1} \mathbf{b}_{\text{mag}} \left(\mathbf{e}_{\text{mag}} - \begin{bmatrix} o_1 \\ o_2 \\ o_3 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{13} \\ \pi_{21} & \pi_{22} & \pi_{23} \\ \pi_{31} & \pi_{32} & \pi_{33} \end{bmatrix} \left(\mathbf{e}_{\text{mag}} - \begin{bmatrix} o_1 \\ o_2 \\ o_3 \end{bmatrix} \right). \quad (1-22)$$

Ten lze dále upravit na finální vztah vyjadřující přeúřčenou soustavu rovnic pro sadu vektorů

$$\mathbf{E}_{\text{mag}} \hat{\mathbf{\Pi}} = \begin{bmatrix} e_{1x} & e_{1y} & e_{1z} & 1 \\ e_{2x} & e_{2y} & e_{2z} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{13} \\ \pi_{21} & \pi_{22} & \pi_{23} \\ \pi_{31} & \pi_{32} & \pi_{33} \\ \pi_{41} & \pi_{42} & \pi_{43} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{1x} & b_{1y} & b_{1z} \\ b_{2x} & b_{2y} & b_{2z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} = \mathbf{B}_{\text{civky}}. \quad (1-23)$$

Zde je nutné dát pozor na změnu původně sloupcových vektorů na řádkové. Offsets senzorů jsou v posledním řádku matice $\hat{\mathbf{\Pi}}$. Soustavu lze také rozšířit o další parametry vyjadřující nelinearity jednotlivých senzorů. Konkrétně v případě že nelinearita daného senzoru není navázána na ostatní osy, lze soustavu pro jeden z trojice senzorů přepsat například do tvaru s polynomiálním rozvojem

$$\begin{bmatrix} e_{1x} & e_{1y} & e_{1z} & 1 & e_{1x}^2 & e_{1x}^3 \\ e_{2x} & e_{2y} & e_{2z} & 1 & e_{1x}^2 & e_{1x}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \pi_{11} \\ \pi_{21} \\ \pi_{31} \\ \pi_{41} \\ \pi_{51} \\ \pi_{61} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{1x} \\ b_{2x} \\ \vdots \end{bmatrix}. \quad (1-24)$$

Lineární koeficient citlivosti je v tomto tvaru ovlivněn koeficienty vyšších stupňů, tomu se dá předejít přechodem na tvar s Legendery polynomy anebo rozvojem na sférické harmonické. Přeúřčené soustavy lineárních rovnic pak stačí řešit pomocí lineární metody nejmenších čtverců. V příloze článku [21] je odvozený analytický způsob dekompozice získané matice $\mathbf{\Pi}$ na transformační matici a trojúhelníkovou matici neortogonalit s jedničkami na diagonále. Citlivosti jsou přítomné ve velikostech sloupcových vektorů transformační matice, která tak není čistě rotační (ortogonální).

Vhodnější je dekomponovat matici $\mathbf{\Pi}$ rovnou na čistě rotační matici \mathbf{R} a trojúhelníkovou matici \mathbf{PS} z původní definice chybového modelu senzoru, tj. bez zanedbání složek malých úhlů. To lze provést i pomocí obyčejné QR dekompozice (respektive LQ, kvůli transpozici sloupcových na řádkové vektory). Zpětný výpočet citlivostí a úhlů neortogonalit z trojúhelníkové matice \mathbf{PS} popisují podrobněji v kapitole implementace.

Oproti skalární metodě lze z výsledku vektorové cívkové kalibrace určit rezidua nejen pro intenzitu, ale i pro všechny tři složky zvlášť. To přináší možnost posouzení nelinearit nezahrnutých v modelu z reziduí jednotlivých senzorů. Navíc lze plošné grafy reziduí vykreslit vždy ve správné orientaci vzhledem k vnitřnímu s. s. bez ohledu na natočení magnetometru v cívkách.

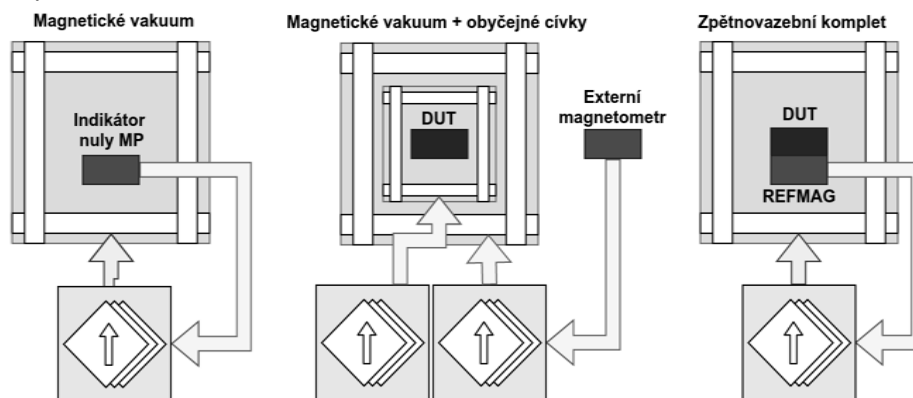
Výsledná rotační matice z dekompozice zároveň představuje vzájemnou orientaci s. s. cívkového systému a vnitřního s. s. magnetometru. To je, kromě snazší automatizace, nižších nároků na obsluhu a čas, zásadní výhodou oproti skalární kalibraci. Vektorovou cívkovou kalibrací je sice také možné získat všech 12 individuálních parametrů pomocí řešení jednoduchých soustav lineárních rovnic, ale získaná rotační matice vůči s. s. cívkového systému není samostatně v praxi moc užitečná a pro získání matice vůči vnějšímu s. s. magnetometru je nutné provádět složitější postupy, které popisují v kapitole 1.9.

1.8 Známé metody řízení pole uvnitř cívkového systému

Hlavní překážkou snadného řízení cívkového systému je přítomnost zemského magnetického pole. Pokud chceme nastavit uvnitř cívek konkrétní hodnoty vektoru magnetického pole, musíme znát i hodnoty zemského pole v daném bodě. Umístění kalibračního pracoviště určuje vhodné metody a prostředky řízení podle velikosti variací pole, gradientu a také přítomnosti magnetických materiálů na daném místě. Převážná většina systémů pracuje ve zpětnovazebním režimu s referenčním magnetometrem uvnitř cívek, ty pak kvůli zpětné vazbě nemusí mít přesně kalibrované cívkové konstanty pro přepočítání proudu na velikost pole.

Nejjednodušší systémy pracující pouze jako aktivní stínění variací a rušení ZMP, případně jako systémy vytvářející magnetické vakuum (Obr. 1-9 vlevo). Ty se používají například v laboratořích elektronové mikroskopie a pro cívkové kalibrace tak nemají moc velký význam. Uvnitř systému je variometr nebo indikátor nuly. Mezistupněm jsou systémy umožňující kompletní odstínění stálé složky ZMP včetně variací, tedy dosažení ideálně stálého magnetického vakuu uvnitř homogenní oblasti cívek. Ty samy o sobě na kalibraci také nestačí. Ale v případě varianty s externím referenčním magnetometrem a *open-loop* odstraněním ZMP včetně jeho variací („mg. vakuum z externího magnetometru“), je možné využít v kombinaci s druhými vnořenými cívkami, jejichž MP může být následně řízeno pouze zdrojem proudu na základě znalosti jejich přesných cívkových konstant. Externí magnetometr je pak umístěn ve velké vzdálenosti od cívkového systému (Obr. 1-9 uprostřed).

Konečně teprve zpětnovazební systém s referenčním kalibrovaným magnetometrem uvnitř cívek (Obr. 1-9 vpravo) umožňuje nastavit libovolnou MP uvnitř cívek a zároveň kompenzovat rušení ZMP. Pro nás jsou nejzajímavější systémy využívané přímo pro kalibrace magnetometrů a testovací simulátory MP pro družice. Najdeme je tak hlavně při magnetických observatořích a centrech vesmírného výzkumu.

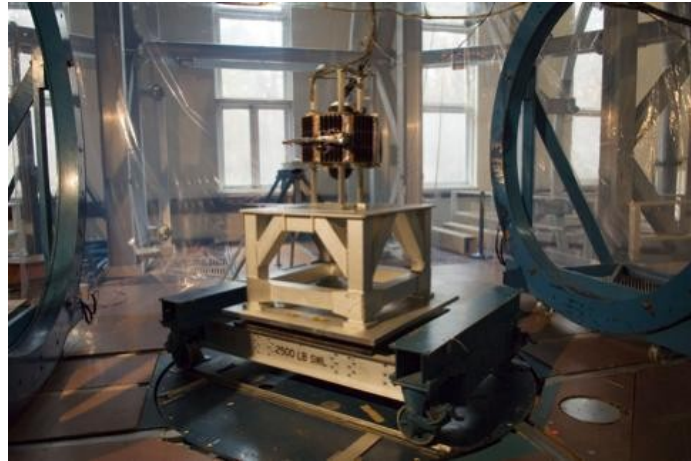


Obr. 1-9 Rozdělení řídicích systémů cívek

Málo diskutovaným nedostatkem zpětnovazebně řízených systémů malých cívek (v jednotkách metrů) je však fakt, že buď přímo referenční magnetometr anebo kalibrovaný magnetometr jsou možným zdrojem odchylek pole. Typický *fluxgate* magnetometr pracuje ve zpětnovazebním režimu s vlastním malým kompenzačním vinutím okolo každého jádra senzoru, případně kolem celé tříosé konfigurace vinutí u vektorově kompenzovaných magnetometrů. Senzor slouží pouze jako indikátor nuly a výstupem magnetometru je ve skutečnosti velikost proudu kompenzace. Při umístění takového magnetometru do vnějšího magnetického pole, generuje jeho kompenzační vinutí pole s opačnou orientací. V blízkém okolí (velikost pole magnetického dipólu klesá s třetí mocninou vzdálenosti) tak kompenzační vinutí vytváří rušivé pole, které se přičítá do sousedního magnetometru. Tento problém je výrazný zejména pro vektorově kompenzované magnetometry, kde díky rozměrům tříosé cívkové hlavice je magnetický moment kompenzačního vinutí nezanedbatelný.

Druhým problémem ZV – řízených systémů je omezená homogenita MP generovaného cívkami. Pokud je referenční senzor vychýlen z této oblasti, pak se objeví systematická chyba nastavení požadovaného vektoru MP.

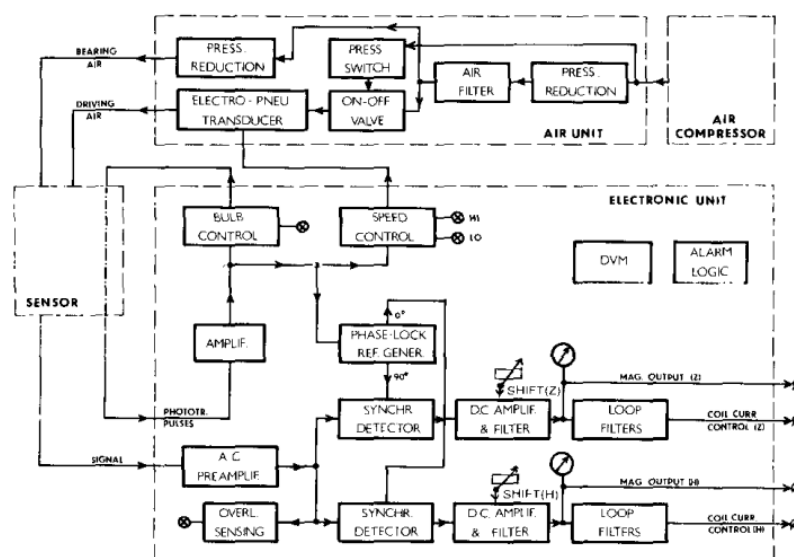
Tyto problémy se nemusí týkat cívkových systému vesmírných středisek, jejichž cívky s rozměry téměř desítek metrů, vytváří tak velkou homogenní oblast, že lze senzory umístit dostatečně daleko. V jejich laboratořích se navíc předpokládá i nízký gradient okolního ZMP a tak není větší vzdálenost mezi senzory problémem. Mezi zástupce patří NASA Goddard Space Flight Center [22], IABG Space test facilities v Ottobrunu, Německo a JAXA Magnetic test facility v Tsukuba, Japonsko. Přesto většina těchto systémů využívá open-loop řízení ze vzdáleného referenčního magnetometru.



Obr. 1-10 Satelit ST-5 v 12metrových Braunbek cívkách [převzato nasa.gov]

Ze systémů vytvářejících magnetické vakuum stojí za zmínku systém MAVACS [23] v minulosti vyráběný národním podnikem GEOFYZIKA Brno. Systém je určen pro vytváření nulového pole při měření remanentní magnetizace hornin v paleomagnetickém výzkumu a klade velké požadavky na velikost dosaženého magnetického vakuu v řádu jednotek nT.

Jako indikátor nuly jsou uvnitř 2m tříosých Helmholtzových cívek použité dva magnetometry se vzduchem poháněnými rotačními cívkami ROCOMA. Jejich použitím se eliminuje zejména offset, který u rotačních magnetometrů bývá pod 1nT a netrpí teplotním driftem.



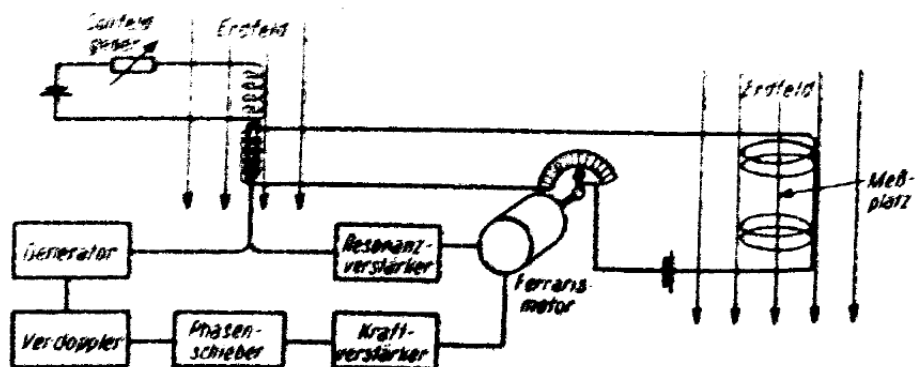
Obr. 1-11 Blokové schéma systému MAVACS [převzato [23]]

Obyčejný senzor s rotační cívkou ale měří pouze intenzitu složky MP kolmé k ose otáčení. K vyhodnocení úhlu vektoru MP a osy otáčení je nutná informace o okamžitém úhlu natočení cívky. V magnetometrech ROCOMA je využito optického snímače otáček a synchronní detekce. Jeden senzor měří horizontální složku a deklinaci, druhý vertikální složku a inklinaci, ze kterých je po transformaci souřadnic zpětnovazebně řízen proud Helmholtzovými cívkami. Systém umožňuje kromě magnetického vaku vytváření i libovolného vektoru MP do 10 μT , které ale většinou na kalibrace magnetometrů nestačí.

Princip vektorově kompenzovaných magnetometrů napovídá jednoduchý postup k vytvoření zpětnovazebního řídicího systému MP cívek, k jehož realizaci stačí teoreticky pořídit pouze analogový vektorově kompenzovaný *fluxgate* magnetometr s elektronikou a výkonové zesilovače. Stačí zaměnit malé kompenzační vinutí s velkým tříosým cívkovým systémem. Analogový výstup kompenzace původní elektroniky magnetometru se pouze výkonově zesílí a připojí na velké cívky. Původní malé kompenzační vinutí bude nově sloužit pro nastavení požadovaného vektoru MP.

Z komerčně dostupných řídicích systémů lze uvést zpětnovazební systém APEX-CS od firmy Billingsley [24] a zpětnovazební modul CU2 [25] pro systém firmy BARTINGTON. Řídicí systém APEX-CS využívá analogovou zpětnou vazbu s použitím výkonových zesilovačů typu D a umožňuje kompenzaci vnějšího rušení s útlumem 40 dB pro 50 Hz a 90 dB pro DC pole. Součástí systému je ovládací software umožňující provádění základní cívkové kalibrace magnetometrů a vlastní kalibrace připojeného cívkového systému. K tomu využívá pomocný jednoosý *fluxgate* magnetometr, který se podle pokynů přístroje postupně vkládá do prostoru cívek položený vždy na jednu ze svých ploch konstrukce sensorové hlavičky. Po provedené vlastní kalibraci je systém schopen takto korigovat neortogonalitu cívek. Druhý jmenovaný systém fy. BARTINGTON se skládá z řídicí jednotky, výkonového zesilovače, 1m Helmholtzových cívek a referenčního magnetometru. Částečným řešením problému s nehomogenitou cívek, je možné jemné doladění kalibračních parametrů referenčního magnetometru pomocí trimrů modulu CU2, vzhledem k umístění referenčního senzoru. Pro staticky uložený magnetometr je možné parametry získat například ze simulace, nebo kalibrací.

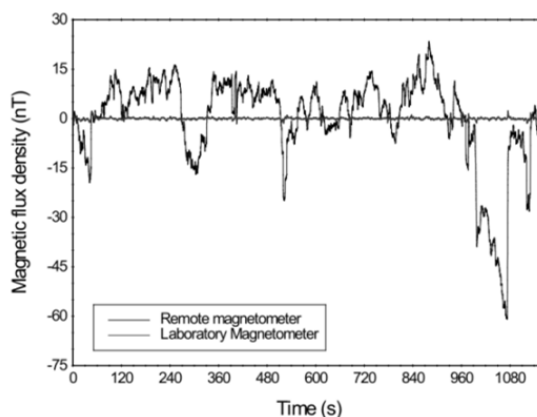
V případě oblastí s dostatečně homogenním polem (bez gradientu anebo s gradientem známým avšak konstantním) lze použít řízení bez zpětné vazby s využitím vzdáleného referenčního magnetometru, který je tak daleko, aby vliv magnetického pole cívek byl zanedbatelný. Pak lze po složitém srovnání souřadných systému tvořit požadovaný vektor pole pouhým odečtením doplňkové hodnoty z referenčního magnetometru měřícím ZMP. Případně použít dvou cívkových systémů, kdy jeden nuluje ZMP aplikací pole s opačnou orientací z referenčního magnetometru a druhý teprve vytváří požadovaný vektor MP. Těto metody je využíváno na magnetických observatořích již minimálně od konce padesátých let (např. Niemegk, Německo [26]). Přesto mi není znám komerčně dostupný systém pro kalibrace magnetometrů a většina systémů je vyvíjena *in-house* na universitách a magnetických observatořích.



Obr. 1-12 Systém vlečných cívek [převzato [26]]

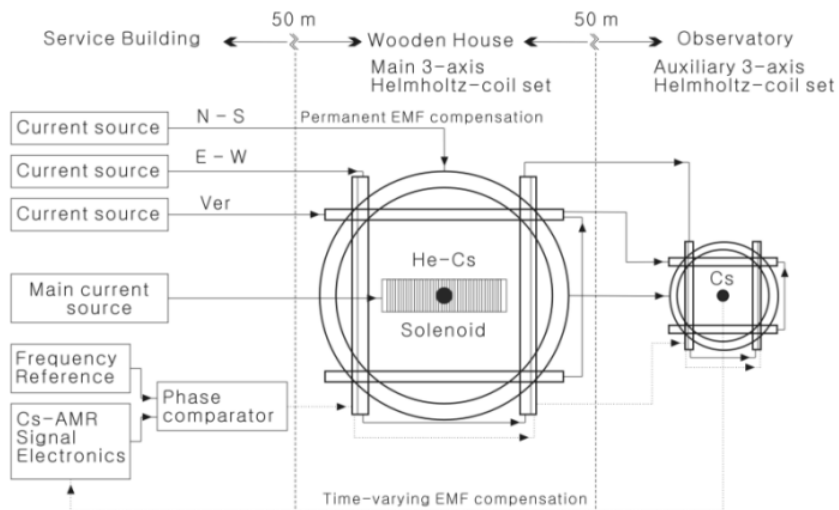
Z dostupné literatury jsem vybral pár reprezentativních zástupců systémů. Jedná se o specializovaná pracoviště, veškerá citlivá zařízení jsou umístěna v nemagnetických budovách oddělených dostatečnou vzdáleností a i samotné lokality jsou v oblastech s nízkým rušením ZMP a zejména nízkém gradientním pole. Proto je nutné brát dosažitelné výsledky s rezervou, vzhledem k tomu, kde plánujeme používat náš systém. Finská magnetická observatoř Nurmijärvi [27], akreditovaná pro kalibrace magnetometrů, má vyvinutý systém s 2m cívkami řízený pomocí 120 metrů vzdáleného variometru uvnitř temperovaného nemagnetického domku. Systém umožňuje provádění kalibrací magnetometrů s rozšířenou ($k=2$) nejistotou citlivostí do 200 ppm, neortogonalit 0.2° , úhlů vzájemné orientace vnějšího a vnitřního s. s. 0.03° a 1nT nejistotou offsetu senzorů.

Systém britské laboratoře NPL [28] dosahuje aktivního stínění rušení šumového prahu až na hodnoty dosahující 20 pT/VHz (1Hz), respektive až 1 pT/VHz (1Hz), při využití Cesiového magnetometru pro další krok kompenzace. První část kompenzace rušení tvoří řízení cívkového systému ze 70 m vzdáleného třiosého magnetometru. Snížení hodnoty šumu dosahují umístěním dalšího pomocného Cesiového skalárního magnetometru do prostoru cívek, mimo homogenní oblast, který dále stabilizuje rušení. Rozdíl v hodnotách MP je kompenzován speciálním astatickým vinutím okolo pomocného magnetometru.



Obr. 1-13 Útlum rušení ZMP v systému NPL [převzato [28]]

Systém automatické kompenzace ZMP popsaný v článku [29], využívaný na Jihokorejském metrologickém institutu KRISS, funguje na podobném principu, ale místo vzdáleného referenčního *fluxgate* magnetometru používá druhé třiosé cívky a v něm umístěný skalární He-Cesiový magnetometr. Hlavní a pomocné cívky mají stejné konstanty a jsou zapojené v sérii. Stálá složka je odstraněna v obou systémech a poté se kompenzuje pouze střídavá složka rušení.



Obr. 1-14 He-Cs systém kompenzace pro kalibrace etalonů magnetické indukce [převzato [29]]

1.9 Úplná kalibrace magnetometru

V praxi je pro využití magnetometru při přesném určování směru vektoru MP nutná znalost vzájemné orientace magnetického souřadnicového systému a mechanického systému jeho konstrukční krabice, celého zařízení kde je magnetometr umístěn nebo jiného senzoru orientace, například akcelerometru. Problém nalezení vzájemné orientace je v převážné většině případu oddělen od samotné kalibrace a předpokládá tak již kalibrovaný senzor zbavený neortogonalit. Metody se dají rozdělit podle několika kritérií, stejně jako kalibrace mohou být založeny na otáčení magnetometru v ZMP a nebo použití cívkového systému.

1.9.1 V zemském magnetickém poli

Všechny metody využívají otáčení magnetometru podle os jeho vnějšího mechanického s. s. V případě metody odvozené v článku [14] se vychází z předpokladu, že by projekce konstantního vektoru ZMP \mathbf{v}_E do jednotkového vektoru osy otáčení \mathbf{m}_i měla být během otáčení magnetometru konstantní. To lze ve formě rovnice ze skalárního součinu rozepsat jako

$$\mathbf{v}^b \cdot \mathbf{m}_i = (\mathbf{v}^b)^T \mathbf{m}_i = c. \quad (1-25)$$

Ze záznamu vektorů MP během otáčení lze sestavit soustavu rovnic v maticové podobě

$$[\mathbf{v}_1^b \ \mathbf{v}_2^b \ \dots \ \mathbf{v}_N^b]^T \mathbf{m}_i = \mathbf{V}^b \mathbf{m}_i = c \mathbf{1}_{N \times 1}, \quad (1-26)$$

která se vyřeší metodou nejmenších čtverců minimalizující funkci

$$\hat{\mathbf{z}} = \min \|\mathbf{V}^b \mathbf{z} - \mathbf{1}_{N \times 1}\|^2. \quad (1-27)$$

Výsledkem je jednotkový vektor $\hat{\mathbf{m}}_i = \frac{\hat{\mathbf{z}}}{\|\hat{\mathbf{z}}\|}$, představující osu otáčení v souřadnicích vnitřního s. s. V stejném článku [14] je odvozeno i efektivní řešení za pomoci SVD dekompozice. Vstupní data tvoří sada vektorů během kompletních otočení magnetometru kolem jedné jeho mechanické osy, pokud možno co nejvíce rovnoměrně rozložených po kružnici. Úhel otáčení není nutné zaznamenávat, protože je na něm tato kalibrace nezávislá.

Magnetometr je vůči ZMP natočen libovolně, ale nejlépe tak, aby osa kalibračního otáčení byla ideálně kolmá na vektor ZMP, kvůli optimalizaci řešení a minimalizaci nejistot. Postup se opakuje i pro zbylé osy. Pokud pořadí os kalibračních otáček odpovídá vnitřnímu pravotočivému XYZ s. s., pak matice vzájemné orientace je sestavena z vektorů takto

$$\mathbf{M} = [\mathbf{m}_x \ \mathbf{m}_y \ \mathbf{m}_z]^T. \quad (1-28)$$

Obdobná metoda využívající také kompletních otočení magnetometru je popsána v disertační práci [5]. Vektorový magnetometr ve formě kompasu ve válci je kalibrován na teodolitu otáčením v podélné a potom v horizontální azimutální ose. Předpoklad odvození řešení o konstantní projekci je stejný, ale je tam podrobně rozebrán a analyticky odvozen vztah měřených odchylek v závislosti přímo na jednotlivých úhlech vychýlení.

Rozdíl spočívá v iteračním postupu minimalizace funkce odchylek, který funkci minimalizuje přímo v prostoru úhlových vychylek oproti vektorovému prostoru bodů v předchozí metodě. V prvním kroku se minimalizuje výběrová směrodatná odchylka projekce do osy X při otáčení kompasu v podélné ose, která je srovnána do horizontální roviny.

$$\mathbf{b}_i = [\mathbf{A}_{\alpha_{\psi-M}}]^{-1} [\mathbf{B}_{\alpha_{\theta-M}}]^{-1} \mathbf{b}_{\text{raw}} \rightarrow s_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i^N (b_{xi} - \bar{b}_x)^2} \quad (1-29)$$

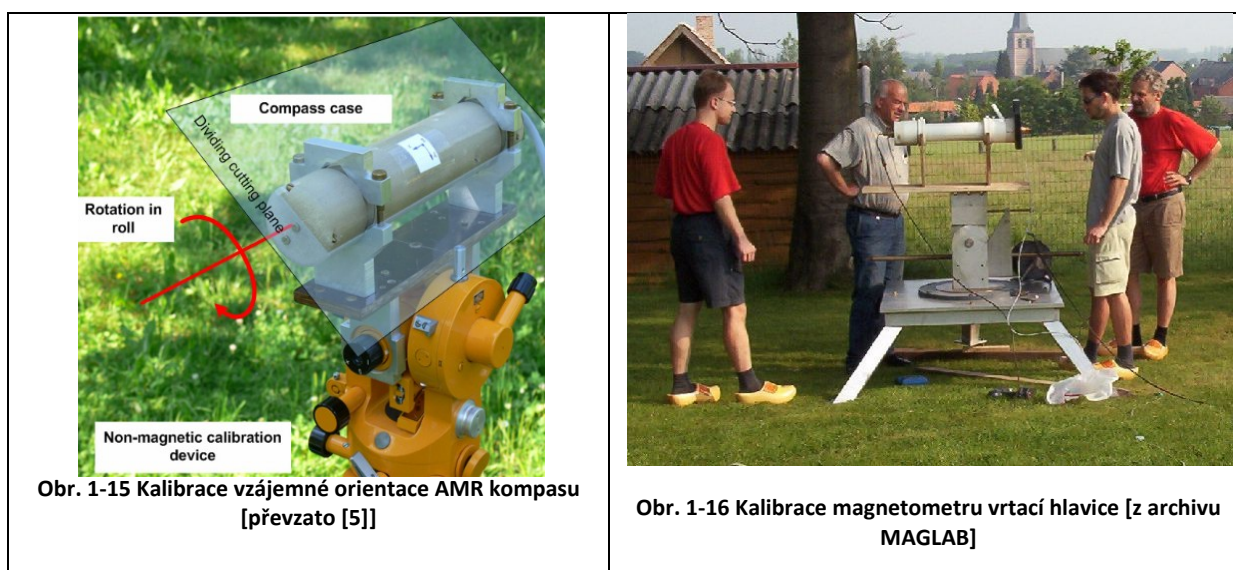
Ve druhém kroku se minimalizuje směrodatná odchylka projekce do osy Z při horizontálním otáčení.

$$\mathbf{b}_i = [\mathbf{B}_\theta]^{-1} [\mathbf{D}_\varphi]^{-1} [\mathbf{A}_{\alpha\psi-M}]^{-1} [\mathbf{B}_{\alpha\theta-M}]^{-1} [\mathbf{D}_{\alpha\varphi-M}]^{-1} \mathbf{b}_{\text{raw}}$$

$$s_z = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i^N (b_{zi} - \bar{b}_z)^2} \quad (1-30)$$

Protože jsou zde navíc omezující podmínky výběru os kalibračních otoček, tak je možné z kalibrace získat i úhly natočení kompasu vůči ZMP (φ roll, θ pitch) vzhledem výchozí poloze. Různé matice v minimalizačních funkcích představují dílčí rotace. Matice vzájemné orientace vnitřního a vnějšího s. s. je získána roznásobením dílčích Eulerových matic \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{D} s úhly α .

Obecně se tyto metody, kromě získání orientace ke krabici magnetometrů a kompasů, používají i pro nalezení vzájemné orientace i pro celé přístroje a zařízení jako jsou naváděné vrtací hlavice, družice apod, viz Obr. 1-15 a Obr. 1-16



Z této oblasti jsou pak k dispozici další metody zmíněné například v článkách [21, 30] pro kalibrace vzájemné orientace družice Astrid 2 k jejímu magnetometru, která je v podstatě totožná s první metodou, ale rozšiřuje ji o znalost intenzity ZMP a místo konstanty je z projekce možné vyjádřit úhel natočení vektoru ZMP vůči ose otáčení.

Velmi podobné metody jsou naznačeny v patentu [31], zároveň tak i alternativní, které využívají jiný způsob otáčení. Místo kompletních kalibračních otoček je měření provedeno pouze ve čtyřech polohách. V jedné výchozí a třech pootočených s apriori zvolenými a známými rotačními maticemi. Typicky pak jde také o rotace podle jednotlivých os vnějšího s. s., ale s prioritou v požadovaném otočení o předem známý úhel. Iterační metoda pak optimalizuje následující rovnice o korekční matici odpovídající matici vzájemné orientace:

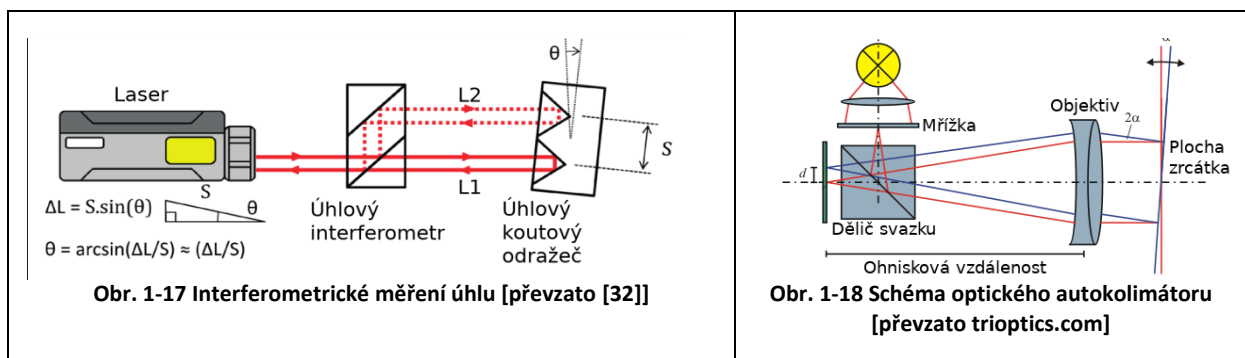
$$\mathbf{b}_x = \mathbf{R}_x \mathbf{R}_k \mathbf{b}_{\text{init}}, \mathbf{b}_y = \mathbf{R}_y \mathbf{R}_k \mathbf{b}_{\text{init}}, \mathbf{b}_z = \mathbf{R}_z \mathbf{R}_k \mathbf{b}_{\text{init}} \quad (1-31)$$

Výhodou je možné využití referenčních konstrukčních ploch magnetometru k provedení definovaných otočení podle jeho hran, bez nutnosti použití teodolitu nebo otočné lavice.

1.9.2 V cívkových systémech

Jak již bylo zmíněno, hlavní výhodou vektorové kalibrace je získání transformační matice rotace vnitřního s. s. na cívkový globální s. s. Řešení úlohy nalezení vzájemné orientace vnitřního a vnějšího s. s. magnetometru v jednom jediném kroku, je možné, pokud se dá ztotožnit jeho vnější systém se systémem cívek, úloha se pak stává triviální, protože hledaná matice je přímo ta získaná výsledkem z vektorové kalibrace uvnitř cívek.

Přesné zaměření k cívkovému systému je zdlouhavé a vyžaduje velmi přesné optické přístroje pro měření úhlové výchylky. Tento postup je využíván například v již zmíněném Finském kalibračním pracovišti Nurmijärvi [27]. K přesnému zaměření používají zrcátka připevněná na povrch konstrukce magnetometru a teodolit s laserem vzdáleným asi 60 m od cívkového systému. Kolimací paprsků je možné z dané vzdálenosti změřit úhel mezi osami s chybou do 0.03° . Pro přesné zaměření z kratší vzdálenosti je možné použít specializovaných přístrojů pro měření malých úhlových výchylek, optický autokolimátor a nebo laserový interferometr.

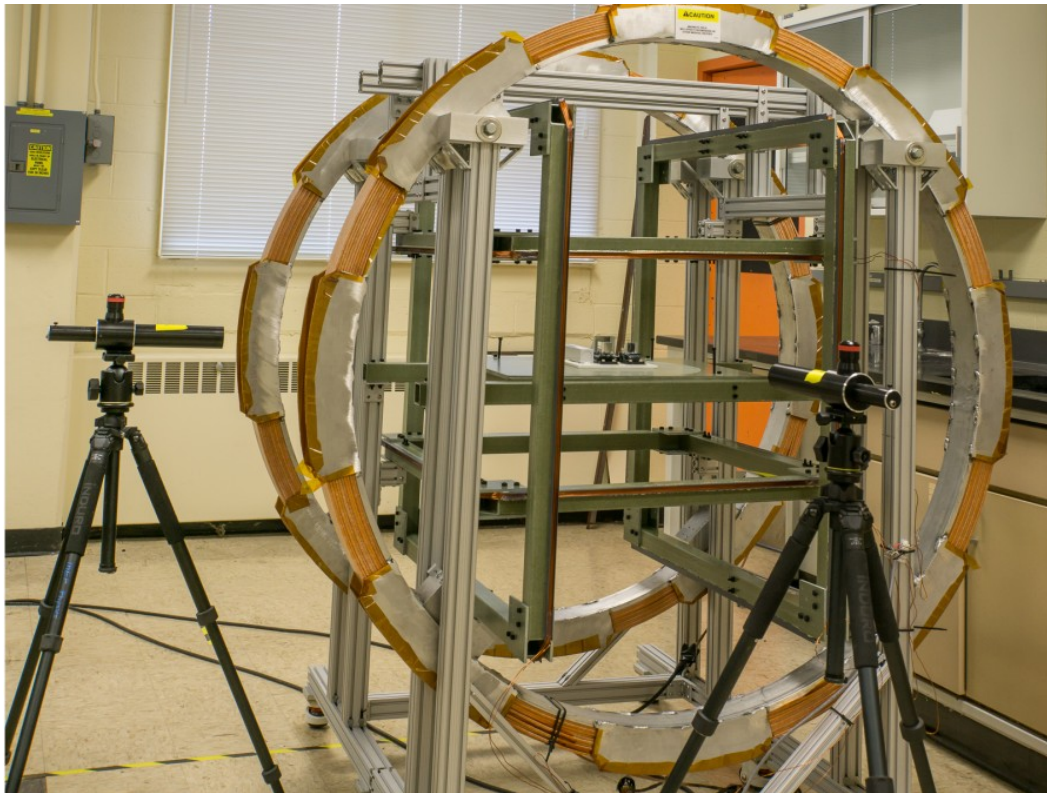


Autokolimátor umožňuje odečtení úhlu pomocí zobrazené stupnice promítané do obrazové roviny, pomocí optického mikrometru [10] a u moderních verzí připojením snímací kamery. Laserový interferometr využívá místo obyčejného zrcátka koutového odražeče (odražený paprsek se vrací po stejné přímce) a skládání paprsků v optickém hranolu. Například systém firmy Renishaw [32], určený primárně pro měření rovinnosti v oblasti strojírenství, umožňuje měření úhlové výchylky s rozlišením až 0.01 úhlové vteřiny.

Obdobný postup se používá při kalibracích v cívkovém systému v *SANSA Space Science* v Hermanusu, JAR, kde se využívá laserový paprsek sesouhlasený - pomocí obdobné metody - s magnetickou osou horizontální cívky ve směru V-Z. Ustavení vnějšího systému magnetometru do cívkového systému probíhá ve dvou krocích, nejprve přesné horizontaci magnetometru (magnetická osa horizontální cívky je ustavena do roviny), v druhém kroku je opět nalepeno zrcátko na čelo magnetometru a ten je sesouhlasen s laserovým paprskem tj. i s magnetickou osou cívkového systému. Takové ustavení je však jen přibližné a podrobný rozbor vlivu na chybu kalibrace nebyl dosud učiněn.

Uvedené postupy slouží pouze k změření relativních úhlů. Ty jsou však pro nalezení úhlů vzájemné orientace vnitřního a vnějšího systému magnetometru, případně i neortogonalit, plně postačující. K úplnému zaměření vůči vnějšímu systému například laboratoře, respektive k vytvoření nového souřadnicového systému, daného polohou zaměřovacích přístrojů je nutné použít alespoň dvojice přístrojů.

Namísto jednoho zrcátka lze na magnetometr připevnit přesný optický hranol (kostičku), ke které je možné zaměřit dva na sebe kolmé zaměřovací přístroje umístěné okolo cívkového systému. Metoda zaměření pomocí dvojice autokolimátorů je uvedena například v článku [33], kde je stručně popsán postup kalibrace.



Obr. 1-19 Zaměření magnetometru pomocí dvou autokolimátorů [převzato [33]]

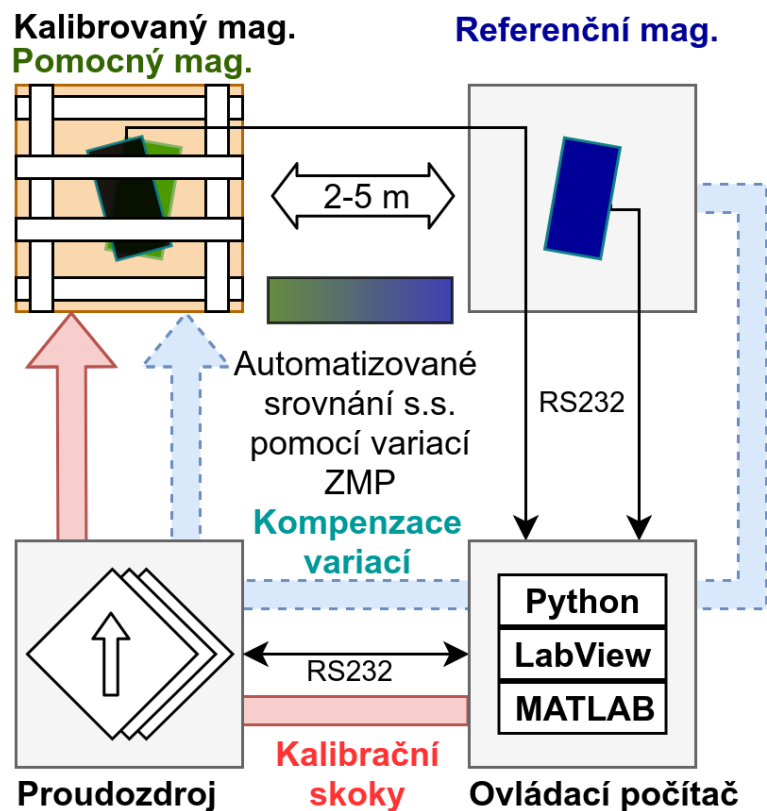
Matici vzájemné orientace je možné také získat pomocí specifického otáčení magnetometru v cívkách (podobně jako u vlastní přístrojové kalibrace systému Billingsley APEX) a kombinací z výsledků cívkové kalibrace. Podobně jako u metod se zaměřením v ZMP, se využívá rotace ve vnějším souřadnicovém systému magnetometru a z rozdílu rotačních matic (cívkového na vnitřní s. s) jednotlivých kalibrací je možné dopočítat vzájemnou orientaci vnitřního s. s. a vnějšího s. s. magnetometru.

Tento postup nalezení vzájemné orientace pomocí specifického otáčení v cívkovém systému sám odvozuji v kapitole 2.6 a také částečně ověřuji provedeným měřením v kapitole 4.9. Teprve při samotném psaní textu této práce jsem znovuobjevil již zmíněný článek [30] o kalibraci magnetometru družice Astrid z roku 2002, kde je popsán a odvozen podobný postup, vycházející ze stejných předpokladů a výpočtů z relativních rotací. K přesnému provedení rotací ale využívá dvojice teodolitů a optického hranolu.

Myslím, že v článku však bohužel není dostatečně explicitně uvedena hlavní výhoda, a to ta, že je možné ustanovit magnetometr k cívkovým osám při prvním kroku měření v libovolné poloze. Při dostatečně rovinných a ortogonálních plochách konstrukce magnetometru tak odpadá nutnost použití optického zaměřování, za cenu možného snížení přesnosti získání matice vzájemné orientace.

2 Návrh vlastního kalibračního systému s kompenzací rušení

V případě magneticky zarušené laboratoře a relativně malých cívek, není vhodná ani jedna uvedená metoda řízení MP uvnitř cívek a je nutné přejít na relativní změny pole. Vstupní data pro vektorovou kalibraci budou vytvářena pomocí relativních skoků magnetického pole se známou velikostí pro všechny složky. Stálá složka ZMP bude pouze hrubě odečtena cívkovým systémem, aby nedocházelo ke kalibraci mimo pracovní bod a také aby mohl být využit celý rozsah měření magnetometru (většinou do 100 μT). Řízení magnetického pole cívkového systému bude obstarávat precizní tříkanálový zdroj proudu a známé převodní konstanty T/A cívkového systému.



Obr. 2-1 Návrh vlastního kompenzačního cívkového systému

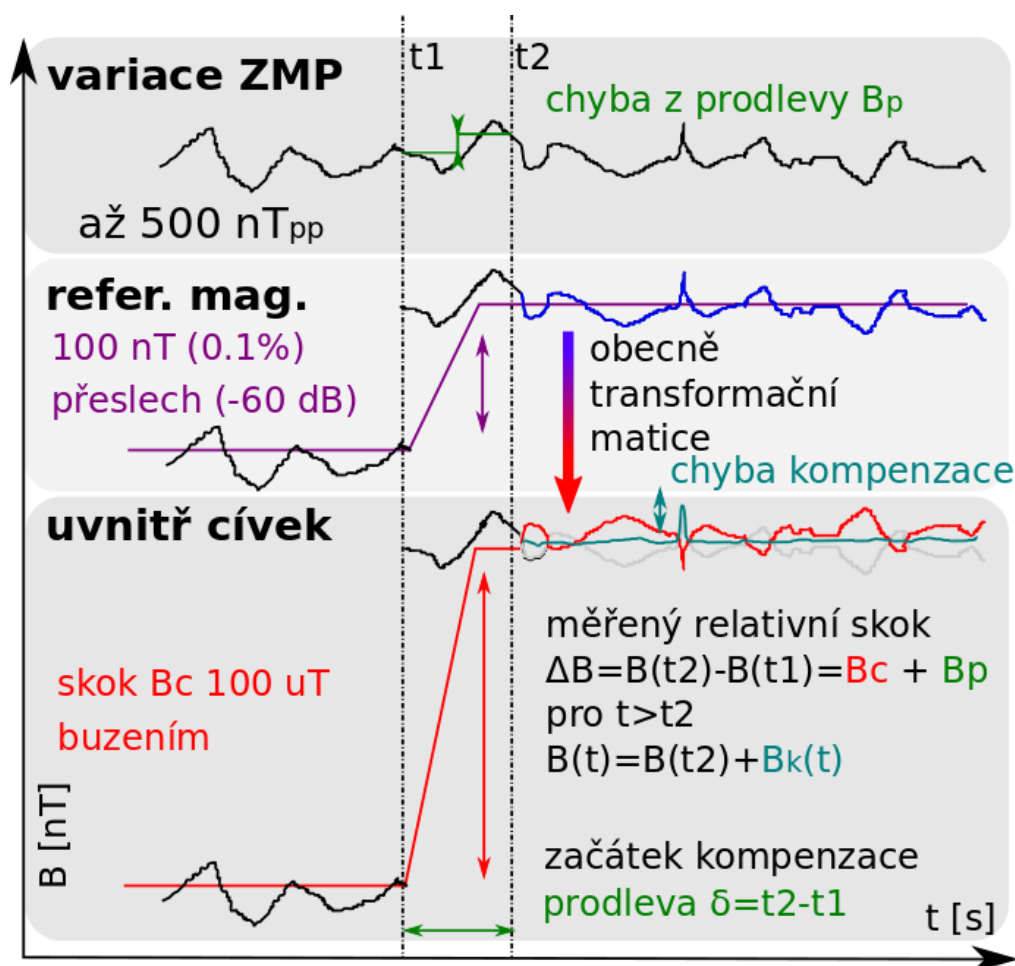
V navrhované nové metodě bude rušení MP kompenzováno daty z referenčního magnetometru v blízkosti cívkového systému, což zajistí dostatečnou homogenitu rušení a jeho vykompenzovatelnost – viz Obr. 2-1. Je však nutné správně navrhnout systém řízení, aby nedocházelo k ovlivňování referenčního magnetometru během kalibrací.

Metoda k zjištění vzájemné orientace referenčního senzoru a cívkového systému využívá samotných variací, v tomto konkrétním případě spíše rušení magnetického pole, a to ve výpočtu ze souběžných záznamů MP z referenčního magnetometru a druhého pomocného magnetometru (pomocný magnetometr se před kalibrací nejprve umístí do cívek na místo kalibrovaného magnetometru). Tuto metodu jsem zkoušel implementovat s kolegy již v rámci předmětu týmový projekt. V rámci projektu byl vyvinut základní program v LabView pro testování kompenzace a nalezení vzájemné orientace ref. a pomocného magnetometru, bez implementace samotné cívkové vektorové kalibrace.

Z projektu a dále z mé vlastní přípravy během řešení diplomové práce byly některé dílčí výsledky publikovány v publikaci [34], proto mohou být některé vztahy či obrázky níže uvedené převzaty resp. byly vzorem pro tuto publikaci [34], i pokud tak není vysloveně uvedeno.

2.1 Relativní skoky magnetického pole

Každý bod, resp. vektor odpovídající jednomu bodu na povrchu koule kalibrační sekvence bude realizován relativním skokem excitace cívek. Magnetické pole uvnitř cívek je pak dáno superpozicí ZMP a MP vytvářeného protékajícím proudem cívkami. Natočení MP cívek vůči ZMP, natočení magnetometru vůči cívkám a ani korekce výstupu magnetometru (kalibrační maticí), nejsou pro popis skoků v principu nutné znát, a proto nebudou v popisu pro zjednodušení vyjádřeny. Na obrázku níže je od shora postupně naznačen vývoj variací a rušení ZMP, poté měřené MP pomocí referenčního magnetometru a nakonec superpozice polí uvnitř cívkového systému.



Obr. 2-2 Kalibrační skok MP k vytváření jednoho bodu cívkové kalibrace

Předpokládejme výsledné MP ze superpozice měřené v čase magnetometrem výstupem E vyjádřené pro jednu ze složek

$$E(t) = B_C(t) + B_Z(t) + B_V(t), \quad (2-1)$$

kde B_C je MP excitace, B_Z je stálá dlouhodobá složka ZMP a B_V obecně variace a rušení, potom lze pro rozdíl měření v čase t_1 a t_2 psát

$$E(t_2) - E(t_1) = (B_C(t_2) - B_C(t_1)) + (B_Z(t_2) - B_Z(t_1)) + (B_V(t_2) - B_V(t_1)) \quad (2-2)$$

$$\Delta E(t_{21}) = \Delta B_C(t_{21}) + \Delta B_Z(t_{21}) + \Delta B_V(t_{21}). \quad (2-3)$$

Stálá složka ZMP se odečte ($\Delta B_Z = 0$) a měřená velikost skoku ΔE tak odpovídá skoku excitace ΔB_C a rozdílu variace, resp. rušení ΔB_V .

I v případě magnetometrů s rychlým záznamem (>100 Hz) lze měřený relativní vektor ΔE vyjádřit až po ustálení skoku excitace a hlavně plném ustálení výstupu magnetometru způsobené filtrací surového signálu. Toto nutné zpoždění budu dále značit δt a z něj vzniklou chybu z rozdílu variací B_δ jako chybu z prodlevy. Protože většinu rušení tvoří pomalé změny a δt se pro rychlé magnetometry pohybuje v řádech stovek milisekund, tak B_δ bude relativně k velikosti skoku (vyšší desítky μT) malá a navíc ji lze při mnoha komutacích, jak později ukážu a ověřím, považovat za náhodnou veličinu s normálním rozdělením. K dosažení přesnějšího určení daného vektoru s menší směrodatnou odchylkou tak stačí skoky opakovat a průměrovat. Směrodatná chyba pak, v případě nekorelovaných odchylek, klesá s odmocninou počtu n opakování ($s = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$). V případě opravdu rychlých magnetometrů je možné přejít, z relativních skoků excitace, na excitaci sinusovým signálem a vyhodnocovat velikost odezvy pomocí synchronní detekce a *lock-in* zesilovačů přímo z excitace ve frekvenčním pásmu, tak se dá vliv nekorelovaných variací a rušení ZMP odstranit ještě lépe.

Protože je ale zájem kalibrovat i pomalé (f_c cca 1 Hz), např. observatorní magnetometry s dlouhou dobou ustálení výstupů v řádu desítek sekund (zapříčiněné dlouhým průměrovacím oknem), kde nutné zvětšení prodlevy δt mezi odečtením skoku ΔE citelně zvětšuje směrodatnou odchylku aditivní chyby z prodlevy, z důvodu probíhající změny ZMP, resp. rušení. K tomu navíc zvětšení doby pro odměření jednoho bodu kalibrace výrazně limituje i možný počet jejich opakování a doba nutná k snížení zpět na hodnoty srovnatelné s rychlými magnetometry narůstá nad všechny meze. Stejný případ nastane, pokud použijeme více-dekádové integrační voltmetry pro přesná měření výstupu analogových magnetometrů, kde integrační doba může být až několik sekund pro 7,5 a více míst

S velkým zjednodušením předpokládejme hypotetický příklad, kde rychlý magnetometr umožňuje změřit jeden vektor (relativní skok z nuly a zpět) za sekundu s odchylkou s normálním rozdělením 5 nT a pomalý jeden za 10 sekund s 10nT odchylkou. Pak pro snížení směrodatné chyby určení vektoru na 1 nT stačí rychlému magnetometru 25 sekund, ale pomalý by potřeboval více jak 15 minut po provedení dostatečného množství průměrů.

Jedinou alternativou tak je kompenzace variací a rušení cívkovým systémem. K tomu bude sloužit výše uvedený rychlý referenční magnetometr umístěný v laboratoři mimo cívky. Změny pole měřené referenčním magnetometrem budou po zajištění správné orientace prostřednictvím počítače zapisovány do řízeného proudového zdroje cívek, tak aby uvnitř cívek došlo k minimalizaci variací a rušení. Řízení zdroje proudu podle rušení bude zatím v režimu otevřené smyčky, bez tvarování nebo predikcí, pouze po transformaci předem získanou transformační maticí.

Relativní skoky je nutné zavést také z důvodu malé vzdálenosti cívkového systému a referenčního magnetometru, kde excitace cívek zasahuje do měření magnetometru velmi citelně a není tak možné počítat relativní vstup *open-loop* kompenzace v průběhu celé kalibrace vztažené k počátečním hodnotám.

Krátce po provedení skoku bude vždy spuštěna kompenzace s novými parametry, resp. aktuální hodnotou pole, vůči které se budou dále počítat změny zapisované do cívkového systému. Jinými slovy, již během ustalování pomalého magnetometru bude spuštěna kompenzace rušení díky datům z rychlého referenčního magnetometru.

Neodstraní se sice doba nutná pro ustálení pomalého magnetometru, ale velikost chyby z prodlevy bude, v ideálním případě alespoň totožná, jako v případě kalibrace rychlého magnetometru. Neideální případ, mimo chybu prodlevy vzniklou při skoku excitace, tak bude ovlivňovat ještě účinnost, resp. chyba kompenzace rušení, která může být způsobena nedokonalým zaměřením souřadnicových systémů, gradientním rušením anebo zpožděním kompenzační smyčky.

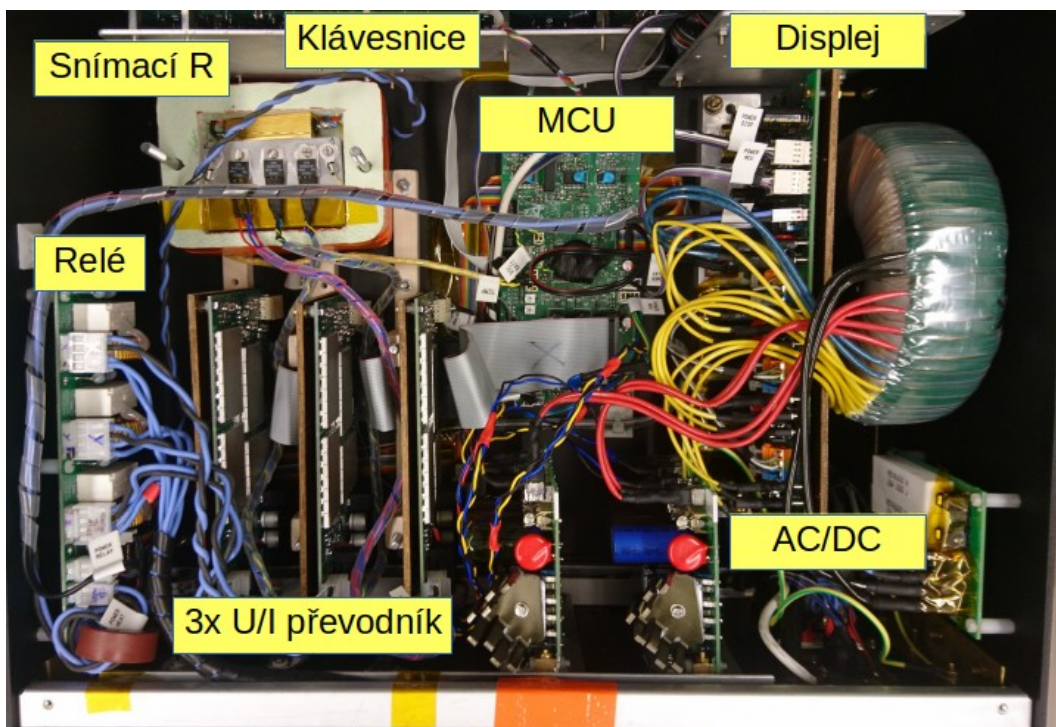
2.2 Použitý hardware

2.2.1 Proudový zdroj MAGLAB

Řízení cívkového systému zajišťuje 20bitový tříkanálový zdroj konstantního proudu, jehož návrh a částečná realizace (osazený pouze jeden kanál) je popsána v mé bakalářské práci [35]. Hlavní vlastnosti zdroje jsou:

- Rozsah ± 1 A (do 25 V) s rozlišením 2 μ A.
- Nezávislé kanály s galvanickým oddělením (víceodbočkové trafo)
- Zdroje proudu tvoří U/I převodník s výkonovými operačními zesilovači OPA544
- Nastavení výstupního proudu zajišťují 20bitové DAC AD5791
- Linearita nastaveného proudu lepší jak 10 ppm v celém rozsahu
- Nízký teplotní koeficient díky teplotní stabilizaci
- Mikroprocesorové řízení na platformě STM32

Z důvodu původních záměrů byl zdroj navržen primárně jako stejnosměrný s důrazem na vysokou přesnost. Kromě fyzických omezení rychlosti nastavení proudu daných elektrickým zapojením je rychlost přeběhu omezena ve firmware z důvodu omezení napěťových špiček na indukčnosti cívkového systému.

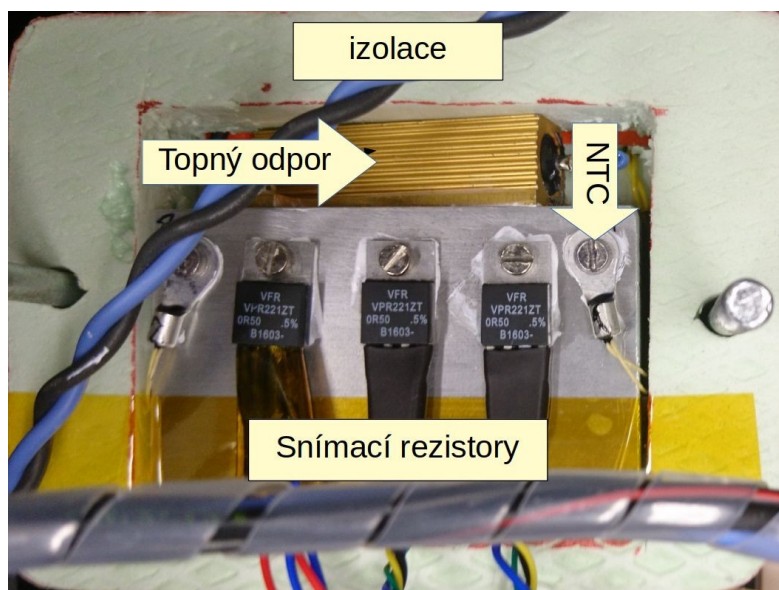


Obr. 2-3 Proudový zdroj MAGLAB částečně realizovaný v mé BP [35]

V rámci řešení DP jsem provedl revizi DPS pro zbylé dva kanály, osadil je komponenty, ověřil dosažené parametry a zkompletoval hardwarové zapojení celého přístroje.

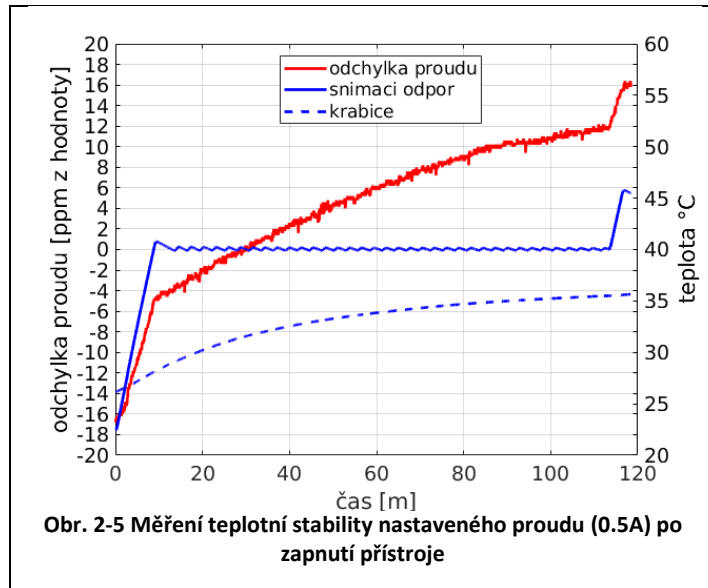
V bakalářské práci popsáný problém s teplotním koeficientem proudu byl způsoben nedopatřením se zapomenutým prokovem na DPS, který spojoval výkonovou a analogovou zem na nevhodném místě a vytvářel zemní smyčku. Původní verze obsahovala ve zpětné vazbě převodníku napětí na proud 1 Ω rezistor s teplotním koeficientem 2 ppm/K. I po výměně za 0.5 Ω rezistor s 0.2 ppm/K ale výstupní proud stále vykazoval teplotní závislost až 30 ppm/K. Po odhalení a odstranění chyby, viz výše, došlo k zlepšení a teplotní závislost se snížila na cca 1 ppm/K.

I přes výrazné snížení závislosti byla do přístroje přidána teplotní stabilizace snímacích rezistorů použitých ve zpětné vazbě převodníku. Rezistory jsou společně umístěny uvnitř polystyrenového obalu na bloku hliníku, který je termostatován na teplotu 40 °C.



Obr. 2-4 Detail teplotně stabilizovaných snímacích rezistorů VISHAY VPR221ZT

To dále zlepšuje teplotní stabilitu a přináší výhodou kratší doby nutné pro ustálení po zapnutí přístroje. Doba potřebná k dosažení termostatované teploty je pod 10 minut a jednoduchá ON/OFF regulace drží nastavenou teplotu v rozsahu ± 0.5 °C.



Obr. 2-5 Měření teplotní stability nastaveného proudu (0.5A) po zapnutí přístroje

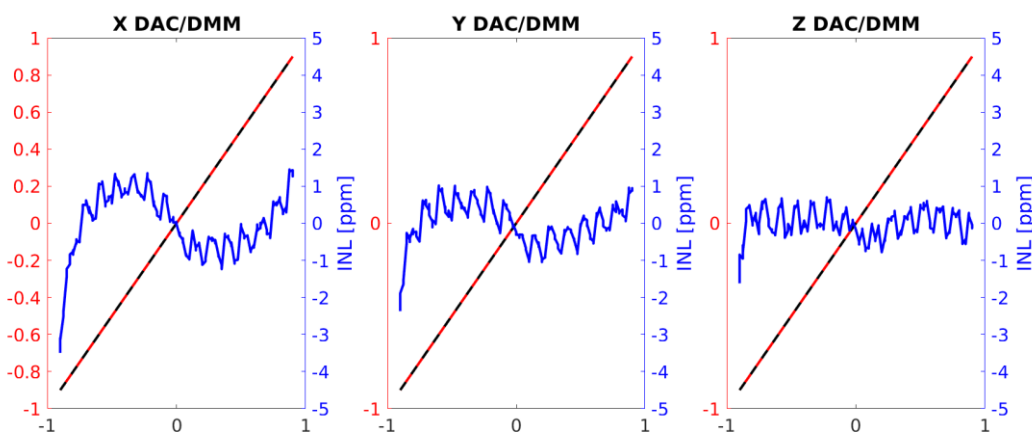


Obr. 2-6 1Ω manganinový bočník

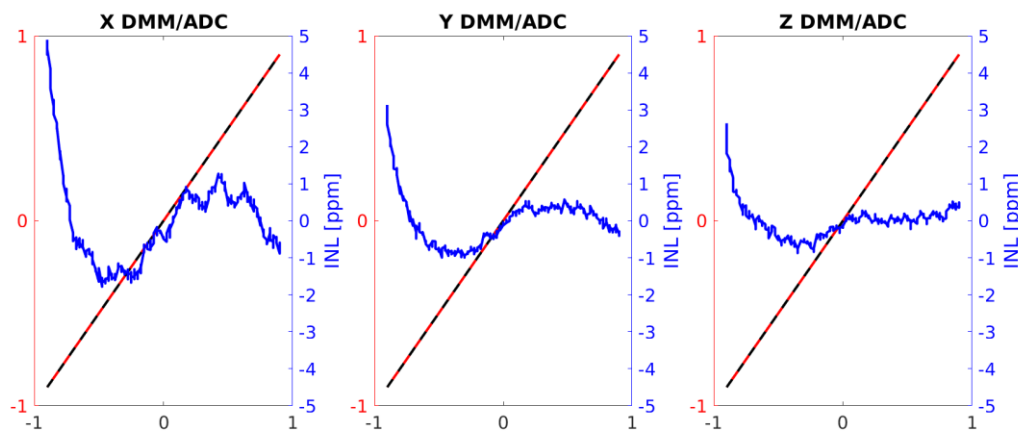
Odchylka proudu je počítána z měření úbytku napětí na externím manganinovém 1Ω bočníku výrobce METRA ponořeném v oleji. Bočník byl navázán na 1Ω odporový etalon skupiny METLAB (P321 výrobce ЗИП s nejistotou $\pm 5 \mu\Omega$ při $k=2$) pomocí poměrové metody. Úbytek napětí na bočníku METRA byl měřen pomocí vyhřátého 7.5 místného integračního voltmetru Solartron 7071. V záznamu na Obr. 2-5 je stále vidět nepatrný drift i při stabilizovaných snímacích rezistorech. Jedná se o kombinaci driftu měřícího bočníku (teplota nebyla monitorována) a elektroniky uvnitř přístrojové krabice.

Celková teplota uvnitř zařízení ale není tak silně závislá na nastaveném výstupním proudu, jako by byla teplota snímacích rezistorů bez stabilizace, a nepředstavuje tak zásadní problém. Během 120 minut se odchylka pohybuje v rozmezí do 20 ppm z hodnoty 0.5 A (resp. z rozsahu výstupu ± 1 A do 5 ppm).

Ihned po zprovoznění teplotní stabilizace a dokončení zbylých kanálů jsem provedl kalibraci zařízení a získané koeficienty zapsal do firmware přístroje. Měření bylo provedeno se stejným bočníkem a 7.5 místným multimetrem Keithley K2001. Nelinearita nastaveného proudu na všech kanálech je v rozmezí ± 2 ppm z rozsahu.



Zvlnění v grafu nelinearity je kvantování DA převodníku. LSB vychází 2 μ A neboli 1 ppm z rozsahu 2 A. Na následujícím grafu, ve kterém je vykreslena nelinearita kontrolního měření samostatným 32bitovým AD převodníkem (součást elektroniky každého kanálu), již toto zvlnění není patrné.



Nelinearita kontrolního měření vnitřním AD převodníkem je ± 5 ppm z rozsahu.

Kalibrační koeficienty DAC/DMM			Kalibrační koeficienty DMM/ADC		
	Citlivost	Offset [μ V]		Citlivost	Offset [μ V]
X	1,0001046	-52	X	0,9998956	-28,8
Y	1,0000662	-100	Y	1,0000025	205
Z	0,9998726	-26,5	Z	1,0000853	-6,1

Tab. 1 Koeficienty kalibrace proudového zdroje MAGLAB

2.2.2 Dostupné cívkové systémy a jejich umístění

2.2.2.1 Průhonický systém

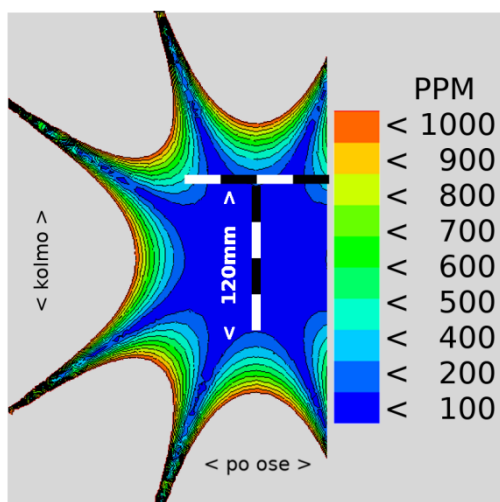
Skupina MAGLAB může pro své kalibrace využívat jednu z budov bývalé geofyzikální observatoře v Průhonicích ve vlastnictví AV ČR. Převážně dřevěná budova je umístěna v zámeckém parku a v letech 1946-1976 byla observatoř součástí sdružení INTERMAGNET. Důvodem ukončení činnosti je otevření blízkého úseku dálnice D1 (1978), linky metra C (1980) a s tím související zvýšení magnetického rušení v oblasti.



Obr. 2-7 Variace a rušení intenzity MP v Průhonicích [převzato [16]]

Uvnitř využívané budovy jsou v současné době umístěny tříosé cívky HELM-3 od firmy Billingsley. Každá z os je tvořena dvojicí čtvercových Helmholtzových cívek s hranou přibližně 1 m. V dřevěné konstrukci okolo jsou navinuty další tříosé cívky typu Braunbek [7] s rozměrem cca 2 m pro hrubou kompenzaci ZMP (cívky Braunbek původně sloužily pro systém MAVACS).

Velikost homogenní oblasti do odchylky 100 ppm z hodnoty MP ve středu cívek HELM-3 je přibližně koule o průměru 10 cm (do 3000 ppm $d=20\text{cm}$). K zobrazení oblasti jsem využil simulace v programu ANSYS. K tomuto cívkovému systému vlastní skupina MAGLAB zpětnovazební řídicí systém APEX-CS s referenčním vektorovým magnetometrem uvnitř cívek.



Obr. 2-8 Homogenita 1m čtvercových cívek HELM-3



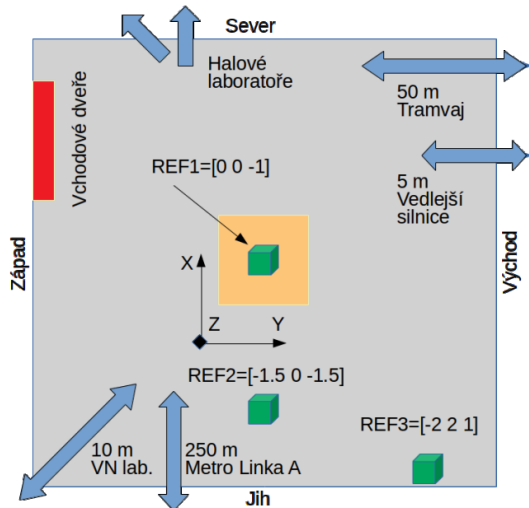
Obr. 2-9 Cívkový systém Billingsley HELM-3

Ve vedlejší budově se nachází původní 2m cívkový systém na skleněné konstrukci, který je řízený systémem MAVACS viz kapitola 1.8 a využívá se pro paleomagnetický výzkum hornin.

Přestože je lokalita relativně dostupná, nehodí se pro velmi časté experimenty při vývoji, u kterých není kladen důraz na nejvyšší dosaženou přesnost a je nutné je velmi často opakovat. Lokalita se používá pouze pro občasnou skalární kalibraci magnetometrů s využitím zemského pole.

2.2.2.2 Cívkový systém halové laboratoře Dejvice

Ve skupině MAGLAB byly navrženy a vyrobeny tříosé cívky [36], které jsou umístěny v místnosti číslo F1-17 u halových laboratoří ČVUT FEL. Vzhledem k tomu, že jde o laboratoř, která je asi nejbližší tramvajové trase ze všech jiných možných laboratoří, tak se jedná o nejméně vhodné prostory pro kalibrace, zároveň však o nevhodnější prostory pro testování kompenzace rušení MP.



Obr. 2-10 Rozmístění prvků v laboratoři a vzdálenosti k hlavním zdrojům rušení



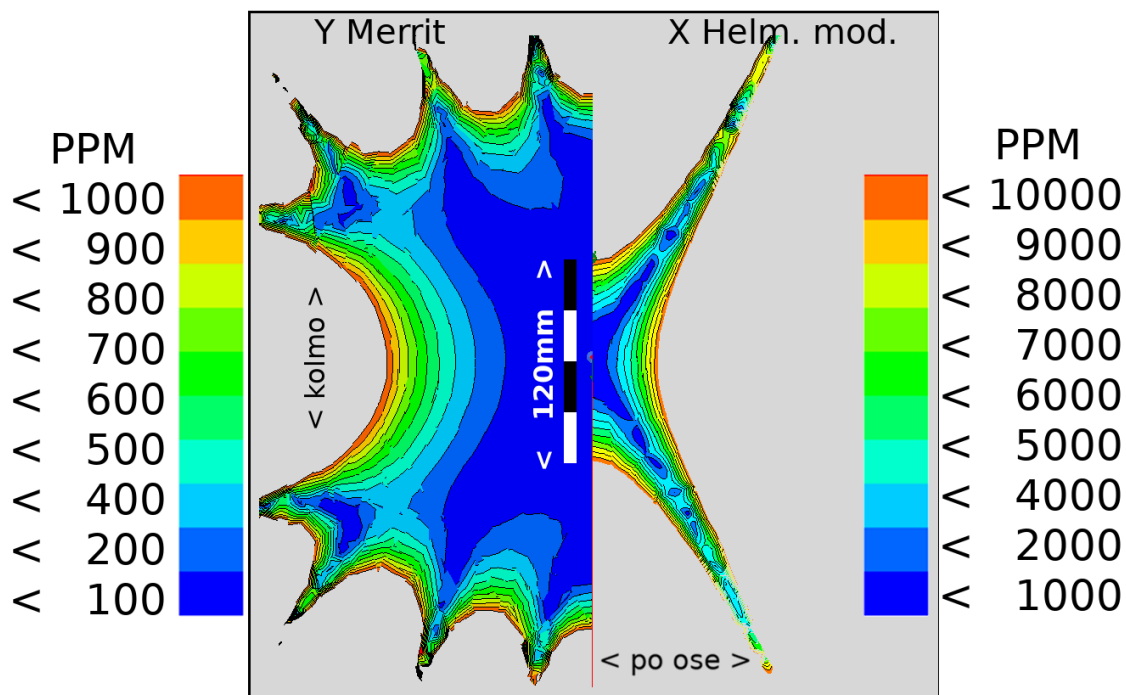
Obr. 2-11 Konstrukce tříosých cívek MAGLAB

Hlavní osu systému tvoří cívky typu Merritt [7] natočené ve V-Z směru, kde je nejmenší složka ZMP. Zbylé dvě osy tvoří Helmholtzovy cívky s modifikovanou roztečí. Modifikovaná rozteč byla kompromisem kvůli usnadnění přístupu do prostoru cívek a to z důvodu původního záměru využívat je i pro měření teplotní závislosti parametrů magnetometrů, kdy by dovnitř cívek byl umístěn termostatovaný box. Homogenní oblast do 1000 ppm pro osu Y je zhruba krychle s hranou 20 cm. V případě os X a Z je ale už ve vzdálenosti 2 cm od osy odchylka 1200 ppm, kvůli nedodržení vhodné rozteče dvojice cívek. To velmi limituje možnost přesné kalibrace, protože většina magnetometrů plánovaných pro testování kalibrace je větší než tato malá homogenní oblast.

čtvercové MAGLAB cívky	X	Y (Merritt)	Z
Rozměr ve světlosti [mm]	674	635	664
cívkové konstanty [T/A]	275,603	404,073	277,527
Rozteč na středy [mm]	525	229 (157)	539

Tab. 2 Parametry čtvercových cívek MAGLAB

Cívkové konstanty jednotlivých cívek byly sice kalibrovány v laboratořích ČMI metodou nukleární magnetické rezonance (nutace) s deklarovanou rozšířenou nejistotou do 100 ppm [37], ale vzhledem k nehomogenitě cívek os X a Z se na ně nelze plně spolehnout. Přesto jsou cívkové konstanty zapsány do firmware (FW) proudového zdroje. Úhly neortogonalit nebyly zatím kalibrovány, ale jejich hodnota se předpokládá do 0.1 °. Jejich skalární kalibraci [18] nelze přímo v laboratoři provést, protože velký gradient ZMP zde znemožňuje měření s dostupnými skalárními magnetometry.

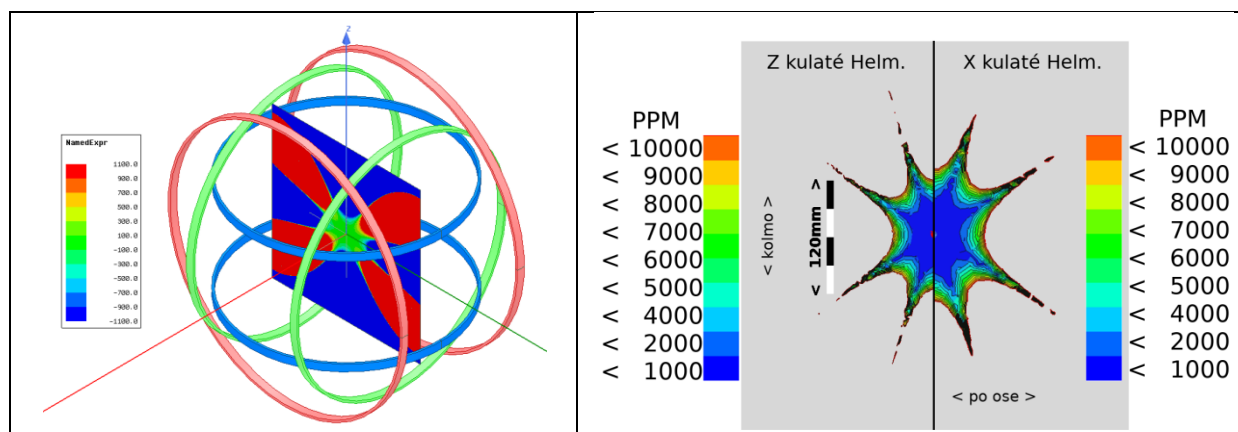


Obr.

2-12 FEM simulace homogenní oblasti MAGLAB cívek pomocí SW ANSYS

2.2.2.3 Nové tříosé Helmholtzovy cívky MAGLAB

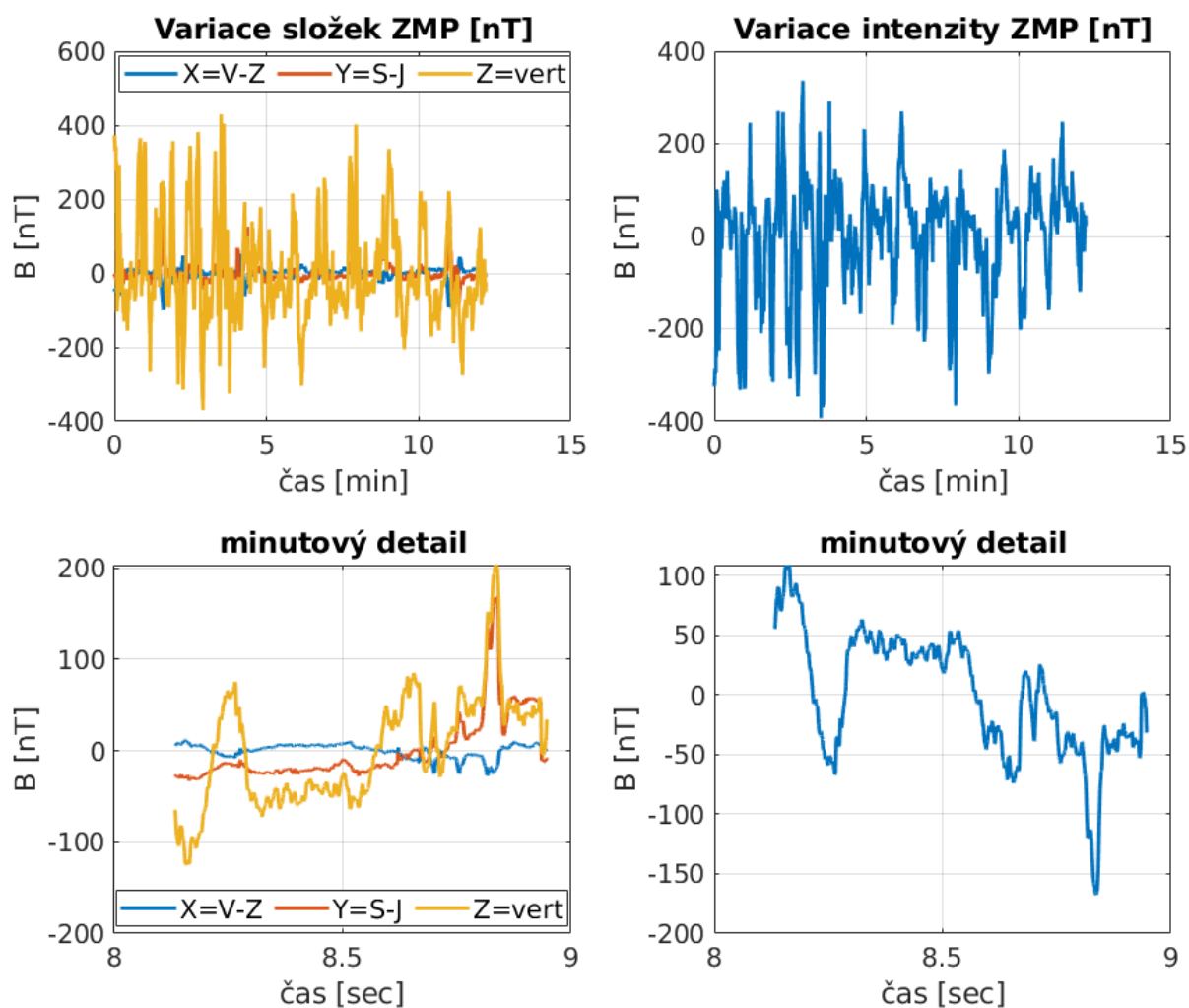
Řešením problému s homogenitou cívek dostupných v Dejvicích by v budoucnosti mohlo být využití nových tříosých kulatých Helmholtzových cívek, které se ve skupině MAGLAB vyrábí k testování plně zpětnovazebního řešení stínění pro jiný projekt (BP Doubrava). V době testování a měření mého systému nebyly cívky hotové, ale uvádím je, protože jsem je použil pro simulaci a porovnání kalibrace pomocí syntetických cívek viz kapitola 3.2. Přestože jsou cívky celkově menší ($r=250-310$ mm), tak díky správné rozteči je velikost 1000 ppm homogenní oblasti alespoň 5 cm i pro nejmenší z cívek.



Obr. 2-13 Tvar a homogenita nových kulatých cívek MAGLAB

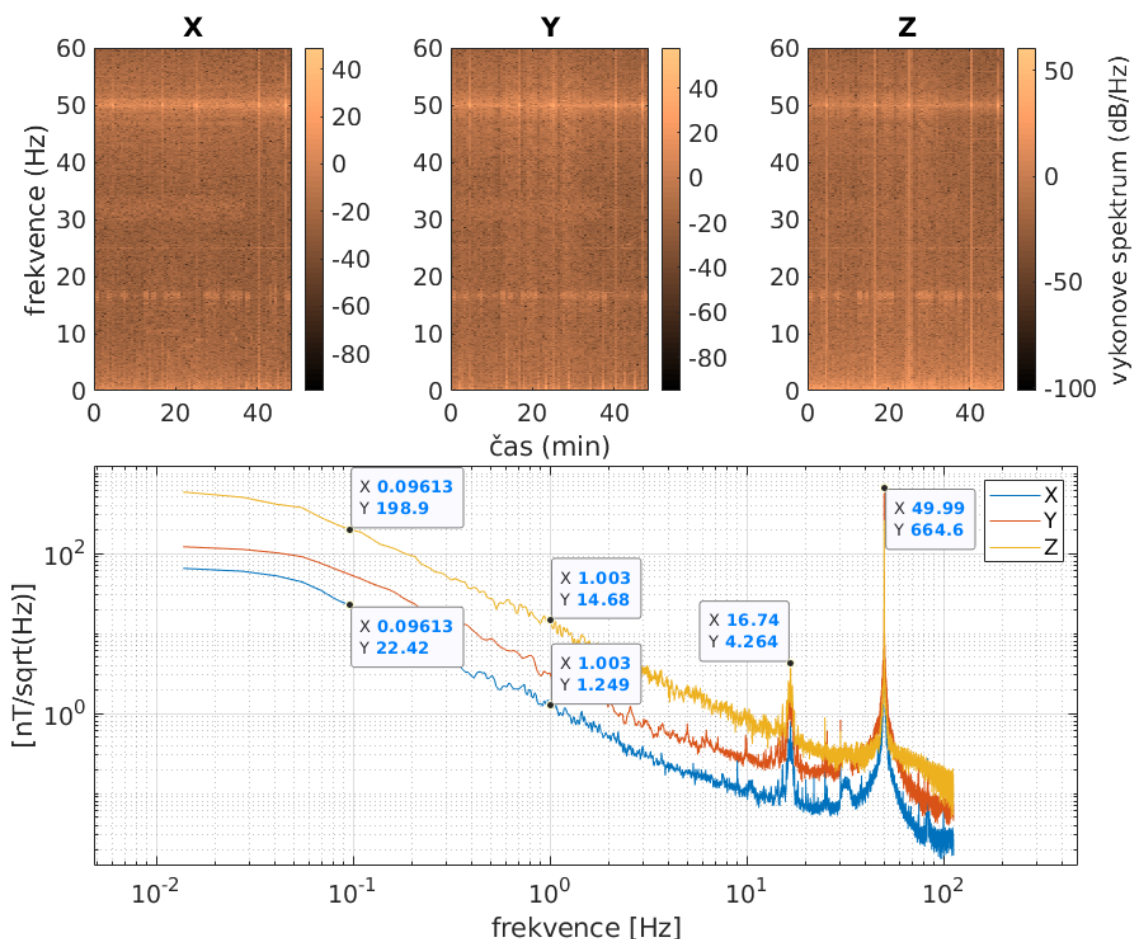
2.3 Charakteristika rušení v laboratoři T2:F1-17

Hlavní zdroj rušení v laboratoři je antropogenního původu. Typickým ukazatelem k odlišení od geomagnetických variací je zřetelně menší velikost horizontální vůči vertikální složce rušení a také rozdíl aktivity mezi dnem a nocí [38]. Z krátkého záznamu ZMP (po odstranění 50 Hz) provedeného přímo v laboratoři okolo poledne viz obr. níže, vidíme typické hodnoty rušení až 500 nT_{pp} pro vertikální složku, 250 nT_{pp} pro S-J složku a 100 nT_{pp} V-Z složku. Variace intenzity je o dva řády horší, než v Průhonicích viz Obr. 2-7.



Obr. 2-14 Záznam rušení v laboratoři v časové oblasti, pořízeno 13.02.2019 16:00

Rušení od síťové frekvence 50 Hz je očekávatelné, všudepřítomné a v čase se jeho amplituda výrazně nemění, respektive bude filtrována. Z hodinového záznamu rušení a zobrazení ve spektrální oblasti je vidět ale navíc rušení na 16.6 Hz, které se vyskytuje neperiodicky, ale jeho amplituda je znatelně menší. Jedná se o doplněk k 33.3 Hz na regulačních prvcích nejspíše tramvajů, kde frekvenční měniče pracují při rozjezdu na této frekvenci. Vyšší harmonické v grafu zanedbávám. Zbylé rušení se dá ve spektru charakterizovat pouze jako 1/f šum a i zde je vidět rozdíl jeho velikosti pro jednotlivé složky.



Obř. 2-15 Spektrogramy a odhad šumové amplitudové hustoty (ASD) rušení MP, pořizeno 13. 02. 2019

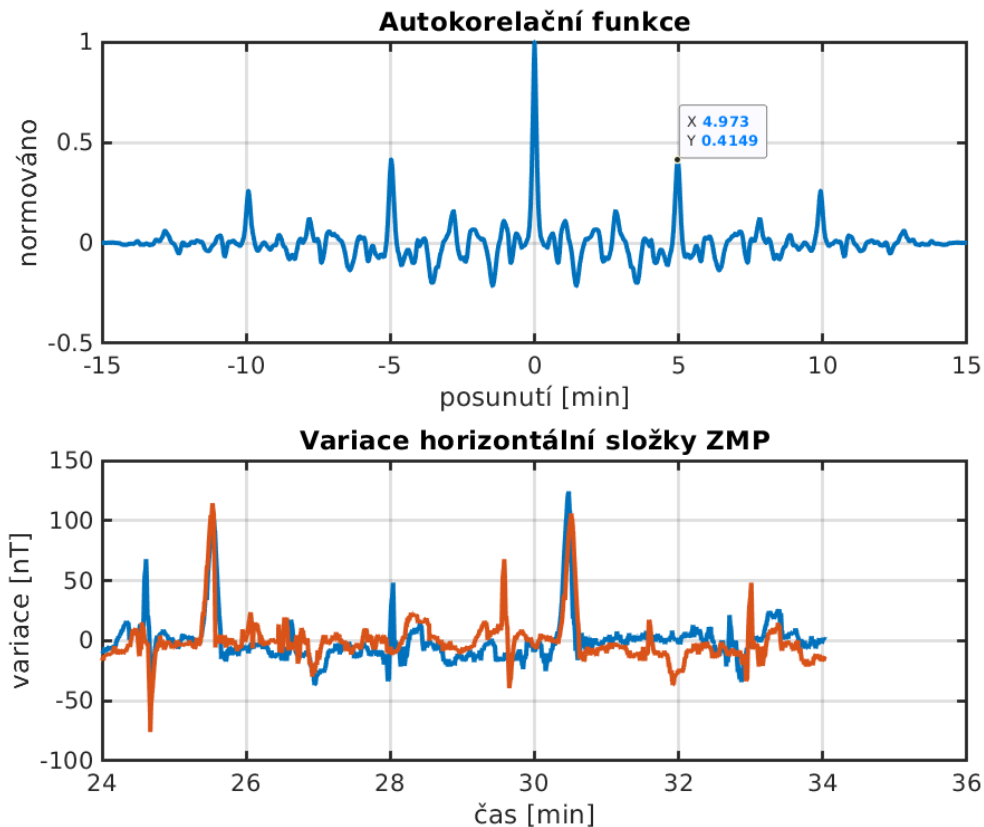
Oba grafy jsou počítané z dat s odstraněnou střední hodnotou. Pro účely dalšího srovnání uvedu i RMS efektivní hodnoty a z nich přepočítané hodnoty špička-špička po integraci, resp. součtu výkonové (PSD) hustoty šumu v rozsahu 0 až 10 Hz. Způsob filtrace plovoucím průměrem bude popsán v kapitole 2.3.2. Uvedený přepočet na špičkové hodnoty je korektní pouze pro bílý šum.

$$b_{RMS} = \sqrt{\sum_{f=0}^{10} PSD(f) df_{bin}} \rightarrow b_{pp} = 6,6b_{rms} \text{ [nT]} \text{ pro } 99,9 \% \text{ času} \quad (2-4)$$

[0 - 10 Hz]	X	Y	Z
nT_{rms} nefiltrováno	42,2	133,7	137,6
nT_{pp} nefiltrováno	278,5	882,2	908,1
nT_{rms} při MVA 120ms	14,6	31,4	127,3
nT_{pp} při MVA 120ms	96,2	207,1	840,4

Tab. 3 Odhad hodnot amplitud šumu (barva šumu zde zanedbána)

Přechodem zpátky do časové oblasti se dá najít periodičita rušení pro jednotlivé složky autokorelací záznamu dat. V horizontálních složkách se s periodou pohybující se okolo pěti minut objevují náhlé skoky rušení, které jsou vůči sobě zřetelně podobné a s velkou jistotou se za jejich původce dá označit blízká tramvaj, případně metro.



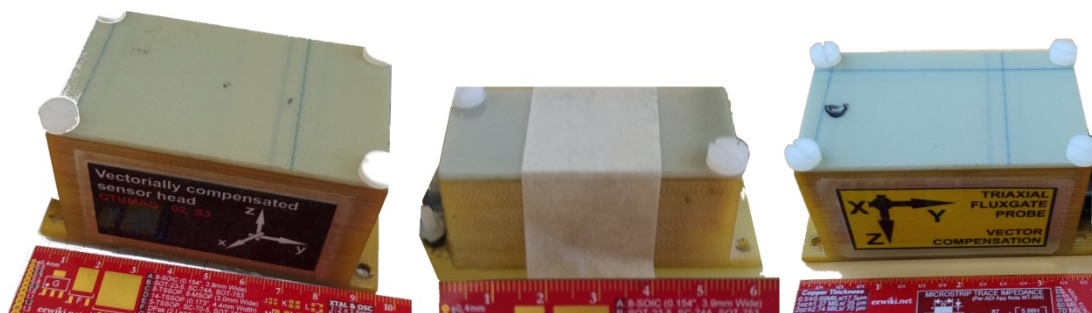
Obr. 2-16 Autokorelace pro nalezení periodicity rušení – horizontální složka, pořízeno 14022019

Ve vertikální složce převažuje téměř výhradně minutová periodičita, ale korelace již není tak významná, tvar rušení si již není podobný a původ periodicity jsem již neurčil. Neperiodické rušení na 16.6 Hz se nezdá být přímo korelováno se skoky v H ani V složce. Pokud by byly k dispozici data o polohách tramvají a vozů metra, případně alespoň zpětně dostupné časové údaje jejich odjezdů a příjezdů ze stanice, pak by šlo korespondující vzorky z kalibrace jednoduše vyřadit. Vynecháním těchto skoků klesne celkové rušení pouze v horizontálních složkách až o řád. Vertikální se nezmění.

Důležitým předpokladem pro homogenní variace a rušení je dostatečná vzdálenost jejich zdrojů. Variace ZMP neantropogenního původu se dají považovat za homogenní v oblasti značně převyšující velikost uvažované laboratoře. Vliv ostatního rušení více rozeberu v kapitole o jeho kompenzaci.

2.3.1 Parametry použitých magnetometrů

Většinu magnetometrů použitých při testování systému tvoří rychlé vektorové *fluxgate* senzory vyrobené a používané ve skupině MAGLAB. Ty byly v rámci DP znovu nakalibrovány skalární metodou v Průhoncích s pomocí rotační platformy a kromě zdroje reference pro kompenzaci variací budou sloužit také jako testované zařízení (DUT) pro vyhodnocení a porovnání získaných parametrů kalibrace. Všechny *fluxgate* magnetometry poskytují digitální data s vzorkovací frekvencí typicky 200 Hz, typ CTUMAG a VECTOR mají hlavici s vektorově kompenzovanou trojicí *ring-core* senzorů [39] a typ FLAT obsahuje hlavici se senzory *race-track*.



Obr. 2-17 Konstrukční krabice z FR4 použitých magnetometrů CTUMAG, FLAT a VECTOR

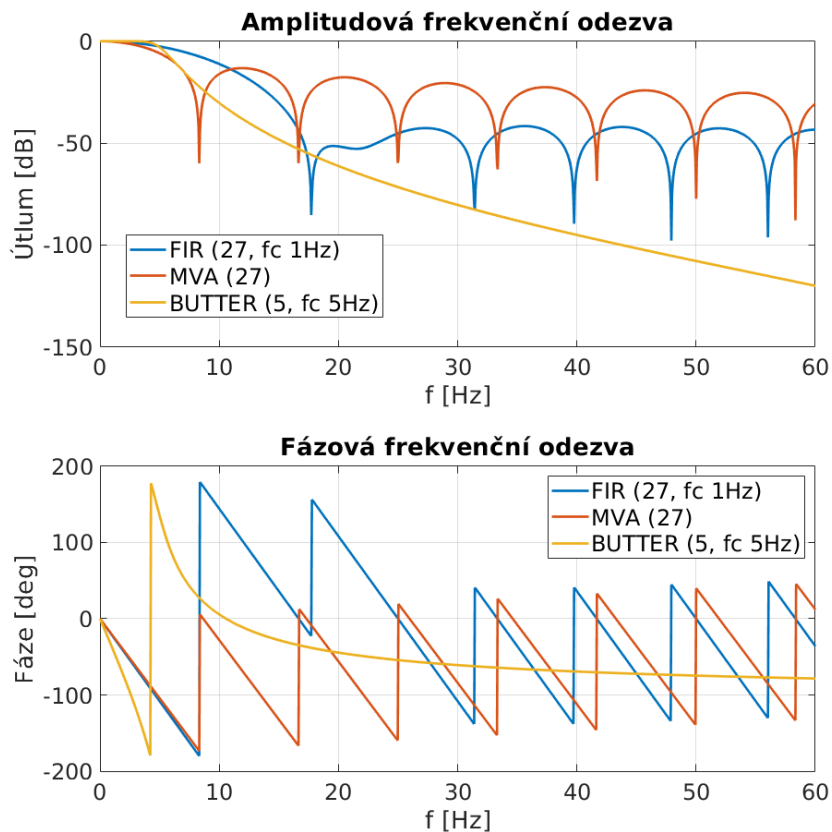
Získané kalibrační matice nejsou zapsány v elektronice magnetometrů a je nutné s nimi počítat při zpracování dat. Vektorově kompenzované magnetometry mají výhodou nižší *cross-field* chyby, ale jejich nutně větší rozměry přináší potíže při umístění do středu homogenní oblasti. Proto budou pro některé experimenty použity magnetometry s AMR (anizotropní magnetorezistence) senzory, konkrétně například digitálně kompenzovaný tříosý AMR magnetometr [40].

VECTOR_Petrucha	X, α	Y, β	Z, γ	Kalibrační matice		
Rozsah		+ - 60 μ T		1,09E-02	0,00E+00	0,00E+00
Citl. [RAW/nT]	91,5365	92,1289	92,2731	7,23E-05	1,09E-02	0,00E+00
Offsety [nT]	164,8	150,19	-55,85	-1,11E-05	-4,76E-05	1,08E-02
Neorto. [deg]	0,379	0,056	0,251	Datum:	leden 2019	
Frekvence	183 sa/s			Offsety [RAW]		
Formát	%f %f %f %f\r			15085,32	13836,43	-5153,19
Rozměry [mm]	100	50	45			
CTUMAG_Petrucha	X, α	Y, β	Z, γ	Kalibrační matice		
Rozsah		+ - 60 μ T		1,02E+00	0,00E+00	0,00E+00
Citl. [RAW/nT]	0,981979	0,988495	0,990082	5,07E-03	1,01E+00	0,00E+00
Offsety [nT]	114,20	91,67	189,76	1,31E-04	3,38E-03	1,01E+00
Neorto. [deg]	0,29	-0,01	-0,19	Datum:	leden 2019	
Frekvence	225 sa/s			Offsety [RAW]		
Formát	>%f %f %f %f\r\n			112,14	90,61	187,88
Rozměry [mm]	100	50	45			
FLAT_Petrucha	X, α	Y, β	Z, γ	Kalibrační matice		
Rozsah		+ - 60 μ T		1,45E-02	0,00E+00	0,00E+00
Citl. [RAW/nT]	68,7616	67,4643	74,4364	2,01E-05	1,48E-02	0,00E+00
Offsety [nT]	-15,96	-47,57	-27,04	1,75E-04	-6,60E-05	1,34E-02
Neorto. [deg]	0,08	-0,69	0,26	Datum:	leden 2019	
Frekvence	183 sa/s			Offsety [RAW]		
Formát	%f %f %f %f\r			-1097,12	-3209,28	-2012,71
Rozměry [mm]	20	50	20			
bez skalární kalibrace	AMR_Novotny			AMR_Grim		
	X, α	Y, β	Z, γ	X, α	Y, β	Z, γ
Rozsah	+ - 100 μ T			+ - 400 μ T		
Citl. [RAW/nT]	0,9983	0,9987	1,0030	1,0103	0,9941	0,9823
Neorto. [deg]	-0,3	0,5	0,7	3,1	1,1	0,8
Frekvence	250 sa/s			50 sa/s		
Formát	%f %f %f %f\r			B1x = %f uT, B1y = %f uT, B1z = %f uT\r n		
Rozměry [mm]	30	30	30	5	5	2

Tab. 4 Parametry použitých magnetometrů

2.3.2 Filtrace digitálních dat z magnetometrů

Kvůli povaze rušení na výstupu magnetometru, kde největší složku tvoří 50 Hz a poté zmíněných 16.6 Hz byl jako neoptimálnější filtr zvolen obyčejný plovoucí průměr s velikostí okna odpovídající násobku periody 20 ms. Nastavené vzorkovací frekvence použitých magnetometrů 225 a 183 Hz, omezují zdola tuto velikost na 40 ms a 60 ms. Za cenu mírného zvýšení prodlevy filtru byl zvolena velikost 120 ms (řády 27 a 22), při které se selektivně potlačí i 16.6 Hz.



Obr. 2-18 Charakteristiky možných filtrů

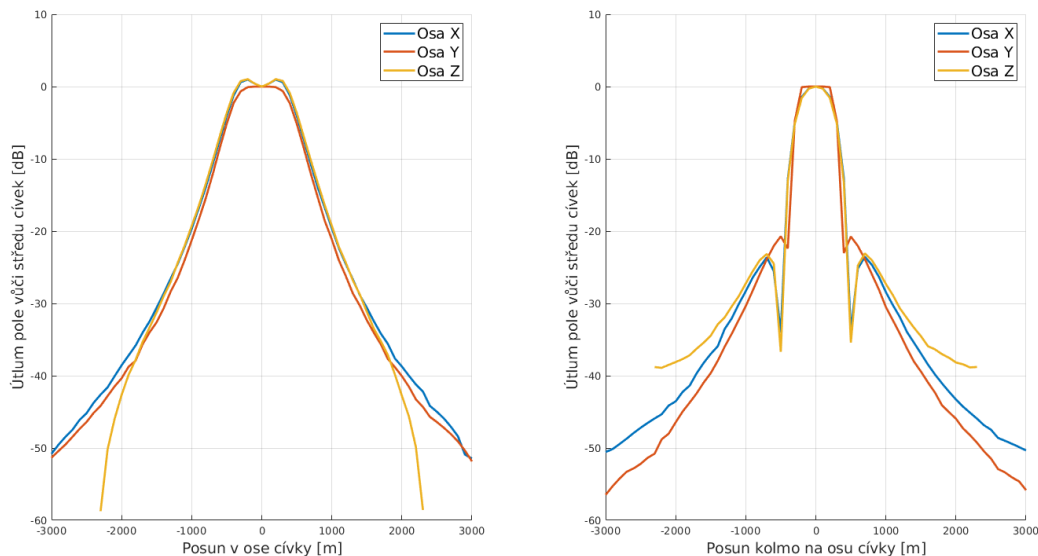
FIR filtr stejného řádu a s mezní frekvencí 1 Hz dosahuje v nepropustném pásmu na 50 Hz menšího útlumu než MVA. Navíc lze MVA filtr při *rekurzivní* variantě realizovat s menším počtem operací a je vhodnější na případnou implementaci do MCU. Filtr typu IIR nebyl zvolen, protože nemusí mít lineární fázi a při metodě k získání matice vzájemné orientace variací může záležet na tvaru propuštěného signálu.

Mimo to je filtrován i výstup delta-sigma AD převodníků vlastní elektroniky magnetometrů, které mají vyšší vzorkovací frekvenci a výstupní data odesílaná po sériové lince jsou tak zpožděná už zde. Skupinové zpoždění u typu ADS1274 (použitým v jednom z magnetometrů) v režimu *high-resolution* dosahuje až 300 ms.

Rekonfigurace převodníků na rychlejší vzorkovací frekvenci je sice možná, ale nebyla provedena. Většinou je výstupní frekvence odvozena od společných hodin řídicí elektroniky, na které může být navázána synchronní detekce a případná změna by mohla způsobit nutnost nové kalibrace. Ve zbytku práce budou, pokud nebude explicitně uvedeno jinak, všechny grafy v časové oblasti i ve spektrální zobrazení již po filtrování plovoucím průměrem.

2.4 Kompenzace rušení MP blízkým referenčním magnetometrem

Umístění referenčního magnetometru je úlohou s dvěma protichůdnými požadavky. Prvním je minimalizace vlivu MP excitace cívek na referenční magnetometr, jenž by měl být umístěn co možná nejdále. Velikost útlumu MP vytvářeného excitací MAGLAB cívek do vnějšího magnetometru je zhruba 40 dB ve vzdálenosti dvou metrů. Zatímco rozsah velikostí skoků kalibrační sekvence je v řádu 10 a 100 μT , velikost variací a rušení je „pouze“ v řádu 100 nT a i 40dB útlum postačuje na přiblížení úrovně prosakování excitace z cívek do magnetometru k hodnotám jen o několik řádů horší, než jsou hodnoty šumového prahu magnetometrů a gradientního rušení. Bližší umístění by především také zanášelo do systému nezanedbatelnou vazbu (uzavřenou) mezi *open-loop* kompenzací pole a jeho referenčním měřeným rušením (zdrojem kompenzace).



Obr. 2-19 Průběh poklesu pronikání pole cívek do vstupu referenčního magnetometru

Opačným požadavkem je minimalizace vlivu gradientního pole co možná nejmenší vzdáleností středu cívkového systému a referenčního magnetometru. Tato dvojice tvoří vlastně gradiometr, jehož velikost báze bude přímo určovat velikost nevykompenzovatelných změn MP.

Například již zmíněné tramvajové trakční vedení je vzdálené 60 metrů a při zjednodušení na horizontálně položený nekonečně dlouhý vodič s proudem, lze velikost jím vytvářeného magnetického pole při proudu 100 A, které se bude v laboratoři projevovat hlavně ve vertikální složce vypočítat jako

$$B(r = 60) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = 400 \text{ nT} \quad (2-5)$$

a následně také pro jeho gradient

$$G(r = 60) = \frac{\partial B}{\partial r} = -\frac{\mu_0 I}{2\pi r^2} = -8 \text{ nT/m}. \quad (2-6)$$

Ve skutečném záznamu se identifikovatelné špičky magnetického pole ale nachází pouze v horizontálních složkách a tak budou způsobeny spíše bludnými proudy, tekoucími pod budovou. Tím spíše je důležité zbytečně nevětšovat vzdálenost senzorů, protože v čase proměnný gradient nepůjde systémem plně kompenzovat.

Z důvodu nehomogenity ZMP způsobené prostředím laboratoře a také různou polohou zdrojů rušení, nemusí být vhodné uvažovat transformaci pouze jako změnu orientace natočením, resp. nemusí plně odpovídat fyzickému natočení systémů a potřebná transformační matice tak nemusí být nutně ortogonální rotační maticí.

Hledání transformační matice je podobné první variantě kalibrace zmíněné v kapitole 1.3. Transformační matice je teoreticky konstantní a samotné variace a rušení umožní její nalezení pomocí řešení přeuročené soustavy rovnic a minimalizace odchylky čtverců. Postup určení této matice uvedu na Obr. 2-20 a popíšu níže.



Obr. 2-20 Postup výpočtu odhadu matice vzájemné orientace variací

Pro automatizované nalezení matice vzhledem k cívkovému systému se použije rychlý pomocný magnetometr (*AUXiliary*), který se umístí do cívek tak, aby byly jeho osy alespoň přibližně sesouhlasené s cívkovým systémem. K tomu lze využít nulování odezvy na kolmé pole a obdobné metody zmíněné v úvodu.

Po hrubém ručním ustanovení referenčního a pomocného magnetometru se uloží krátký cca 15 minutový záznam MP. Uložená data jsou, po aplikaci korekce na neortogonalitu (z kalibrací v Průhonicích) a po filtraci, převzorkována na společnou frekvenci, jednak z důvodu možného použití různých typů magnetometrů, ale i pro případné testování na delších datech, kde i dva zdánlivě stejné magnetometry, mohou mít mírně rozdílnou výstupní frekvenci vzorků. Lišit se ale mohou i podle použité elektroniky zpracování (jiné ADC, jiné filtry, jiná fáze a zpoždění i při stejné výstupní frekvenci). K umístění pomocného magnetometru do cívek je nutný zásah člověka, proto bylo nejdříve spouštění záznamu dat prováděno ručně a případné zpoždění mezi signály se odstranilo pomocí vzájemné korelace. Toto zůstane zachováno i v částečně automatizované verzi, protože i nepatrná časová odchylka může způsobit zvětšení RMS hodnoty reziduí a nemusí se podařit najít optimální řešení.

$$\mathbf{B}_{\text{REF}} \mathbf{T} \equiv \mathbf{B}_{\text{AUX}} \rightarrow \mathbf{T} = \mathbf{B}_{\text{AUX}} \setminus \mathbf{B}_{\text{REF}} \quad (2-7)$$

$$\mathbf{B}_{\text{rezidua}} = \mathbf{B}_{\text{AUX}} - \mathbf{B}_{\text{REF}} \mathbf{T} \quad (2-8)$$

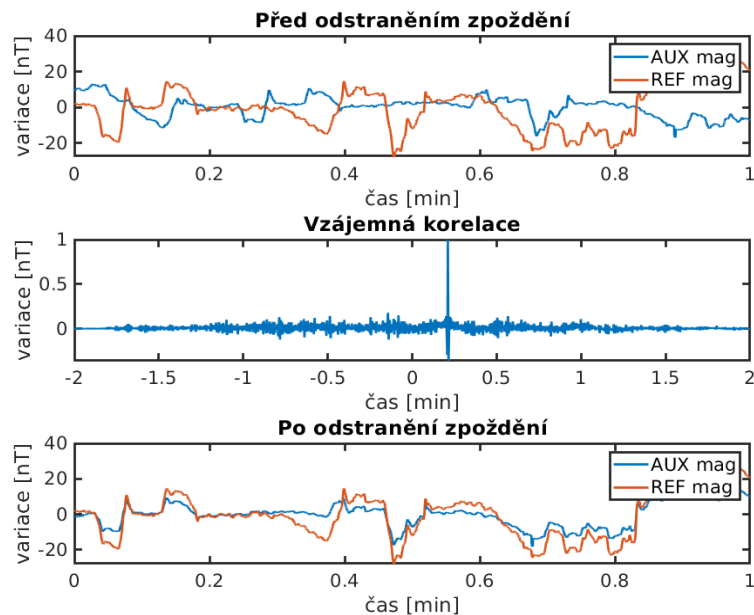
Pokud se před výpočtem neodstraní střední hodnoty ze záznamu, pak dojde k nalezení matice, která sice také na první pohled dokáže transformací odstranit rušení a variace, ale nedosahuje takových výsledků jako matice počítaná pouze z rušení. Vysvětlení tkví v tom, že v prvním případě tj. bez odstraněných středních hodnot, je nalezená matice závislá spíše na stálém gradientu mezi polohou magnetometrů, způsobeným prostředím. Statický gradient v laboratoři je značný a je dán různě umístěnými feromagnetickými objekty (stoly, dveře, židle, přístroje) a železobetonovou konstrukcí budovy. V případě odstranění střední hodnoty, ale získaná matice významněji reprezentuje v čase proměnný gradient, způsobený rozdílnou polohou zdrojů rušení.

Protože se během záznamu projevují i variace a rušení, která zdánlivě vychylují vzájemnou orientaci senzorů, tak je záznam rozdělen na segmenty například po 20 sekundách, pro které jsou zvlášť řešené přeuročené soustavy pro získání transformační matice \mathbf{T} 3×3 . Z těchto více matic je vybrána ta, která nejlépe splňuje zvolenou optimalizační funkci pro celý záznam. Intuitivní možností je minimalizace reziduí mezi daty z AUX magnetometru a transformovanými daty z REF magnetometru. Jiné mohou klást omezující požadavky na tvar matice, jako je determinant blízký se jedné (zachová objem) anebo jednotková velikost sloupcových vektorů (rotační matice).

Matice splňující vybraný *fitness* parametr jsou pak statisticky vyhodnoceny, aby poskytly alespoň nějaké představy o důležitosti přesnosti zaměření, respektive rozptylu nalezených parametrů.

Je nutné si uvědomit, že rušení se pohybuje v řádech stovek nT a případná odchylka o 1° v jedné ose otáčení způsobí chybu maximálně o $\sin(1)$, tedy zhruba jednotky nT (v případě pouhé rotační transformační matice).

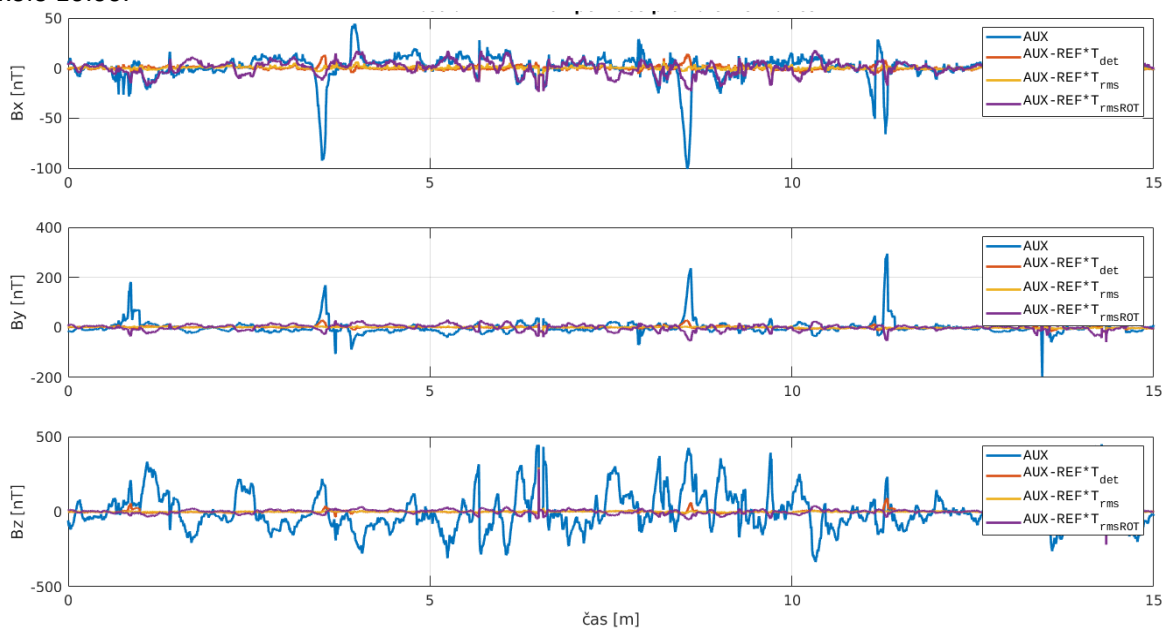
Nalezení zpoždění se spolehlivě povede pro alespoň částečně zarovnanou dvojici magnetometrů, případně je možné postup iterovat se střídavým hledáním vzájemné orientace a adaptivní úpravou zpoždění.



Obr. 2-21 Odstranění zpoždění mezi záznamy z magnetometrů

2.4.1 Ideální kompenzace

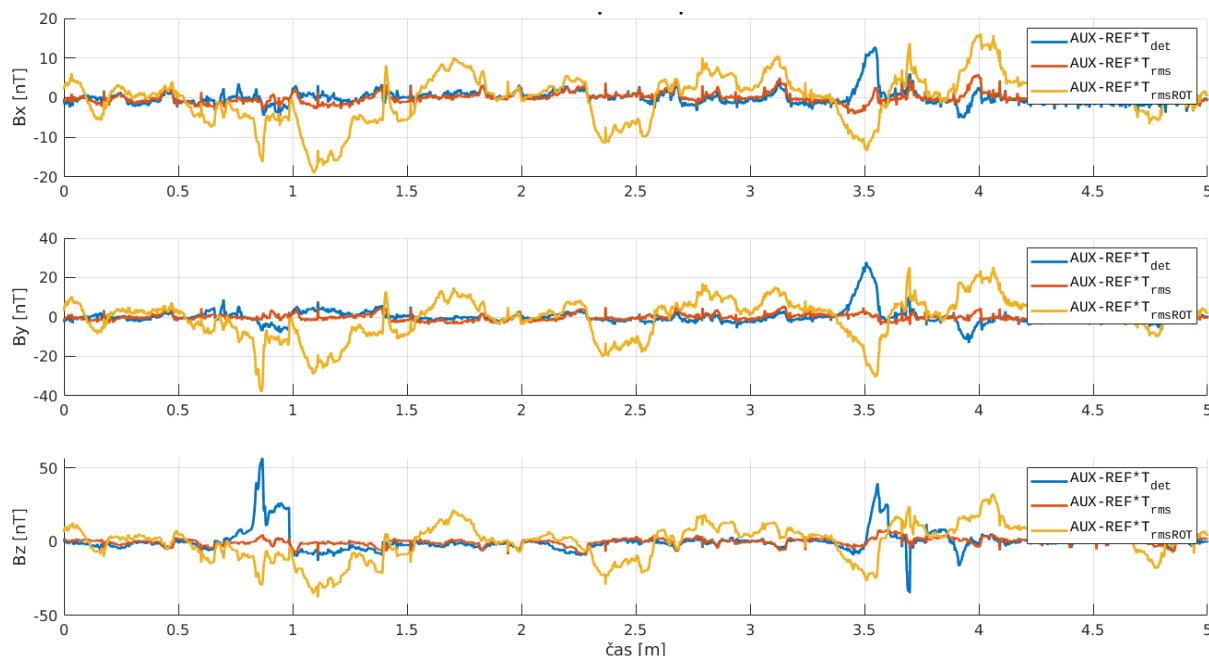
Vybranou matici T lze použít i na delší časový úsek, ze kterého je možné pomocí vyhodnocení reziduí po aplikaci transformovaného pole z referenčního senzoru na pomocný pouhým výpočtem v MATLABu vyhodnotit absolutní dosažitelný limit kompenzace při nulovém zpoždění (odstranění i zpoždění vnitřních ADC elektroniky magnetometru) díky autokorelaci na získaných offline datech. Příklad je uveden níže na datech obdrženy magnetometry CTUMAG a VECTOR dne 13. 02. 2019 okolo 16:00.



Obr. 2-22 Ukázka ideální kompenzace z výsledku výpočtu transformační matice

Zaměřením se na prvních pět minut lze detailněji pozorovat – viz Obr. 2-22 - rozdíl mezi kompenzací maticí získanou různými optimalizačními kritérii: optimalizací na jedničkový determinant (modře), maticí minimalizující rezidua (červeně) a také z této matice extrahované rotační části (žlutě) pomocí SVD dekompozice ze vztahu

$$\mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^T = \text{SVD}(\mathbf{T}_{\text{rms}}) \rightarrow \mathbf{T}_{\text{rmsROT}} = \mathbf{U}\mathbf{V}^T. \quad (2-9)$$



Obr. 2-23 Detail reziduí absolutního limitu kompenzace z obr. 2-22

Vybrané vlastnosti všech tří matic jsou uvedeny v tabulce Tab. 5 spolu se zbytkovým RMSE rušením pro jednotlivé složky vektorového záznamu.

Nejlepšího potlačení dosáhne transformační matice optimalizující rezidua (rotace včetně změny velikosti variací). Aplikací pouhé extrahované rotace dojde k nezanedbatelnému zhoršení výsledků, z čehož plyne důležitost zaměřování referenčního a pomocného magnetometru tímto způsobem. Kromě samotné rotace hrají velkou roli i změny měřítka rušení (gradientní složky), které se dají získat ze singulárních hodnot pomocí SVD. Samotné ruční zarovnání sensorových hlavic by nestačilo. Nechci z toho ale vyvozovat obecný závěr, protože to je dost specifické konkrétní situaci (velikost gradientu, vzdálenost sensorů, absolutní velikost rušení) a je velmi pravděpodobné, že například v Průhonících budou rozdíly mezi jednotlivými metodami zanedbatelnější.

Matice	Singulární hodnoty	Determinant	E.úhly Z"Y'X	RMSExyz [nT]
\mathbf{T}_{det}	1.323;1.048;0.706	0.97900	354.119;353.290;11.255	1.878;3.833;7.227
\mathbf{T}_{rms}	1.194;1.045;0.998	1.24525	3.438;356.978;1.719	1.348;1.616;2.403
$\mathbf{T}_{\text{rmsROT}}$	1.000;1.000;1.000	1.00000	3.438;356.978;1.719	6.112;10.030;11.951

Tab. 5 Vybrané vlastnosti transformačních matic použitých v předešlých grafech

Nadále tak budu používat pouze matici optimalizující rezidua \mathbf{T}_{rms} , tedy rotaci včetně změny měřítka.

2.5 Odhad reálných limitů kompenzace a diskuze vlivu na nejistotu

Před prezentací výsledků ještě stručně uvedu způsob vyhodnocení úspěšnosti kompenzace a na již odměřených datech rušení v laboratoři se pokusím ukázat vliv výše uvedených omezení, jako je prodleva skoku, nepřesně určená matice vzájemné orientace a zpoždění kompenzace. Zdrojem rušení MP pole je nestacionární proces ve střední hodnotě i rozptylu. V určitém přiblížení se proces jeví jako tzv. náhodná procházka, která se ve spektrální oblasti projevuje jako 1/f růžový šum. Ve variacích ZMP se dají najít pouze cyklické stacionarity odpovídající diurnálním a sekulárním změnám, ale to je vzhledem k požadovanému časovému měřítku pro kalibrace nepodstatné.

Naměřením dostatečně dlouhého záznamu si lze vytvořit představu o limitech kompenzace. Samotná kvadratická odchylka (resp. špičkové hodnoty) reziduí po odstranění variací na offline datech ale neříká nic moc užitečného. Pohled na rezidua ve výkonové spektrální hustotě sice ukazuje jasný útlum 1/f šumu, ale těžko se z toho kvantifikuje důsledek na odchylku kalibrace. Další možnosti zpracování leží v časově-frekvenční oblasti, například krátkodobá Fourierova transformace, spektrogramy a vlnková transformace. Tyto transformace jsou sice určeny i na analýzu nestacionárních dat, ale mají uplatnění spíše při hledání a extrakci charakteristických vlastností v signálech a odstranění šumu.

Proto se zaměřím na statistické vlastnosti signálu reziduí, tedy jejich směrodatnou odchylku a histogram. Takováto informace je posléze užitečná pro stanovení nejistoty kalibrace s kompenzačním systémem. Zřejmým problémem s výpočtem směrodatné odchylky u nestacionárního signálu z naměřených dat je měnící se průměr. Obecným postupem v takovém případě je odstranění měnícího se trendu. K tomu je možné zvolit různé postupy jeho odstranění, mezi nejjednodušší patří nalezení a odstranění trendu proložením dat polynomem určitého řádu nebo průměrováním plovoucím průměrem, resp. obecně filtrací.

Hodinový záznam považuji za reprezentativní, co se týče variability rušení během typického dne v laboratoři. Z toho důvodu ho budu dále uvažovat za základní soubor, ze kterého budu vyjadřovat výběrové statistiky a sledovat jejich rozdělení pro různé hodnoty limitů systému. Zvolené statistiky tvoří výběrový průměr a výběrová směrodatná odchylka:

$$\bar{x} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N (x_i)} \quad (2-10)$$

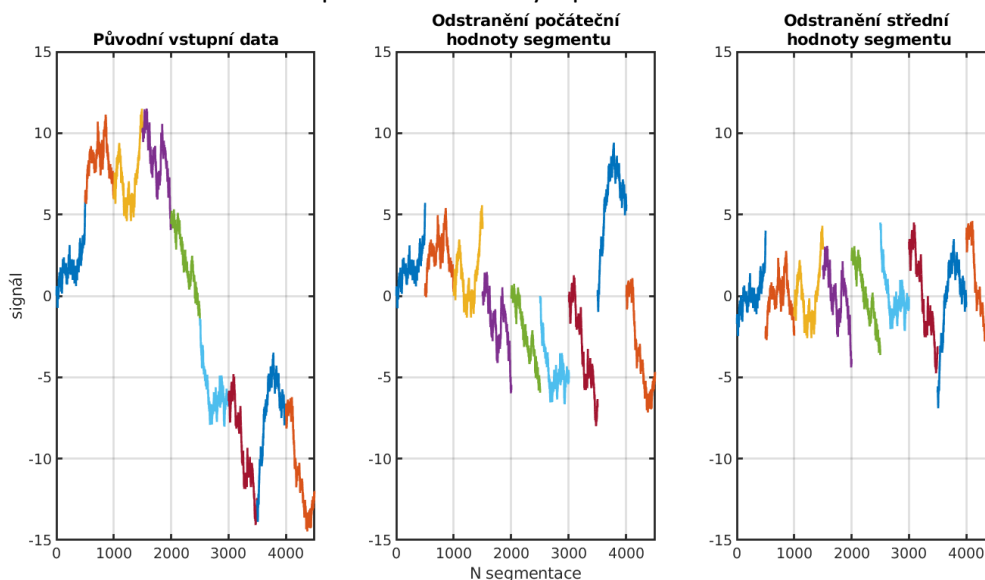
$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (2-11)$$

Velikostí výběrů N vzorků je myšlena délka segmentu, respektive doba jeho trvání v sekundách vzhledem ke vzorkovací frekvenci ($N=f_s \cdot t$).

Na začátku se z celého souboru odečte vypočtená střední hodnota (odstraní se stálá složka ZMP). Následně se v čase rozdělí na segmenty různé délky, aproximující vlastně realizace náhodného výběru, pro které se spočítá výběrový průměr a výběrová směrodatná odchylka. Výběrové rozdělení výběrových průměrů pak může v závislosti na délce (počtu vzorků) výběrového průměru a rozdělení základního souboru aproximovat jeho rozdělení. V případě krátkých segmentů, malého N, se rozdělení výběru přibližuje rozdělení základního souboru. V případě dlouhých segmentů, velké N, vychází výběrové rozdělení normální i pro nenormálně rozdělený základní soubor v důsledku centrální limitní věty. U normálně rozdělených veličin platí známé pravidlo, že výběrová směrodatná odchylka se dá odhadnout vztahem

$$s = \frac{1}{\sqrt{N}} \sigma \quad (2-12)$$

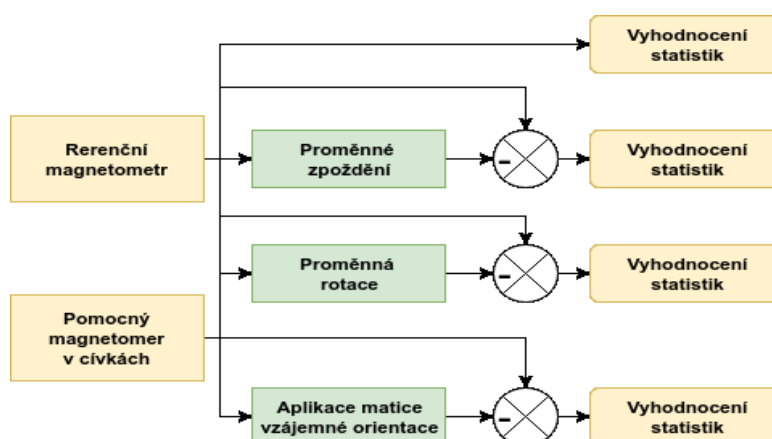
Protože ale při kalibraci budu používat relativní skoky pole, tak se pokusím co nejlépe napodobit způsob kalibrace i na zaznamenaných datech: data rozdělím do krátkých segmentů, kde v každém segmentu dojde k odstranění počáteční hodnoty. Výsledky simulací budu prezentovat zvlášť pro segmentovaná data bez odstranění počáteční hodnoty a poté s odstraněním.



Obr. 2-24 Naznačení způsobů segmentace vstupních dat

Graf v posledním sloupci obrázku výše, kde jsou odstraněné střední hodnoty každého segmentu zvlášť, je pouze teoretický, protože lze provést pouze s offline daty. Prostřední graf s odstraněnými počátečními hodnotami (cože je možné realizovat během kalibrací) je vychýlený právě o odstraněné střední hodnoty, resp. výběrové průměry segmentů, pro která určujeme výběrové rozdělení. Z rozdělení výběrových průměrů odhadnu směrodatnou odchylku měření při dané segmentaci a parametrech kompenzace.

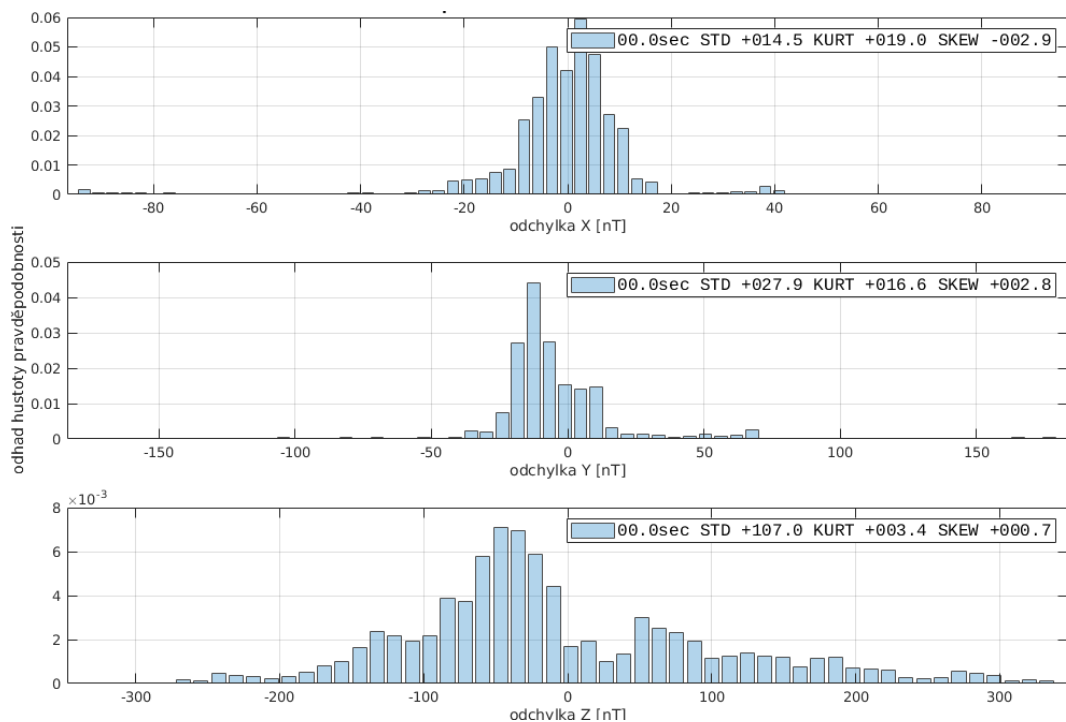
Data pro odhad byla zaznamenána pomocí dvojice magnetometrů CTUMAG a VECTOR v polohách REF1 a REF2. Z Obr. 2-25 jsou zřejmé možná vyhodnocení těchto dat v závislosti na změnách parametrů kompenzace:



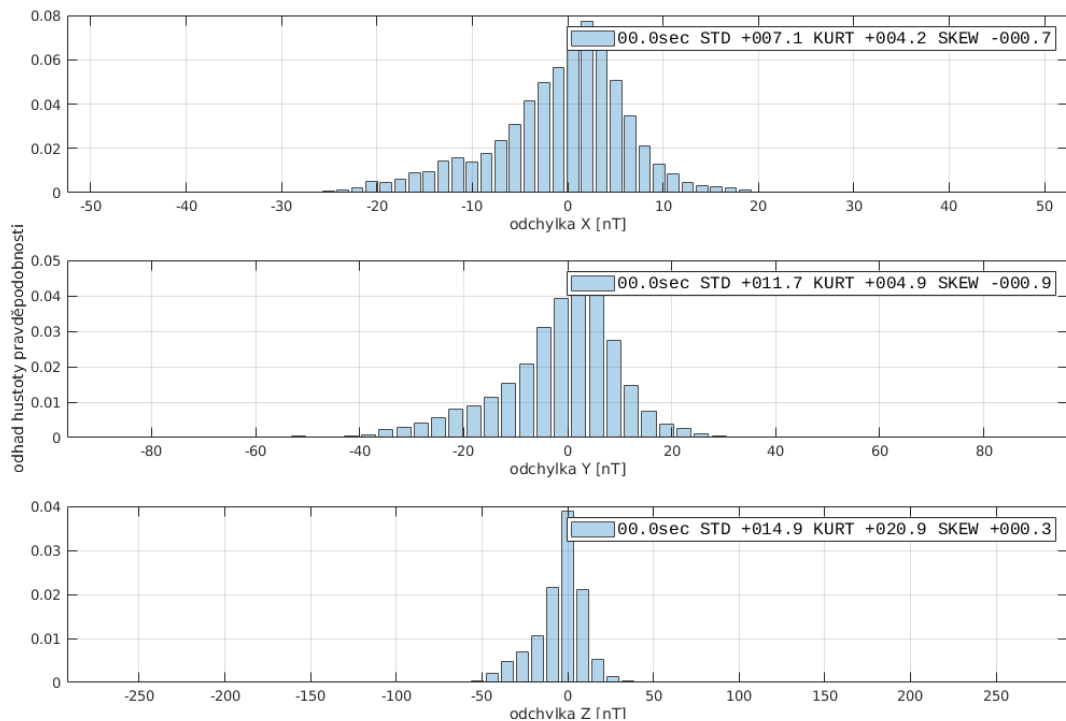
Obr. 2-25 Možné kombinace vyhodnocení limitů

V časové oblasti je krátký úsek záznamu základního souboru pro vstupní data z pomocného (AUX) magnetometru uveden v kapitole 2.3 viz Obr. 2-14. Všechny následující histogramy (resp. odhady hustoty pravděpodobnosti) jsou vytvářeny z delšího, 60 minutového záznamu.

Na Obr. 2-26 je uvedeno nejdříve rozdělení základního souboru (nesegmentovaný 60 minutový záznam z pomocného magnetometru) a na Obr. 2-27 je rozdělení nesegmentovaných reziduí po syntetické kompenzaci záznamem z referenčního magnetometru (po transformaci maticí T_{rms} viz Tab. 5). Chyba daná reálným zpožděním magnetometrů je v tomto případě zanedbávána.



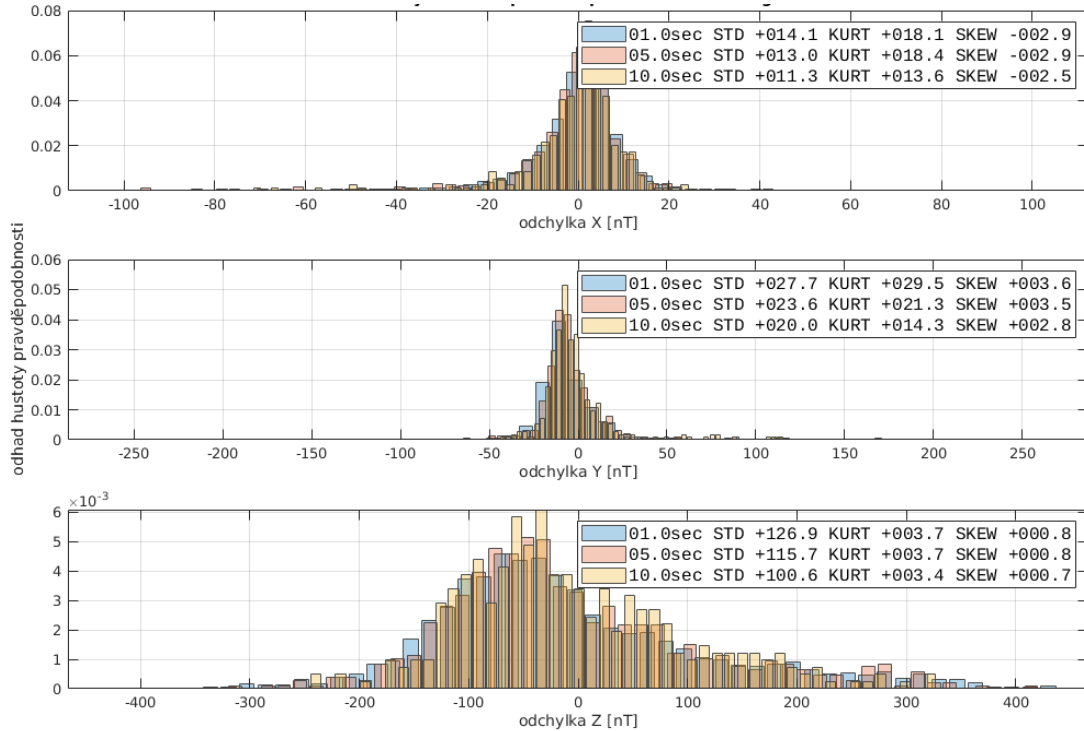
Obr. 2-26 Odhad rozdělení základního souboru původních zarušených dat



Obr. 2-27 Odhad rozdělení po syntetické kompenzaci rušení (AUX-REF* T_{rms})

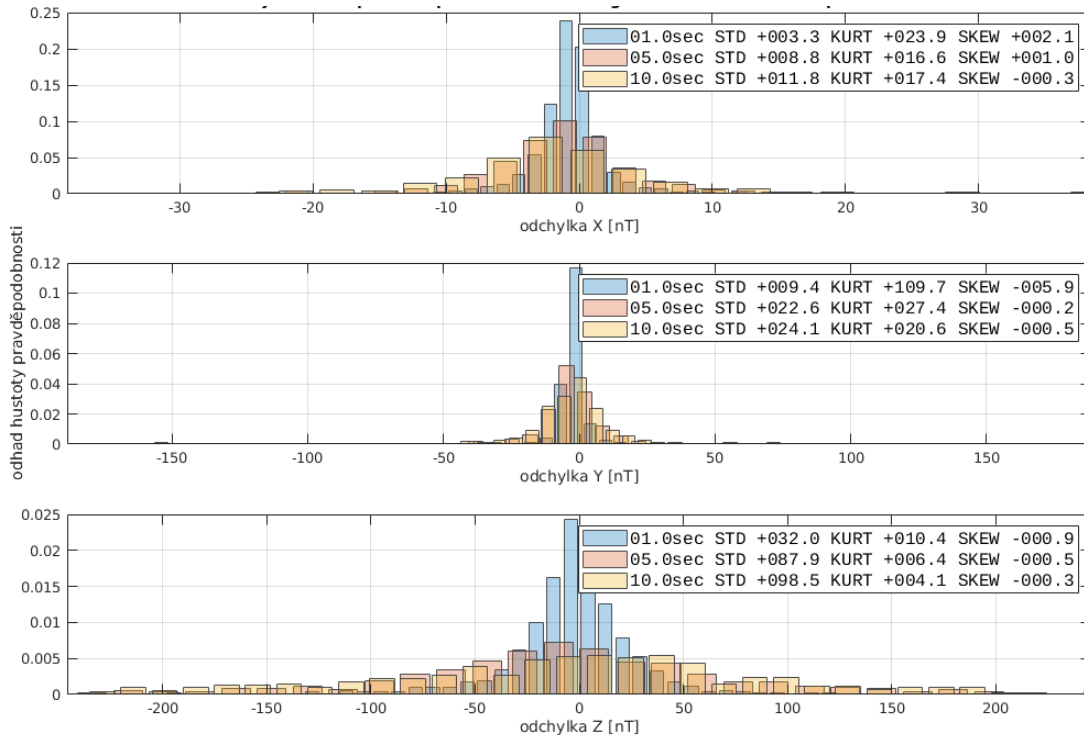
Nevýraznější pokles díky kompenzaci je ve vertikální složce zhruba o řád. V ostatních složkách je i v původních datech STD odchylka poměrně malá a nepůjde to výrazně vylepšit. Nejdůležitější ale je změna tvaru rozdělení viz koeficienty špičatosti KURT a šikmosti SKEW.

Musím upozornit na fakt, že graf rozdělení základního souboru – viz Obr. 2-26 - je mírně zavádějící, protože rozdělení je ovlivněno nestacionaritou procesu. Ve vertikální složce jsou například vidět dva shluky odchylek. Dále tak budu uvažovat segmentovaná data po 1, 5 a 10 sekundách viz Obr. 2-28, čímž se jednak zajistí alespoň částečná kvazistacionarita, ale hlavně segmenty poté odpovídají způsobu kalibrace pomocí relativních skoků v případě kalibrace rychlých magnetometrů viz kap. 2.1.



Obr. 2-28 Rozdělení výběrových průměrů segmentovaných dat bez odstranění počáteční hodnoty

K potlačení nestacionarity dojde, až při odečtení počáteční hodnoty segmentu viz Obr. 2-29.

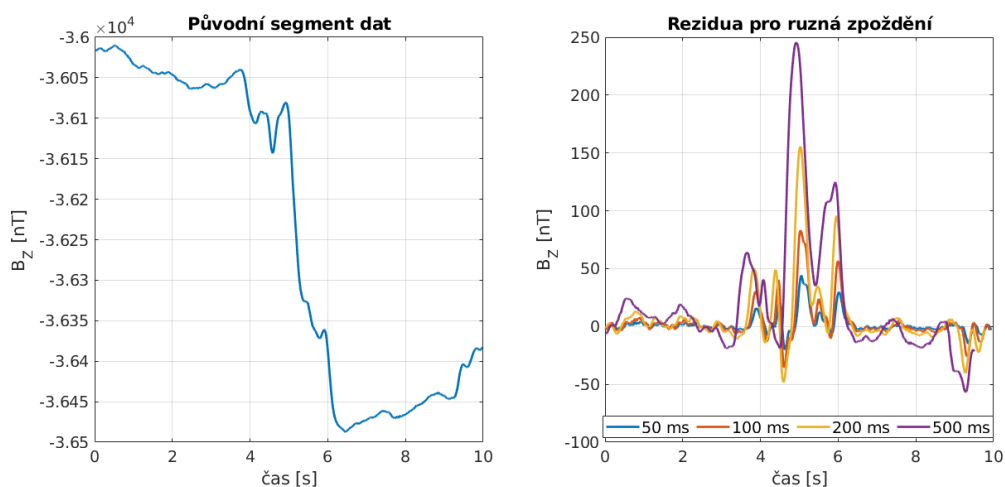


Obr. 2-29 Rozdělení výběrových průměru segmentovaných dat s odstraněním počáteční hodnoty

Pokles výběrové směrodatné odchylky výběrových průměrů kratších segmentů, zřejmý z Obr. 2-29 zde zdůvodňuje možnost provádění kalibrace rychlých magnetometrů (resp. magnetometrů s rychlým a přesným výstupem z A/D převodníků) pouze pomocí rychlých relativních skoků bez kompenzace rušení. Dále pozoruji už jen výběrová rozdělení reziduí během kompenzace, proto již neprovádím odečtení počáteční hodnoty na začátku uvažovaného segmentu.

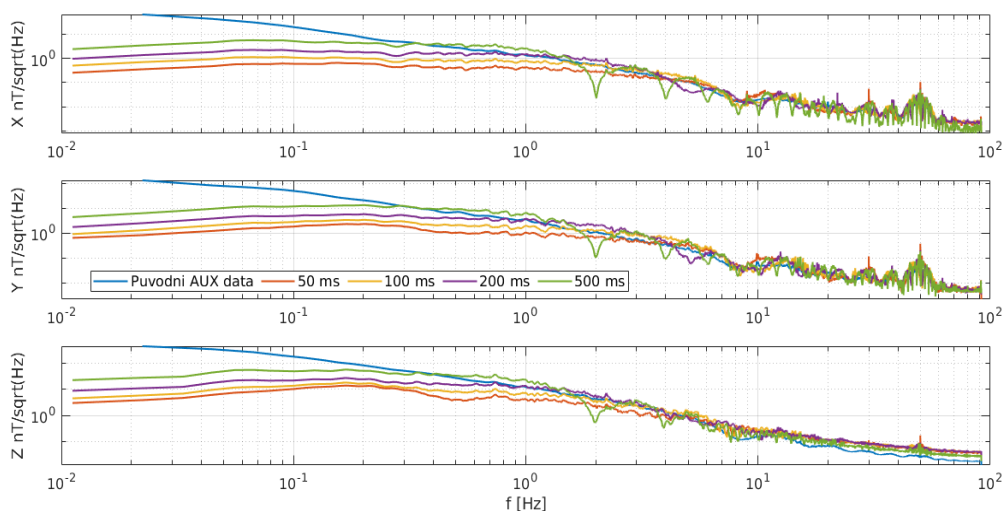
2.5.1 Vliv zpoždění kompenzace

Očekávatelný vliv neideální rychlosti kompenzace budu simulovat součtem signálu se svou vlastní zpožděnou verzí, bez úvahy transformační matice. Jedná se ve své podstatě o filtrování signálu pomocí hřebenového filtru a tak bude vliv zpoždění přímo souviset s velikostí zpoždění (tedy měnící se oblastí konstruktivních a destruktivních oblastí charakteristiky *comb* filtru) a s okamžitou frekvencí rušení.



Obr. 2-30 Odezva hřebenového filtru na změnu pole v časové oblasti pro různá zpoždění

Zpoždění nebude primárně dáno rychlostí proudového zdroje, ale skupinovým zpožděním filtrů referenčního magnetometru viz kapitola 2.3.2. V časové oblasti je příklad uveden na Obr. 2-30, a spektrální amplitudová hustota reziduí vznikající postupně rostoucím zpožděním je uvedena na Obr. 2-31 níže.



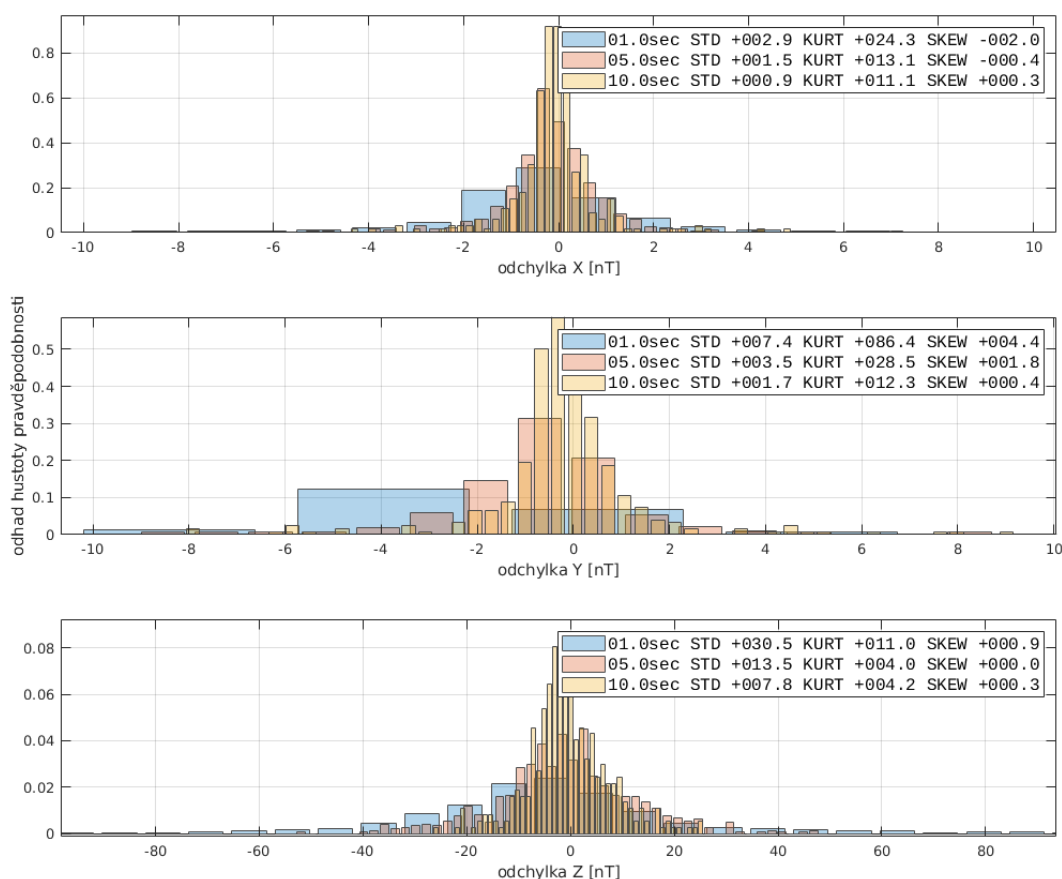
Obr. 2-31 Odhad spektrální amplitudové hustoty reziduí vzniklých zpožděním v závislosti na jeho velikosti

Stejně jako v Tab. 3 uvedu odhad amplitud šumu počítané dle vztahu (1-31). Tentokrát se rozdělení dat již blíží tvarem normálnímu rozdělení viz Obr. 2-32.

[0 - 10 Hz]	X	Y	Z
nT_{rms} původní data	14,61	31,67	120,83
nT_{rms} rezidua 0,05 s	0,87	2,74	15
nT_{rms} rezidua 0,1 s	1,36	3,97	18,44
nT_{rms} rezidua 0,2 s	2,24	6,35	25,88
nT_{rms} rezidua 0,5 s	4,16	11,98	45,35
nT_{pp} původní data	96,46	209,05	797,51
nT_{pp} rezidua 0,05 s	5,77	18,08	98,99
nT_{pp} rezidua 0,1 s	9	26,23	121,67
nT_{pp} rezidua 0,2 s	14,79	41,91	170,8
nT_{pp} rezidua 0,5 s	27,47	79,09	299,34

Tab. 6 Odhady amplitud šumu pro rezidua vzniklá různým zpožděním kompenzace

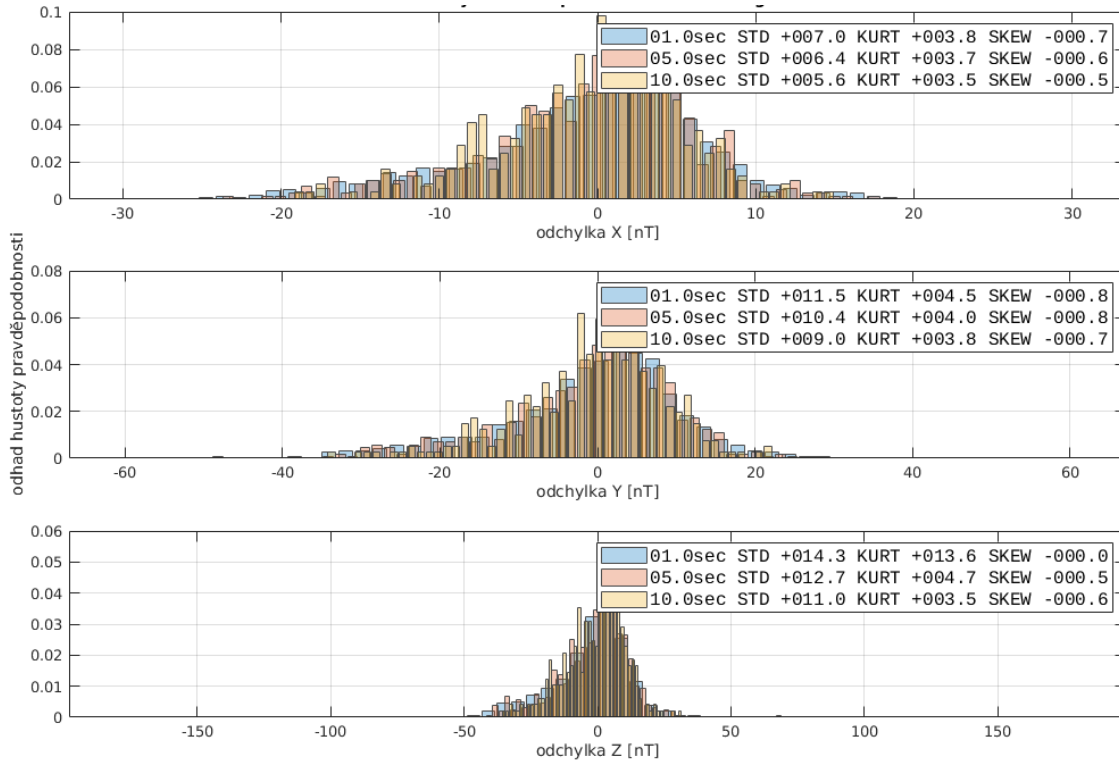
Díky tomu, že hřebenový filtr odstraňuje stejnosměrnou složku – viz Obr. 2-30 - a také že propuštěné náhlé špičky se v záznamu projeví v obou polaritách, jde zmenšit výsledná STD odchylka zvětšením doby průměrování segmentu měření. Snižuje se vliv okrajového efektu, kdy se v segmentu ocitne pouze jedna část rušení (z aktuálního nebo zpožděného signálu).



Obr. 2-32 Rozdělení výběrových průměrů reziduí zpožděného signálu o půl sekundy

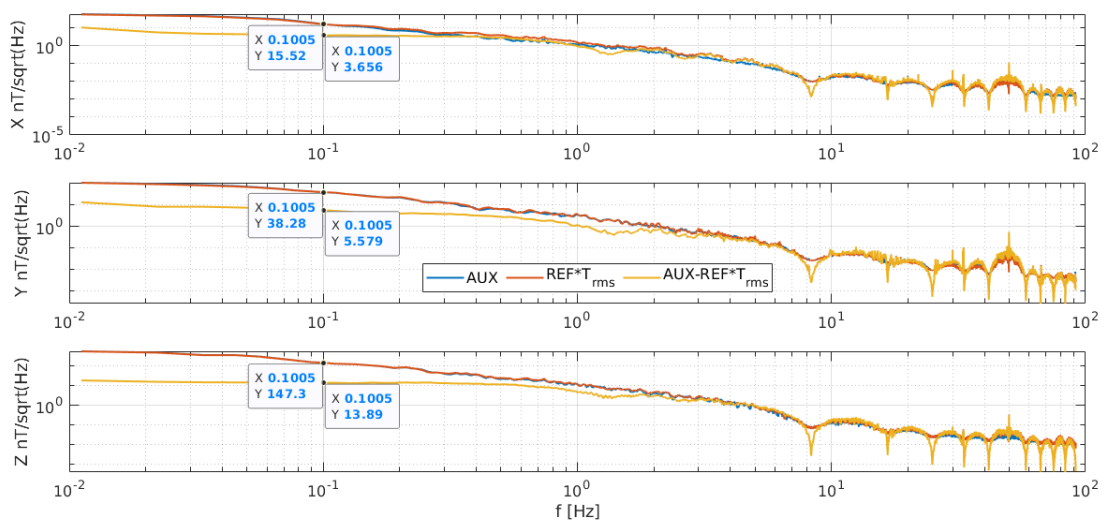
2.5.2 Vliv nevykompenzovatelných rušení na výběrová rozdělení

Druhým limitem kompenzace je kvalita nalezení transformační matice, respektive velikost gradientních a jiných nevykompenzovatelných ruchů. Segmentací signálu reziduí, vzniklých z (**AUX-REF* T_{rms}** viz Obr. 2-23), krátkým oknem se rozdělení výběrových průměrů opět přibližuje rozdělení základního souboru, viz Obr. 2-27. Při delších časových úsecích ale neklesá tak rychle, tak jak by odpovídalo \sqrt{N} .



Obr. 2-33 Rozdělení výběrových průměrů segmentovaných reziduí (**AUX-REF* T_{rms}**)

V grafu amplitudové spektrální hustoty na Obr. 2-34, počítané Welchovou metodou pro 60s okno, lze vyčíst maximální možný útlum pouze 20 dB. Z hlediska aktivního stínění se to může zdát málo, ale vztaheno k velikosti relativních skoků (100 μ T max) je to rozdíl 1000 a 100 ppm.



Obr. 2-34 Spektrální hustota reziduí pro jednotlivé složky

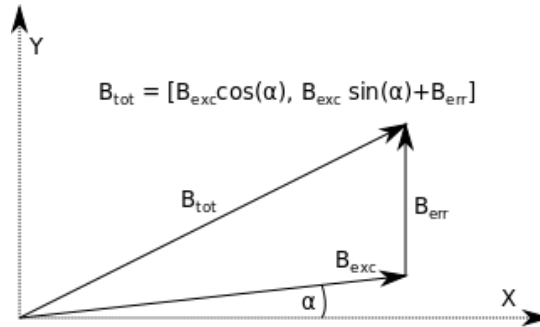
[0 - 10 Hz]	X	Y	Z
$nT_{rms} \text{ AUX}$	17,58	28,11	97,08
$nT_{rms} \text{ AUX-REF} * T_{rms}$	1,22	1,59	2,45
$nT_{pp} \text{ AUX}$	116,04	185,51	640,74
$nT_{pp} \text{ AUX-REF} * T_{rms}$	8,02	10,49	16,19

Tab. 7 Odhad amplitud šumu reziduí po syntetické kompenzaci

2.5.3 Důsledky nedokonalosti kompenzace na nejistotu měření různých vektorů pole

Ať už se jedná o nejistotu danou prodlevou skoku nebo nejistotu způsobenou nedostatečnou kompenzací rušení, tak nejhůře v případě dat z laboratoře č. 17 vychází vertikální Z složka. Pro případ naivní lineární jednoosé kalibrace stačí pro minimalizaci vlivu rušení na určení konstanty citlivosti zvolit excitaci v ose kolmé na osu maximálního rušení.

V případě potřeby vytváření vektoru o známé velikosti a různých orientacích, tj. v případě *thin-shell* kalibrace, se ale tato chyba způsobená nejvíce zarušenou osou projeví různě v závislosti na směru vytvářeného vektoru. To vyplývá z jednoduché geometrické úvahy. Uvažuji již relativní skok a ve výpočtu nezohledňuji ZMP. Pro jednoduchost také uvažuji pouze 2D případ s osou rušení ve směru Y.



Obr. 2-35 Natočení vytvářeného vektoru k vektoru chyby

Pro velikost vektoru b_{tot} mohu psát

$$\|b_{tot}\| = \sqrt{(b_{exc} \cos(\alpha))^2 + (b_{exc} \sin(\alpha) + b_{err})^2} \quad (2-13)$$

$$\|b_{tot}\| = \sqrt{b_{exc}^2 \cos^2(\alpha) + b_{exc}^2 \sin^2(\alpha) + 2b_{err} b_{exc} \sin(\alpha) + b_{err}^2} \quad (2-14)$$

$$\|b_{tot}\| = \sqrt{b_{exc}^2 + 2b_{err} b_{exc} \sin(\alpha) + b_{err}^2}. \quad (2-15)$$

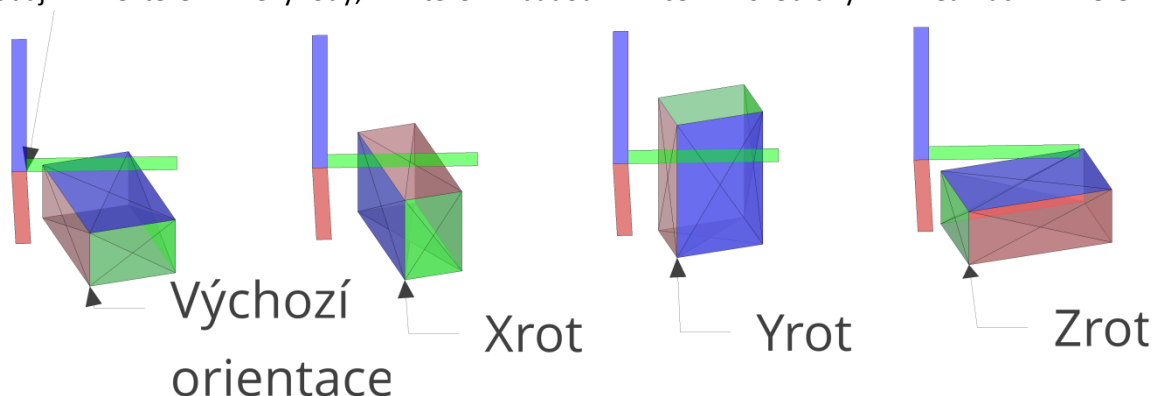
Což v krajním případě $\alpha=0$ tvoří obyčejnou Pythagorovou větu a ve druhém $\alpha=\pi/2$ se velikosti sčítají lineárně. Absolutní velikost b_{exc} určuje míru chyby nastavené intenzity v závislosti na velikosti rušení následovně:

- Pro $\alpha=90^\circ \rightarrow \frac{\Delta b_{tot}}{b_{tot}} = \frac{b_{err}}{b_{exc}}$ a pro hodnoty 50 μT a 100 nT vychází relativní chyba 2000 ppm.
- Pro $\alpha=0^\circ \rightarrow \frac{\Delta b_{tot}}{b_{tot}} = \frac{\sqrt{b_{exc}^2 + b_{err}^2} - b_{exc}}{b_{exc}}$ a při stejných hodnotách je chyba pouze 2 ppm.

To se projeví různými nejistotami pro získané citlivosti os magnetometru a to nejen v případě řešení kalibrace pomocí pseudoskálární metody v cívkovém systému viz konec kapitoly 4.4, ale i v případě řešení pomocí cívkové vektorové kalibrace, kde se s intenzitou explicitně nepočítá.

2.6 Odvození kalibrace v cívkách pro úplnou kalibraci v netriviálním případě

K úplné kalibraci bez ztotožnění vnějšího mechanického systému se systémem cívkovým je nutné přejít na vícekrokovou variantu, kdy se celá vektorová kalibrace opakuje ve čtyřech různých polohách senzoru a vzájemná poloha se získá s pomocí lineární algebry z výše zmíněných výsledných rotačních matic. Oproti předchozím variantám nejsou kladeny tak přísné požadavky na přesnost rotace a odpadají některé nevýhody, které budou více rozebrány v realizaci měření.



Obr. 2-36 Postupné rotace senzoru k nalezení vzájemné orientace

Mnou navržená metoda spočívá v provedení první kalibrace ve výchozí poloze senzoru následovaných třemi kalibracemi po rotaci senzoru podle jeho jednotlivých mechanických os zvlášť viz Obr. 2-36. Hledaná rotační matice vzájemné polohy se pak získá odvozením z relativních rotací. Vstupem metody jsou čtyři rotační matice. K odvození metody zavedu výslednou rotační matici z vektorové kalibrace ve výchozí poloze následovně:

$$\mathbf{R}_0 = \mathbf{R}_{BG} \mathbf{R}_{SB} \quad (2-16)$$

kde \mathbf{R}_{SB} představuje rotaci magnetického (*sensor frame*) systému na mechanický (*body frame*) a \mathbf{R}_{BG} mechanického na cívkový (*global frame*) systém. Matice z vektorové kalibrace v jiné poloze pak obecně vychází $\mathbf{R}_g = \mathbf{R}_{BG} \mathbf{R}_i \mathbf{R}_{SB}$, kde \mathbf{R}_i je obecná rotace v mechanických souřadnicích. Z těchto dvou matic pak lze sestavit matici relativní rotace mezi dvěma polohami v cívkovém s. s.

$$\mathbf{Q}_g = \mathbf{R}_0 \mathbf{R}_g^T = \mathbf{R}_{BG} \mathbf{R}_{SB} \mathbf{R}_{SB}^T \mathbf{R}_i^T \mathbf{R}_{BG}^T = \mathbf{R}_{BG} \mathbf{R}_i^T \mathbf{R}_{BG}^T, \quad (2-17)$$

ve které je využito faktu, že matice \mathbf{R} jsou již ortogonální a tak lze použít pouhou transpozici místo inverze. Pro další výpočet je důležitá vlastnost podobnosti matic \mathbf{Q}_g a \mathbf{R}_i , která zachovává vlastní čísla a dále, že vlastní vektor rotační matice jednoznačně představuje osu otáčení. Necht' \mathbf{v} je vlastní vektor matice \mathbf{A} , pak vlastní vektor podobné matice $\mathbf{R} \mathbf{A} \mathbf{R}^T$ je $\mathbf{R} \mathbf{v}$, protože

$$\mathbf{R} \mathbf{R}^T = \mathbf{I} \text{ a } (\mathbf{R} \mathbf{A} \mathbf{R}^T)(\mathbf{R} \mathbf{v}) = \mathbf{R}(\mathbf{A} \mathbf{v}) = \mathbf{R}(\lambda \mathbf{v}) = \lambda(\mathbf{R} \mathbf{v}). \quad (2-18)$$

Potom lze vlastní vektor relativní rotace (vektor osy otáčení) v cívkových souřadnicích obecně vyjádřit jako

$$\text{eigvec}(\mathbf{Q}_g) = \mathbf{R}_{BG} \text{eigvec}(\mathbf{R}_g). \quad (2-19)$$

a protože chceme znát vzájemnou orientaci vzhledem k vnitřnímu s. s. senzoru tak vyjádřím vlastní vektor ve vnitřních souřadnicích pomocí transpozice rovnice (2-16), respektive násobením maticí \mathbf{R}_0^T , která transformuje souřadnice z cívkových na vnitřní následovně

$$\mathbf{v}_g = \mathbf{R}_0^T \text{eigvec}(\mathbf{Q}_g) = (\mathbf{R}_{SB}^T \mathbf{R}_{BG}^T) \mathbf{R}_{BG} \text{eigvec}(\mathbf{R}_i) = \mathbf{R}_{SB}^T \text{eigvec}(\mathbf{R}_i). \quad (2-20)$$

Dále zavedu matice relativních rotací, které odpovídají fyzickým rotacím podle jednotlivých mechanických os senzoru jako

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_x &= \mathbf{R}_0 \mathbf{R}_1^T = \mathbf{R}_{BG} \mathbf{R}_x^T \mathbf{R}_{BG}^T \\ \mathbf{Q}_y &= \mathbf{R}_0 \mathbf{R}_2^T = \mathbf{R}_{BG} \mathbf{R}_y^T \mathbf{R}_{BG}^T \\ \mathbf{Q}_z &= \mathbf{R}_0 \mathbf{R}_3^T = \mathbf{R}_{BG} \mathbf{R}_z^T \mathbf{R}_{BG}^T. \end{aligned} \quad (2-21)$$

Matice \mathbf{R}_x , \mathbf{R}_y , \mathbf{R}_z pak představují rotaci podle mechanických os senzoru a jejich vlastní čísla pak ideálně tvoří standardní bázi

$$\begin{aligned} \text{eigvec}(\mathbf{R}_x) &= [1 \ 0 \ 0]^T \\ \text{eigvec}(\mathbf{R}_y) &= [0 \ 1 \ 0]^T \\ \text{eigvec}(\mathbf{R}_z) &= [0 \ 0 \ 1]^T \end{aligned} \quad (2-22)$$

Finální tvar vlastních vektorů relativní rotací ve vnitřním souřadnicovém systému pak lze zapsat jako

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_x &= \mathbf{R}_{SB}^T [1 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{v}_y &= \mathbf{R}_{SB}^T [0 \ 1 \ 0]^T \\ \mathbf{v}_z &= \mathbf{R}_{SB}^T [0 \ 0 \ 1]^T. \end{aligned} \quad (2-23)$$

A hledaná matice rotace vzájemné polohy je pak konečně

$$\mathbf{R}_{SB}^T = [\mathbf{v}_x \ \mathbf{v}_y \ \mathbf{v}_z]. \quad (2-24)$$

Hlavní výhodou výpočtu z relativních rotací je eliminace požadavku na znalost výchozí orientace senzoru vůči cívkám. Výchozí poloha tak může být zvolena zcela libovolně. Samotné rotace mohou být provedeny také o libovolný úhel, protože stačí, pokud jsou dodrženy správné osy rotace. Osa otáčení a tedy i vlastní vektor se nemění.

Nejistota zaměření tak vyplývá z přesnosti vnější konstrukce a způsobu provedení rotací. Zlepšení přesnosti je možné docílit provedením více měření s různým úhlem rotace, ale to znovu zvyšuje nároky na obsluhu, čas a přibližuje se tak složitostí k dřívějším metodám. Nutný počet měření lze navíc teoreticky snížit na tři, kdy se provedou pouze dvě rotace z výchozí polohy, a třetí vlastní vektor se dopočítá doplněním na bázi. Z toho také vyplývá jedna z možností kontroly výsledku provedení čtyřkrokové metody, v ideálním případě musí být matice \mathbf{R}_{SB} ortogonální.

Pokud není dodrženo pořadí rotací podle XYZ os, pak je samozřejmě odpovídajícím způsobem změnit sestavení matice (2-24).

Zavedením relativní rotace jiným způsobem (není to pouhá transpozice)

$$\mathbf{Q}_g = \mathbf{R}_0 \mathbf{R}_g^T \neq \widehat{\mathbf{Q}}_g = \mathbf{R}_0^T \mathbf{R}_g = \mathbf{R}_{SB}^T \mathbf{R}_{BG}^T \mathbf{R}_{BG} \mathbf{R}_x^T \mathbf{R}_{SB} = \mathbf{R}_{SB}^T \mathbf{R}_i^T \mathbf{R}_{SB}, \quad (2-25)$$

po opětovném vytvoření třech rotací

$$\begin{aligned} \widehat{\mathbf{Q}}_x &= \mathbf{R}_0^T \mathbf{R}_1 = \mathbf{R}_{SB}^T \mathbf{R}_i^T \mathbf{R}_{SB} \\ \widehat{\mathbf{Q}}_y &= \mathbf{R}_0^T \mathbf{R}_2 = \mathbf{R}_{SB}^T \mathbf{R}_i^T \mathbf{R}_{SB} \\ \widehat{\mathbf{Q}}_z &= \mathbf{R}_0^T \mathbf{R}_3 = \mathbf{R}_{SB}^T \mathbf{R}_i^T \mathbf{R}_{SB}, \end{aligned} \quad (2-26)$$

vede odvození na stejný výsledek bez kroku (2-20).

$$\begin{aligned} \widehat{\mathbf{v}}_x &= \mathbf{R}_{SB}^T [1 \ 0 \ 0]^T \\ \widehat{\mathbf{v}}_y &= \mathbf{R}_{SB}^T [0 \ 1 \ 0]^T \\ \widehat{\mathbf{v}}_z &= \mathbf{R}_{SB}^T [0 \ 0 \ 1]^T. \end{aligned} \quad (2-27)$$

3 Realizace software

Programové vybavení je rozděleno na tři základní části: samostatný modulu kompenzace, modul provádění kalibrací a skripty pro zpracování výsledků a výpočet kalibrací. Vyhodnocení výsledků je kompletně zpracováno v MATLABu ve formě samostatných skriptů.

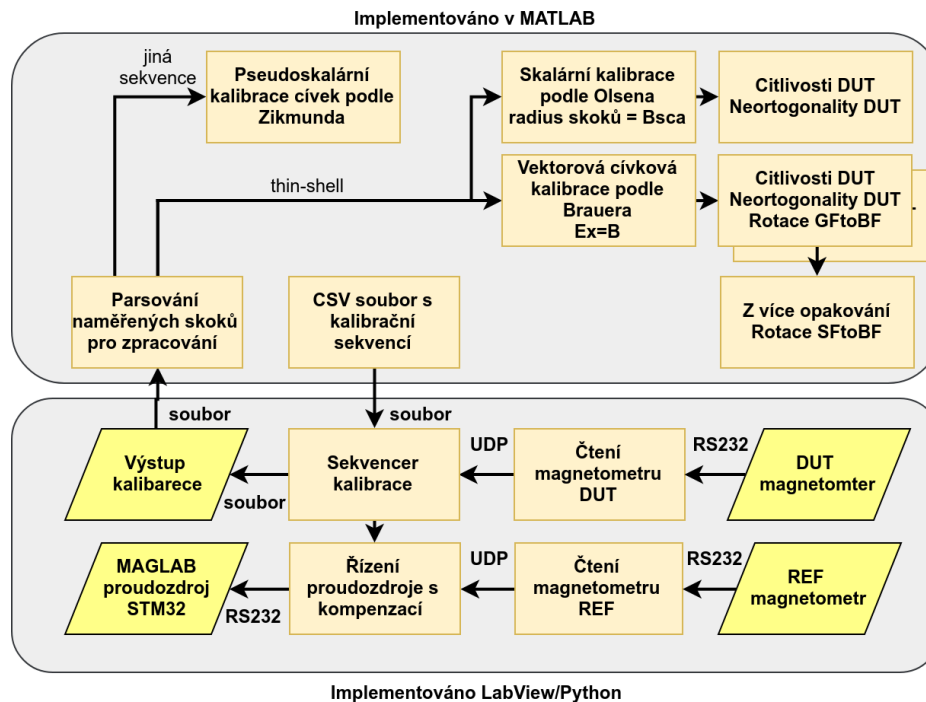
Provádění kalibrační sekvence a kompenzační smyčky je vytvořeno v prostředí LabView. Některé zaměnitelné části jsou i ve formě skriptů v jazyce Python.

Nízko-úrovňové řízení proudového zdroje obstarává jeho MCU, ve kterém jsem kvůli zrychlování možnosti řízení odstraňoval některé programové pojistky a omezovače přeběhu, které jsem dříve do FW sám přidal, když se stejná řídicí deska použila v jiném projektu do zakázového zdroje pro ČMI na kalibraci velkých etalonů magnetické indukce.



Obr. 3-1 Ovládací panel proudového zdroje MAGLAB

Z ovládacího panelu proudového zdroje je možné nastavovat pouze hodnoty proudu anebo přímo už kalibrované hodnoty magnetického pole dané cívkovými konstantami. Na displeji je zobrazovaná, kromě aktuální nastavené hodnoty i hodnota současně měřená vnitřním ADC a teploty stabilizace viz kapitola 2.2.1. Řízení kalibrační sekvence a kompenzace je prozatím realizováno vzdáleně.



Obr. 3-2 Rozdělení řešení na části podle implementace

Programy jsou spíše konceptem řešení, byly vyvíjeny v průběhu návrhu vlastní metody kalibrace s kompenzací a nejsou tak zatím uživatelsky přívětivé.

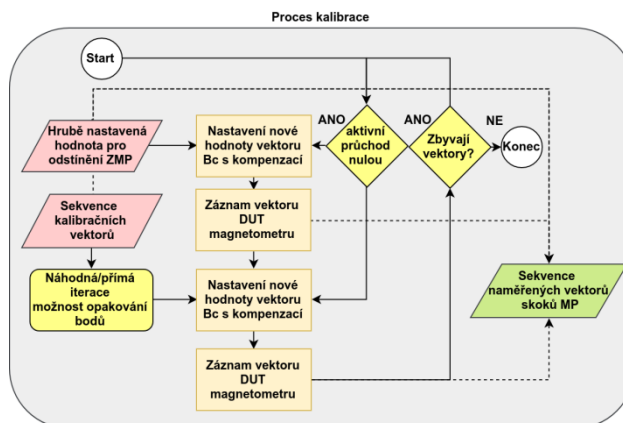
Zpracování záznamu kalibrace je možné v programu MATLAB provést několika způsoby. Pro dávkové zpracování jsou přípravné ukázkové skripty s příklady a pro ruční zpracování jednoduché GUI, které usnadňuje práci nezasvěceným uživatelům. Z možných kalibrací jsou připraveny vektorová kalibrace *thin-shell* podle Brauera [20] a pro zpracování stejných dat, kdy se pouze místo měřené velikosti intenzity MP, počítá s vypočtenou absolutní velikostí vektoru skoku, je k dispozici též lineární proložení do elipsoidu a převzatá skalární kalibrace podle Olsena [3], resp. přímo implementace od pana Petruchy [4]. Porovnáním výsledků cívkové *thin-shell* a obyčejné skalární kalibrace lze případně odhalit a vyloučit nesmyslné výsledky kalibrace.

Cívková kalibrace podle Brauera je naimplementována s LQ dekompozicí matice a zároveň obsahuje i způsob dekompozice z článku. Ve výsledcích se ale u jejich způsobu implementace projevovala chyba některých neortogonalit, i přesto že se výsledky na stejných datech z LQ cívkové a skalární kalibrace téměř shodovali (v řádu několika PPM). I v simulovaných datech se ukazovala podobná odchylka, která se zdá moc velká, aby byla způsobena pouhou chybou aproximací s předpokladem malých úhlů, přesto jsem chybu ve svém kódu nenašel. Přidal jsem ještě lineární metodu proložení dat do elipsoidu viz 1.6, aby mohl uživatel případně ze třech výsledků alespoň odhadnout správnou variantu majoritou.

Výstup vektorové kalibrace je silně inspirován formátem výstupu převzaté skalární kalibrace, kvůli možnému porovnání. Kromě koeficientů citlivosti, neortogonalit (bez offsetů, kvůli relativním skokům) jsou také vykreslena rezidua v intenzitě a navíc po složkách, stejně tak rozvinutí povrchu koule do 2D polárního konturového grafu. V případě vektorové kalibrace lze navíc vykreslit body přímo v cívkových s. s. souřadnicích anebo vnitřním s. s. magnetometru. V případě měření z většího než základního počtu bodů jsou vykresleny i rozptyly hodnot bodů.

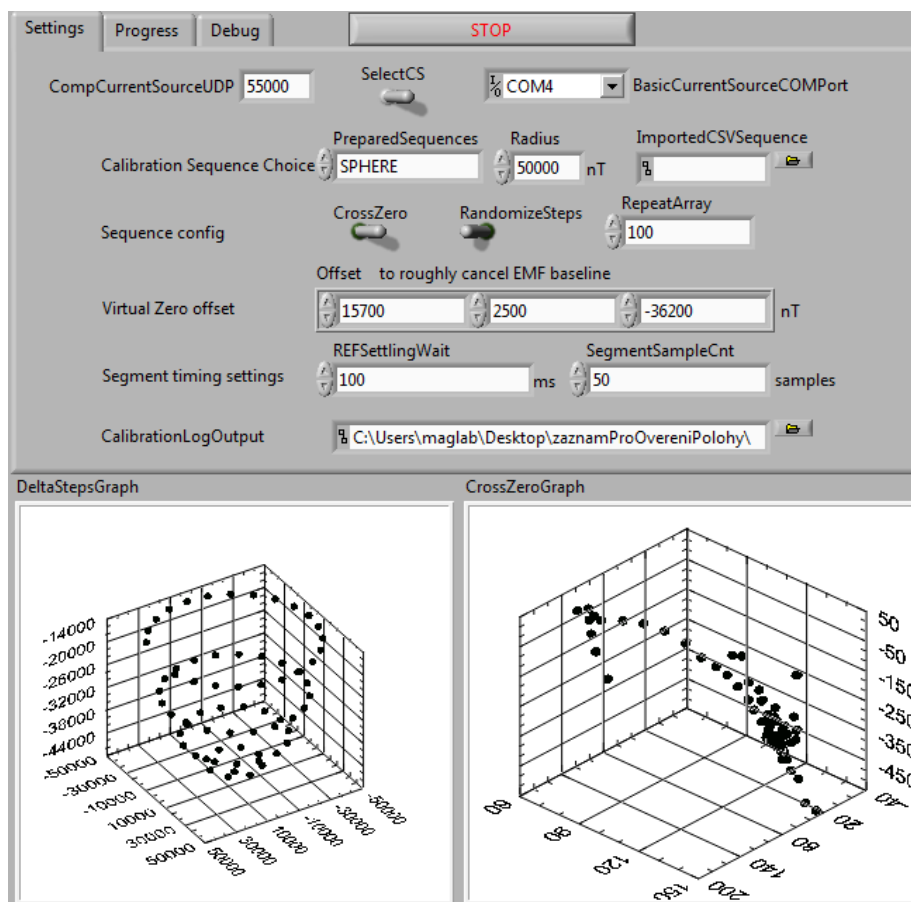
3.1.1 Modul provádění (*thin-shell*) kalibrace

Kalibrační sekvence jsou předpřipravené pro 161 a 51 bodový *thin-shell*, lineární jednoosou kalibraci pomocí Merrittovských cívek a také kalibrační sekvence pro 3D skalární kalibraci cívkového systému. Způsob provádění kalibrace je zřejmý z obr. 3-3, případně je pro kompenzovanou variantu dále vysvětlován v kapitole 4.3.



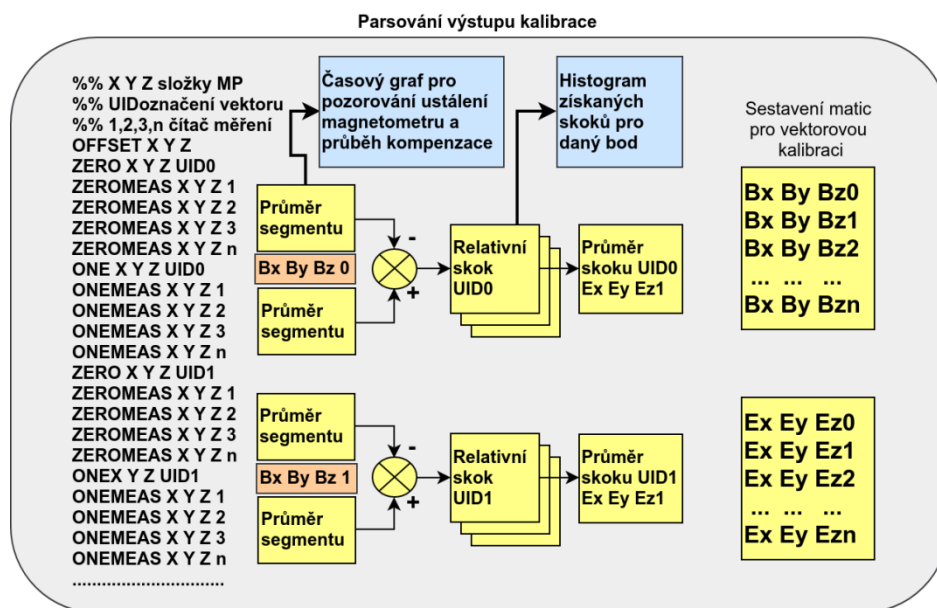
Obrázek 3-3 Způsob procházení kalibrační sekvence

Uživatel může zvolit typ kalibrační sekvence a upravit její parametry, jako je počet odebraných vzorků pro jeden segment (relativní skok), doba vynechání záznamu před ustálením magnetometru a také vypnout či zapnout procházení nulou. Nejdůležitější je hrubé odečtení stálé složky ZMP, díky kterému je možné využít maximálně rozsah magnetometru.



Obr. 3-4 Rozhraní provádění kalibrační sekvence

Provedením kalibrace vznikne soubor ve kterém jsou obsažené postupně všechny kalibrační skoky označené unikátním identifikátorem, aby se daly při případném náhodném procházení sekvence jednoduše opět přiřadit správnému vektoru. Každý vektor se v základním nastavení skládá nejdříve z měření nulové hodnoty a pak následujícím měření hodnoty po skoku. Každé měření představuje skupinu měření při daném nastavení cívek. Po odstranění doby ustálení, která se nahrává úmyslně, se z kompletu všech hodnot měření nulového pole, nechá vykreslit rozložení bodů v prostoru a pozorovat jak se přibližně měnilo pole v průběhu kalibrace. Po zparsování všech řádků se korespondující relativní skoky mohou zprůměrovat a v případě potřeby vykreslit do grafu.

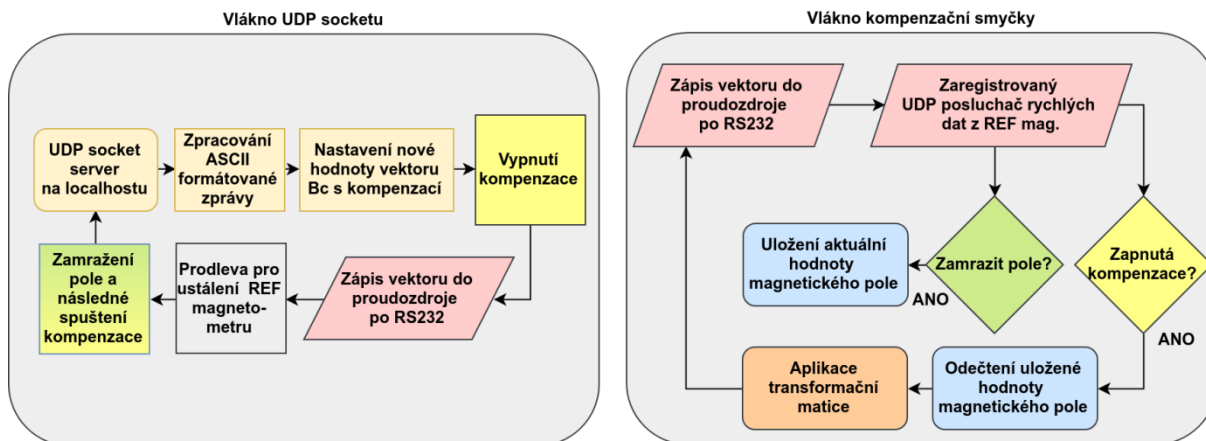


Obr. 3-5 Formát kalibračního záznamu

3.1.2 Modul řízení proudového zdroje s kompenzací rušení

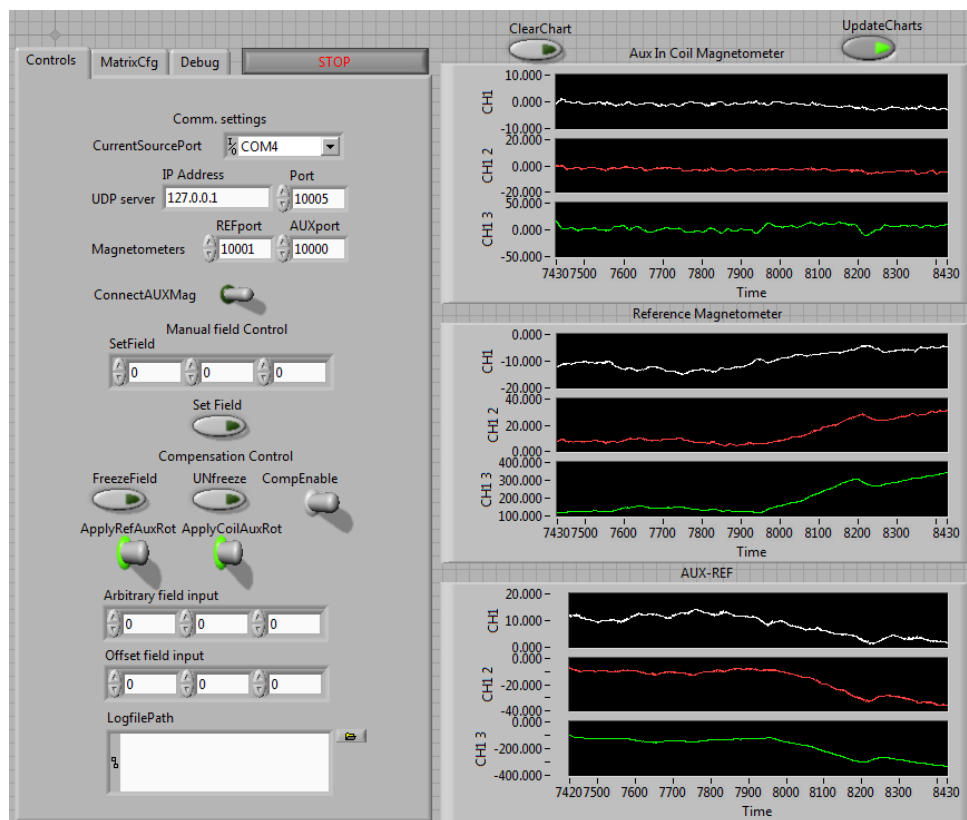
Hlavní jádro práce by měl tvořit jednoduchý program pro kompenzaci magnetického rušení. Program byl nejdříve také zamýšlen jako samostatný funkční blok, umožňující provádění změn pole a ruční spouštění kompenzace, pouze pro vytváření magnetického stínění. Kromě „vzdáleného“ ovládání pomocí UDP paketů, tak program obsahuje standardní uživatelské rozhraní. Prozatím je implementován v prostředí LabView a jediným jeho úkolem je provádění kontinuální *open-loop* kompenzace rušení z referenčního magnetometru a sekvence vypnutí/zapnutí kompenzace při skoku MP.

Při požadavku na změnu pole se nejprve pozastaví kompenzační smyčka a přečte se současná hodnota kompenzace (pro odeslání a uložení do souboru kalibrace viz kapitola 4.3), poté se nastaví nový vektor MP odesláním příkazu do zdroje po rozhraní RS232. Krátce po odeslání se po nastavitelném zpoždění opět aktivuje kompenzační smyčka a dochází ke stínění MP zapisováním nových hodnot (zpoždění je implementováno z důvodu ustálení výstupu referenčního magnetometru).



Obr. 3-6 Diagram kompenzovaného proudového zdroje

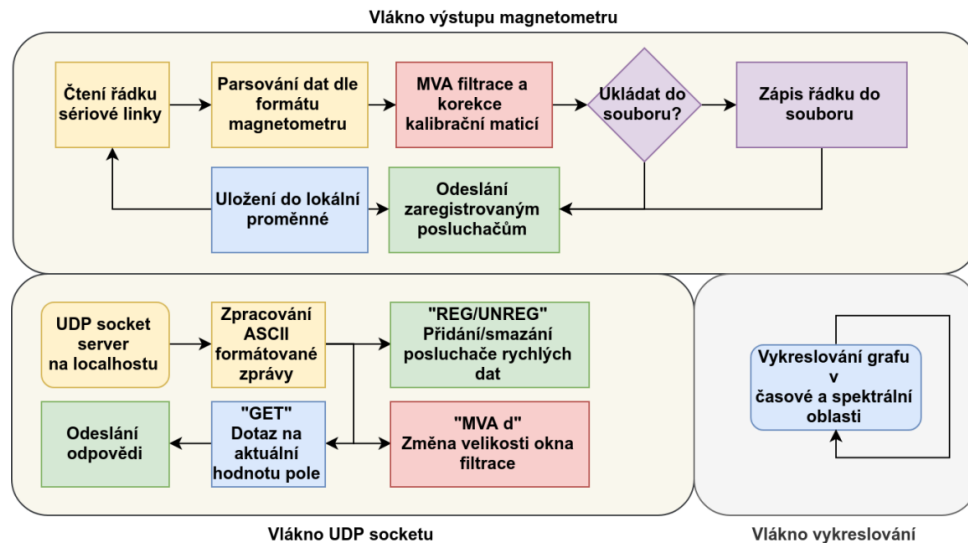
Program nebyl více rozvíjen, protože je plánován pro implementaci přímo do firmwaru MCU řídicí desky proudového. Samotný proudový zdroj obsahuje dva galvanicky oddělené vstupy RS232 a také USB, proto bude možné připojit referenční magnetometr přímo do něj a dále tak zkrátit prodlevu kompenzační smyčky. Požadavky na velkou rychlost zápisu a čtení tří sériových zařízení současně, použití 32bitových Windows a NI PCI RS232 karty vedlo v počátku k omezení rychlosti na zhruba 50 Hz, při kterých ještě nedocházelo k výrazným výpadkům komunikace sériové linky. Korektním nastavením *bufferů* na minimum a hlavně použitím FTDI převodníku z USB na RS232, který umožnil zvýšit *baudrate* na 460800 bd/s (ovladače PCI karty nedovolily více než 115200 bd/s) vedlo ke snížení latence na zhruba 8 ms. Vlastní USB port proudového zdroje vyvedený z STM32 MCU nedoporučuji používat, protože dochází k pádům systému Windows (BSOD) z důvodu chyby ve VCP ovladačích výrobce, která není dosud vyřešena.



Obr. 3-7 Rozhraní modulu kompenzovaného zdroje proudu

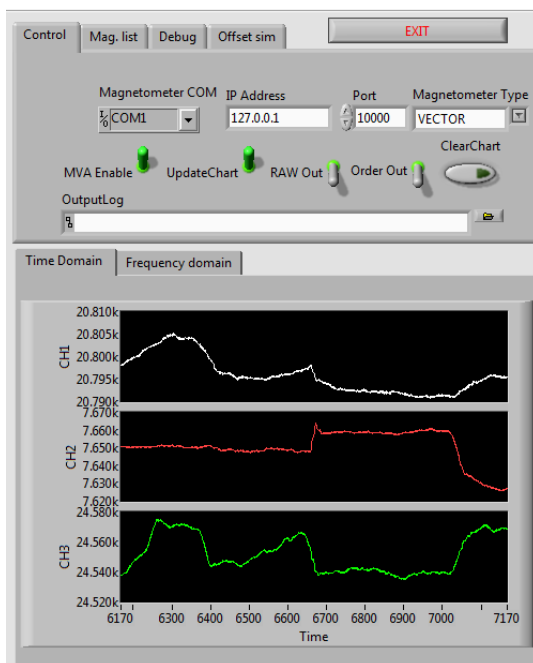
3.1.3 Modul zpracování hrubých dat z magnetometrů

Zpracování výstupu z magnetometru je vcelku přímočaré. Většina magnetometrů ihned po zapnutí posílá po sériové lince měřený vektor na své plné vzorkovací frekvenci. Každý z použitých magnetometrů bohužel používá zcela jinou elektroniku a různý firmware, formát zpráv se tak liší napříč všemi magnetometry. Aplikace v LabView a nebo v Pythonu tuto diskrepanci odstraňuje společným rozhraním. Kvůli zachování jednoduché komunikace napříč programy, je opět využito UDP paketů na lokální síti ke komunikaci s částmi na vyšší úrovni.



Obr. 3-8 Tok dat v části zpracovávající čtení magnetometru

Obě verze se snaží být navenek totožné, aby bylo možné případně opět nasadit Python variantu zpět na Raspberry Pi. Jsou naimplementovány pouze základní dotazovací a nastavovací příkazy.



Obr. 3-9 Uživatelské rozhraní čtení z magnetometru

V záložce *mag. list* je upravitelná tabulka s konfigurací všech použitých magnetometrů. Přidání nového magnetometru by tak mělo být možné pouhým přidáním řádku konfigurace.

Před prvním použitím je nutné nezapomenout snížit velikosti vstupních *bufferů* u zařízení sériové linky ve správci zařízení, jinak dochází k prodlevám ve čtení, jak program čeká na jeho naplnění.

V případě chyby parsování přijatého řádku se ukládá, resp. případně odesílá předchozí přijatá hodnota, aby se neztratila časová informace. Formát odpovědi je jednotný a to středníkem oddělená čísla s dvěma desetinnými místy v jednotkách nT nebo v surových datech. Pro pozdější zpracování je možné ukládat rychlý výstup magnetometru do *logovacího* textového souboru, který obsahuje MVA filtrovaná i nefiltrovaná data.

3.2 Návrh syntetických cívek

Kvůli nutnému porovnání numerických výsledků kalibrace a ověření správnosti implementace jsem využíval jednoduché implementace vytváření simulovaných dat *thin-shell* kalibrace, dále syntetické cívky. Později jsem potřeboval ověřit ještě vliv nehomogenity cívkového systému na výsledek kalibrace, proto byl naimplementován také MATLAB skript i pro tvorbu simulovaných dat měření v nehomogenních cívkách.

3.2.1 Bez započtení nehomogenity:

Model syntetických cívek vychází z definice chybového modelu magnetometru, ze zadaných úhlů neortogonalit, citlivostí jednotlivých os a offsetů magnetometru jsou vypočteny matice \mathbf{P} a \mathbf{S} viz kapitola 1.2.

$$\mathbf{E}_{\text{mag}} = \text{SPR}(\mathbf{B}_{\text{thinshell}} + \mathbf{B}_{\text{noise}}) + \mathbf{b}_0 + \mathbf{E}_{\text{noise}}. \quad (3-1)$$

V modelu jsou zaimplementovány také úhly natočení magnetometru vůči systému cívek (matice \mathbf{R}) a možnosti přidání bílého šumu k magnetickému poli vytvářeném cívkovým systémem, nebo přímo k výstupu jednotlivých senzorů (\mathbf{B}_n a \mathbf{E}_n). Kromě toho je možné ke každé sensorové ose zvlášť přidat nelinearitu. Na začátku se vytvoří matice obsahující body povrchu koule ($\mathbf{B}_{\text{thinshell}}$) v kartézských souřadnicích pro jednotlivé X Y Z složky a ty se roznásobí vytvořenými maticemi ze zadaných parametrů.

3.2.2 Se započtením nehomogenity z ANSYS:

V průběhu řešení se ukázalo vhodné zahrnout do syntetického modelu nehomogenity používaných cívek. Přestože je možné vypočítat velikost a směr vektoru magnetického pole cívkového systému přímo z definice Biot-Savartova zákona, využil jsem pro jednoduchost v práci již dříve uvedené simulace v programu ANSYS (kapitola 2.2.2), ze které jsem pouze vyexportoval hodnoty složek vektorů jako 3D *look-up* tabulku oblasti o hraně 100x100x100 mm s 2mm krokem, pro všechny tři osy cívkového systému. Vstupní argumenty skriptu jsou souřadnice středu myšlené trojice senzorů, souřadnice posunutí jednotlivých senzorů vůči jejich středu a nakonec natočení vůči cívkovému systému.

Ze zadaných parametrů jsou vypočteny pozice senzorů a z *look-up* tabulky jsou pro každý senzor zvlášť sestaveny transformační matice.

V případě zadání soustředné trojice senzorů mimo střed cívek, se vliv nehomogenity projeví transformační maticí \mathbf{T}_{NH} .

$$[\mathbf{b}_x \ \mathbf{b}_y \ \mathbf{b}_z] = \mathbf{b}_{\text{NHthinshell}} = \mathbf{b}_{\text{thinshell}} \mathbf{T}_{\text{NH}}. \quad (3-2)$$

Řádky matice \mathbf{T}_{NH} obsahují složky vektorů vytvářeného vždy jednou osou nehomogenních cívek (první index značí excitaci, druhý pak složku vektoru).

$$\mathbf{T}_{\text{NH}} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{xx} & \mathbf{b}_{xy} & \mathbf{b}_{xz} \\ \mathbf{b}_{yx} & \mathbf{b}_{yy} & \mathbf{b}_{yz} \\ \mathbf{b}_{zx} & \mathbf{b}_{zy} & \mathbf{b}_{zz} \end{bmatrix}. \quad (3-3)$$

V případě nesoustředných senzorů je matice \mathbf{T}_{NH} různá pro každý senzor. Složky vektoru z rovnice (3-2) by bylo poté nutné počítat zvlášť a bez podrobného odvození křížových členů jsem to raději neimplementoval.

Simulace s pouhým umístěním soustředných senzorů mimo střed cívek postačila k ověření vlivu nehomogenity na polohu magnetometru v cívkách viz kapitola 4.6.2.

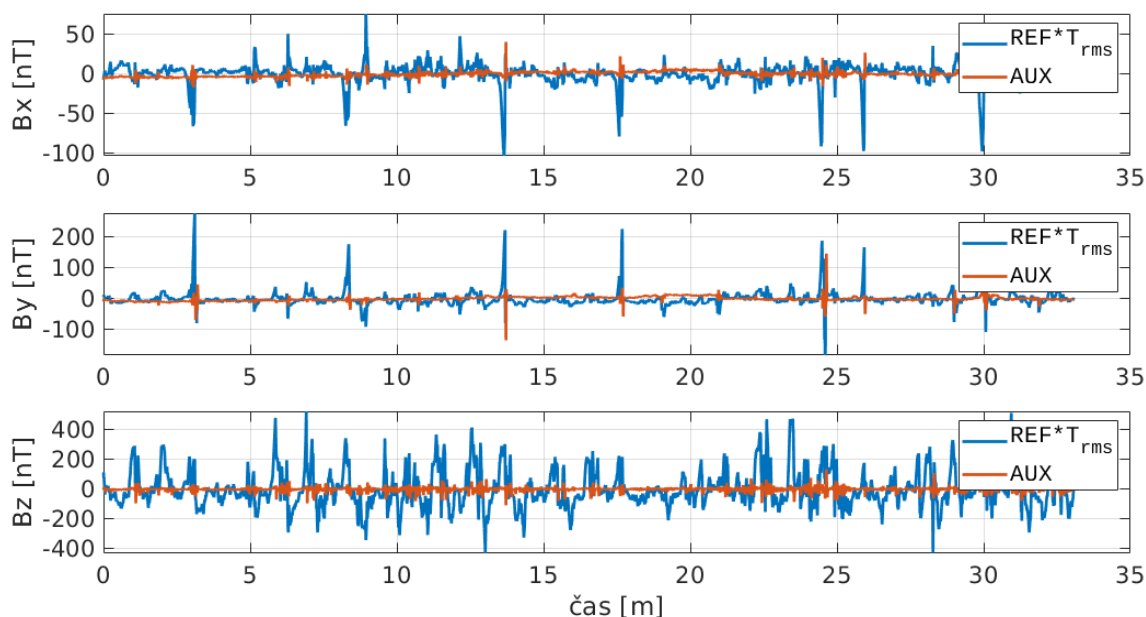
4 Dílčí výsledky a měření

Vyhodnocení dílčích výsledků bude rozděleno, tak jak bylo naznačeno v předcházející kapitole pomocí rozdělení jednotlivých programových modulů. Kompenzace variací bude nejdříve vyhodnocena samostatně pouze jako magnetické stínění. Následně představím výsledky jednoosé pomalé kompenzované kalibrace při uvažování pomalých magnetometrů, resp. magnetometrů s pomalým výstupem A/D převodníků, které byly také publikovány v článku [34] a poté výsledky s aktuálním způsobem zpracování.

V průběhu práce se ukázal být největší zdroj nejistoty kalibrace v nehomogenitě magnetického pole vytvářeného cívkovým systémem. Při implementaci a vyhodnocení metody *thin-shell* jsem se pak, z časových důvodů (doba nutná pro provedení jedné cívkové kalibrace) zaměřil na vyhodnocení výsledků a nejistot pouze pro případ rychlých kalibrací (rychlých magnetometrů), tzn. bez kompenzace rušení.

4.1 Úspěšnost samotné kompenzace (stabilizace magnetického pole)

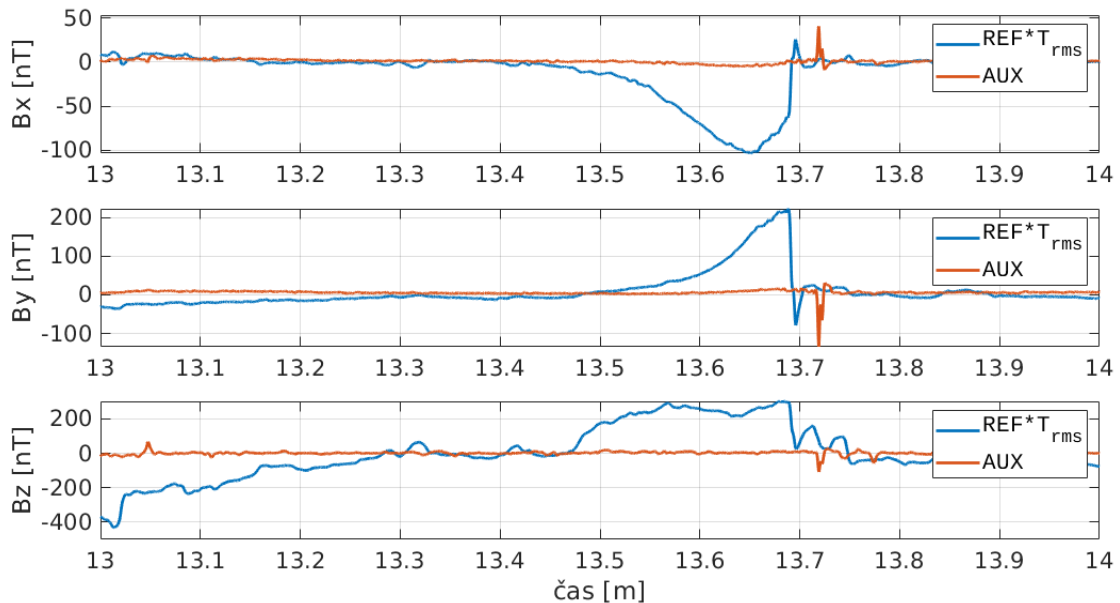
Po zrychlení kompenzační smyčky na rychlost větší jak 100 sa/s a po korektním stanovení transformační matice mezi pomocným a referenčním magnetometrem se daří kompenzovat velkou část rušení hlavně ve vertikální složce, respektive ve vertikální dochází k největšímu poměru potlačení rušení. V níže uvedeném 30minutovém záznamu na Obr. 4-1 je již reálně kompenzované rušení, měřené pomocí pomocného magnetometru v cívkách a současně referenčním mimo cívky (po transformaci souřadnic). Záznam je již synchronní a není potřeba provádět odstranění zpoždění pomocí metody se vzájemnou korelací. Možné pozorovatelné zpoždění může být důsledek rozdílné filtrace uvnitř elektroniky magnetometrů.



Obr. 4-1 Reálné výsledky kompenzace rušení v 30 minutovém segmentu

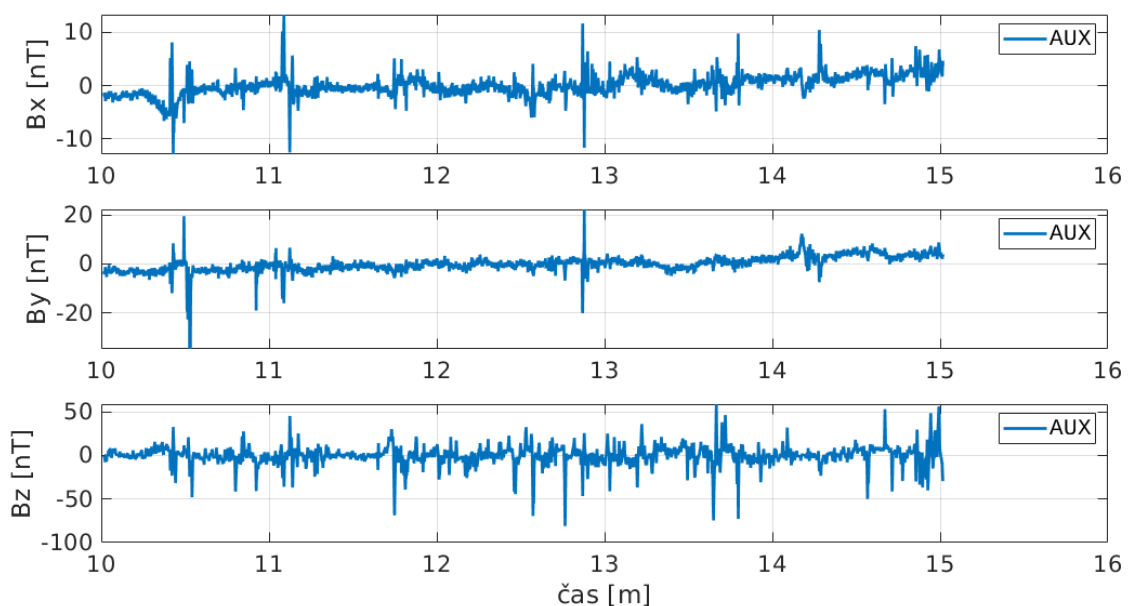
V horizontálních složkách se částečně daří potlačit i dříve zmíněné periodicky se opakující skoky pocházející pravděpodobně z trakčního proudu tramvají. Potlačení ve vertikální složce je dominantní a v půl hodinovém záznamu dochází k potlačení původních hodnot z 900 nT_{pp} na zhruba 100 nT_{pp}. Pro použití při následných kalibracích je ale nejvýznamnější fakt, že se střední hodnota za celou půl hodinu drží v rozsahu 10 nT okolo nuly (v záznamu je odečtena celková střední hodnota). K vychýlení střední hodnoty během kompenzace může dojít změnou prostředí v laboratoři viz kapitola 4.2.

Zaměřením se na minutový detail obsahující jeden z periodických náhlých skoků v horizontální složce lze pozorovat již v návrhu očekávaný problém s rychlostí kompenzace, resp. šířkou pásma kompenzační smyčky a zpožděním způsobeným dvojí (uvnitř elektroniky a pak v programu) filtrací dat z referenčního magnetometru. Pomalá náběžná hrana (až 200nT/200ms) je téměř dokonale potlačena, ale sestupná rychlejší hrana (200nT/20ms) je potlačena zhruba jen z poloviny. Projeví se jako špička v reziduích ve směru hrany, zpožděné zhruba o 20 ms.



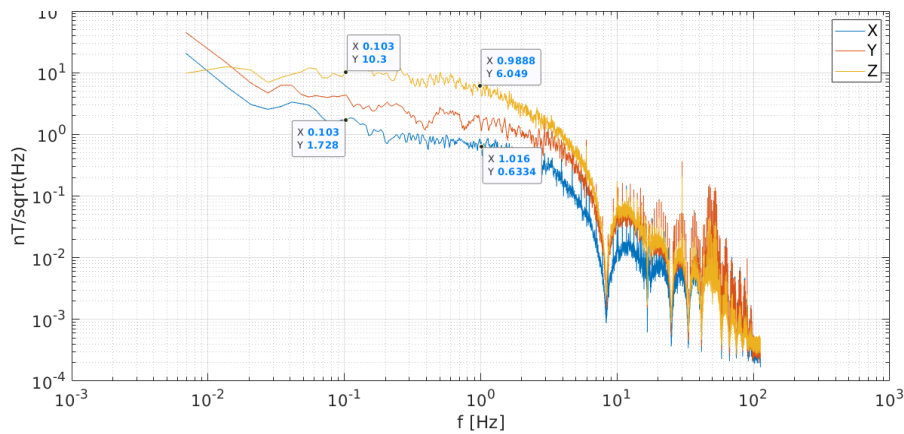
Obr. 4-2 Minutový detail srovnání kompenzace rušení v 30m segmentu

Pohledem na vertikální složku v detailu – viz Obr. 4-2 - je znovu vidět potlačení ze 700 na 100 nT_{pp} ve vertikální složce. Rychlá sestupná hrana se projeví špičkou v reziduu kompenzace i ve ve vertikální složce (čas 13.7 m). Na Obr. 4-3 níže je vybrán úsek mimo náhlé periodické skoky a jsou vykreslena pouze rezidua rušení z AUX magnetometru, bez současného vykreslení rušení.



Obr. 4-3 Detail reziduí reálné kompenzace

Odhad kompenzovaných reziduí v hodnotách z Obr. 4-3, je pro osy jednotlivé složky postupně cca 20, 50 a 150 nT_{pp}. Opět chci zdůraznit, že stále většina pozorovaného rušení jsou pouze špičky způsobené pomalou kompenzací, nikoliv gradientem, především v horizontálních složkách by špičkové hodnoty opět klesly zhruba na polovinu.

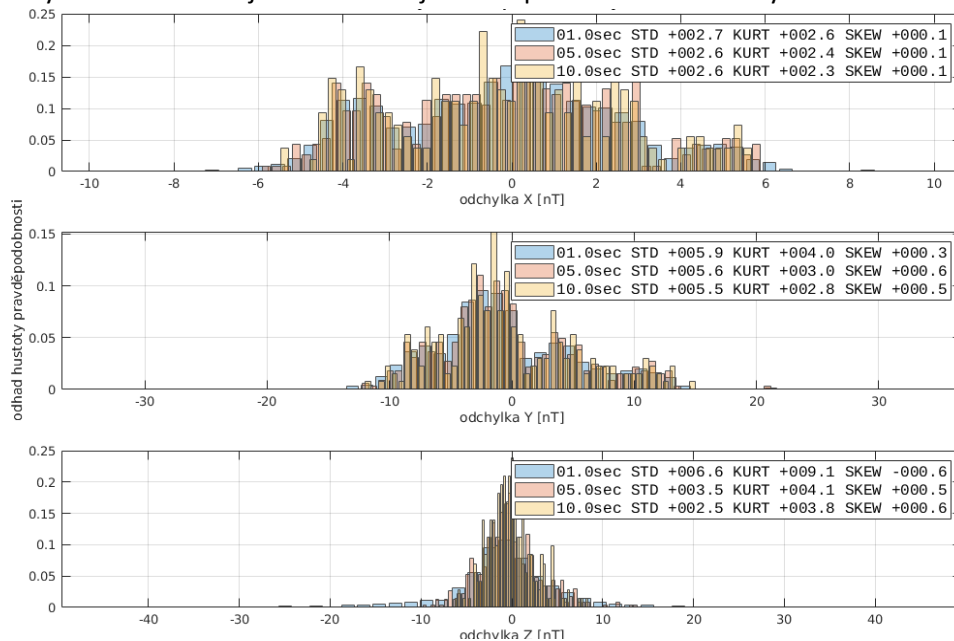


Obr. 4-4 Odhad amplitudového šumového spektra reziduí (data filtrovány MVA s 120ms oknem)

[0 - 10 Hz]	X	Y	Z
nT _{rms} reálná rezidua	2,06	4,92	9,16
nT _{pp} reálná rezidua	13,57	32,47	60,47

Tab. 8 Odhad amplitud šumu reziduí po reálné kompenzaci

Z obrázku Obr. 4-4 je patrné, že šumový práh rušení také významně pokles, při uvažování bílého šumu jsou amplitudové hodnoty šumu uvedeny v Tab. 8. Nakonec na Obr. 4-5 uvádím histogram segmentovaných reziduí ve stejném formátu jako v kapitole 2.5 s teoretickým odhadem.



Obr. 4-5 Rozdělení výběrových průměrů segmentovaných reálně měřených reziduí viz Obr. 4-1

V rozdělení výběrových průměrů je stále možné odhalit v horizontálních složkách shluky (tři v X a dva v Y), které indikují nepatrný drift reziduí, respektive jejich střední hodnoty, vlivem nevykompenzovatelných gradientních změn. V celém půl-hodinovém záznamu se ale tyto shluky nevzdalují o víc jak 10 nT, protože nedošlo k významné změně prostředí, jakou je třeba otevření vchodových dveří laboratoře.

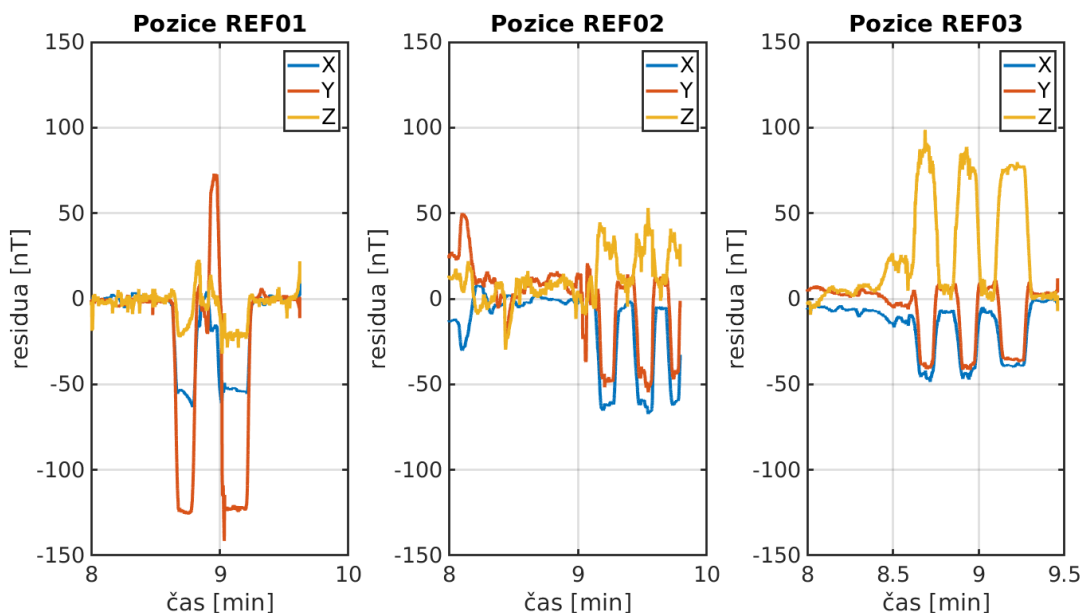
4.2 Vliv gradientu magnetického pole

Významným zdrojem chyby kompenzace, kterou lze velmi snadno replikovat je otevření kovových dveří na vstupu do laboratoře, které jsou vzdálené necelé 2 metry od cívek, viz Obr. 2-10.

Přibližná poloha	X [m]	Y [m]	Z [m]
REF01	0	0	-1
REF02	-1,5	0	-1,5
REF03	-2	2	1

Tab. 9 Přibližné polohy referenčního magnetometru při testování

Provedl jsem několik měření pro každou polohu referenčního magnetometru z tabulky výše, kdy jsem zaznamenal krátký 10 minutový úsek rušení MP, na kterém jsem nejdříve našel matici vzájemné orientace variací a poté testoval, byť jen teoretickou, úspěšnost kompenzace blízkých změn magnetického pole. Před koncem záznamu jsem několikrát otevřel a zavřel dveře, jak je čitelně vidět v grafu reziduí viz Obr. 4-6. Jedná se čistě opět o syntetickou kompenzaci výpočtem v MATLABu, bez opravdového spuštění kompenzačního cívkového systému a proto to představuje reálný limit daný gradientem magnetického pole, který nepůjde v současné konfiguraci s jedním referenčním magnetometrem překročit.



Obr. 4-6 Nevykompenzovatelná rezidua způsobená gradientem

Vliv polohy magnetometru na úspěšnost kompenzace není zcela zřejmý. V případě první polohy přímo pod cívkami REF01, kdy jsou senzory metr nad sebou, je největší nevykompenzovatelné reziduum v horizontální složce. Naopak poloha REF03 s referenčním senzorem nejdále od cívek, vykazuje největší reziduum ve vertikální složce. Dveře do laboratoře samozřejmě nepředstavují problém, protože se během kalibrace nemusí otevírat, ale naproti přes chodbu jsou další podobné dveře do vedlejších laboratoří.

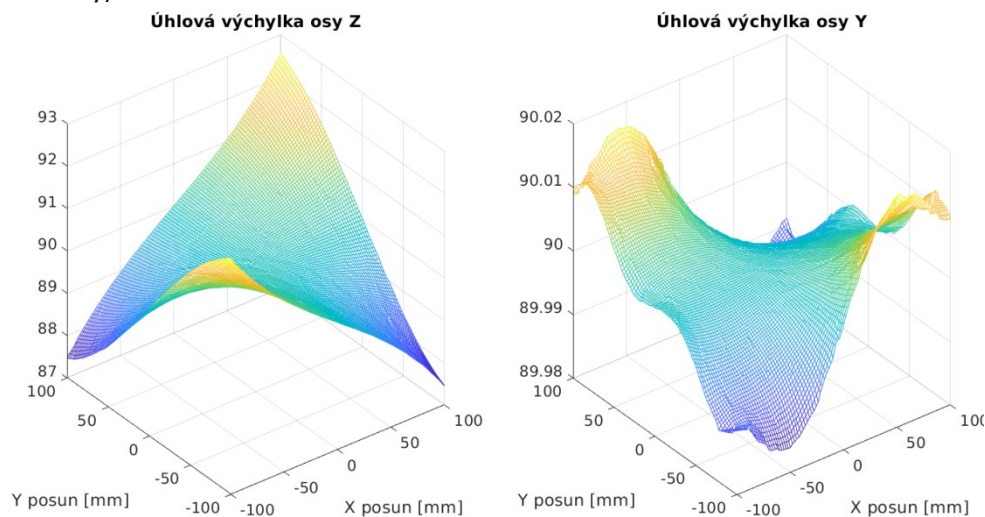
Naštěstí se chyba projeví jen v aktuálně měřeném bodu kalibrační sekvence. Relativní skok při následující změně totiž chybu odstraní, protože po novém skoku se zamrazí nová referenční hodnota, která již bude obsahovat i změnu místního pole. Velikost chyby způsobné otevřením dveří anebo jinou jednorázovou změnou gradientu, závisí na poměru mezi délkou segmentu a velikostí změny pole. Konkrétně u dveří se i v nejhorším případě stále jedná o chybu jen 100 nT, která se dá případně pohledem na rezidua snadno odhalit.

4.3 Lineární metoda kalibrace s kompenzací

Ještě před implementací *thin-shell* vektorové kalibrace byla otestována úspěšnost lineární kalibrace (skoky pouze v jedné ose) s kompenzací rušení. Cílem bylo ověřit metodu snížení reziduí při kompenzací v případě použití delších skoků vhodných pro pomalé magnetometry, resp. magnetometry s precizními pomalými A/D převodníky či voltmetry digitalizující jejich výstup.

4.3.1 Lineární kalibrace z publikace [34]

Metoda byla zkoušena pro naši již zmíněnou publikaci [34] v době, kdy ještě nebyly použité magnetometry kalibrovány v Průhonicích. Konstanty citlivosti senzoru byly určeny jen velmi hrubě a neortogonalita nebyly korigovány vůbec, nebylo tak s čím porovnat dosažené výsledky z hlediska absolutní přesnosti a testovala se pouze možnost dosažení snížení rozptylu hodnot při relativních skocích s pomocí kompenzace rušení a závislost chyby na natočení v ose. Pro testování byla zvolena cívková Merritt osa Y, ne přímo kvůli homogenitě velikosti pole, ale malé citlivosti na natočení senzoru, přestože to spolu úzce souvisí (nehomogenita ve složce podél osy je způsobena postupným zatáčením siločáry).



Obr. 4-7 Úhel vektoru pole v rovině kolmé na osu vybraných cívek

Znovu krátce popíšu metodu pro jednoosou kalibraci magnetometru za předpokladu úplného zarovnání k ose cívkového systému v souladu s notací v publikaci [34]. Pro výstup osy magnetometru zarovnaného k excitované ose cívek lze psát

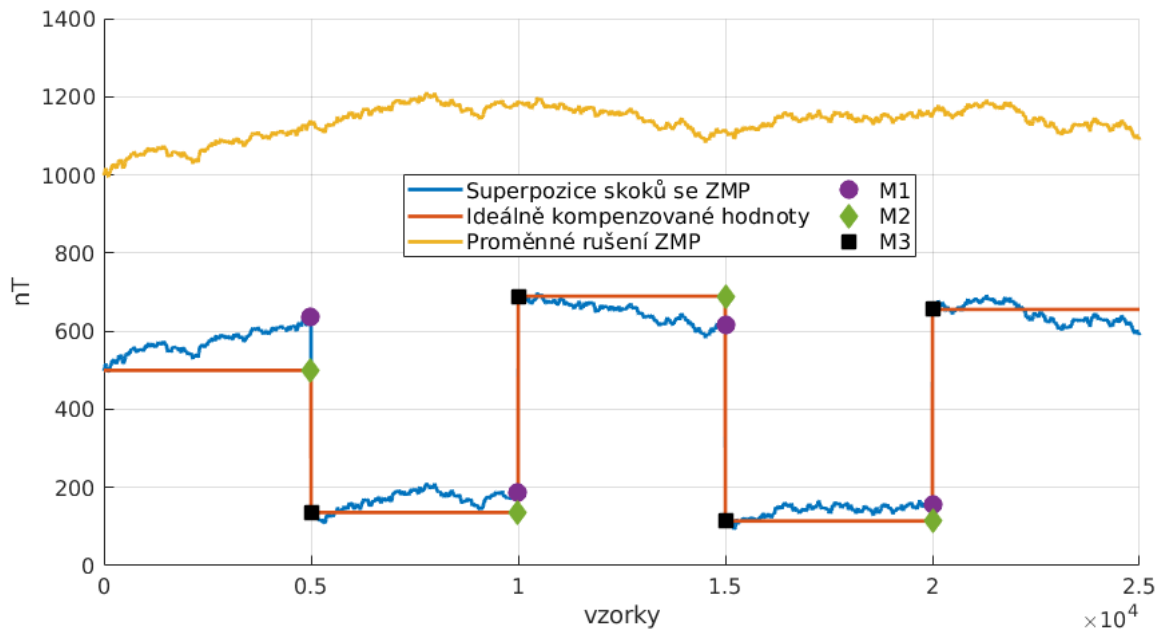
$$E(t) = S(B_c(t) + B_z(t) + B_v(t)), \quad (4-1)$$

kde B_c je MP excitace, B_z je stálá dlouhodobá složka daná ZMP a remanencí okolí, B_v obecně variace mg. pole a S je hledaná citlivost. Kalibrace probíhá pomocí relativních skoků; pro další zjednodušení tedy uvažujme opakující se jednoduchou kalibrační sekvenci $B_c(t_1)=0$ a $B_c(t_2)=B_x$, kde t_1 a t_2 značí delší časové úseky, pak pro kalibraci s kompenzací lze postupovat následovně:

1. V prvním kroku se vybudí zvolená osa cívkového systému na $B_c(t_1)$
2. Poté, co se ustálí výstup referenčního magnetometru, dojde ke spuštění kompenzace rušení
3. Po ustálení výstupu kalibrovaného magnetometru se začne ukládat jeho výstup $E(t_1)$
4. Po zvolené době dojde ke skoku na následující hodnotu kalibrační sekvence $B_c(t_2)$
5. Opakuje se krok 2
6. Opakuje se krok 3
7. Z rozdílu naměřených polí (průměrných hodnot za celé úseky t_1 a t_2) v krocích 3 a 6 se vypočítá citlivost jako $S = \frac{E(t_2) - E(t_1)}{B_c(t_2) - B_c(t_1)}$

Celý postup 1 až 7 se několikrát opakuje. Stálá složka B_z je ideálně konstantní a během výpočtu z relativního skoku se odečte; rušení a variace B_v jsou během měření kompenzovány, viz předcházející kapitola.

Doposud zamlčenou, ale velmi důležitou, součástí postupu, při uvážení kalibrační sekvence delší než dva kroky, je i ukládání hodnoty aktuální velikosti kompenzace těsně před provedením nového/následujícího skoku (například při přechodu mezi krokem 3 a 4). Protože MP se pole během měření hodnoty (krok 3) vlivem rušení mění a jeho změny jsou kompenzovány z proudového zdroje, došlo by při následném skoku na nastavenou hodnotu B_x kalibrační sekvence, ve skutečnosti ke skoku B_x v součtu s poslední zapisovanou hodnotou pole kompenzace. Toto je možné řešit dvěma způsoby. Intuitivní by bylo softwarově zařídit, aby proudový zdroj provedl opravdu relativní skok od aktuálně poslední zapisované hodnoty kompenzace, problémem tohoto řešení je ale postupná akumulace těchto posunů, které by mohlo vést až kvystoupení mimo pracovní rozsah magnetometru.



Obr. 4-8 Ilustrace vzniku nutné korekce na syntetických datech

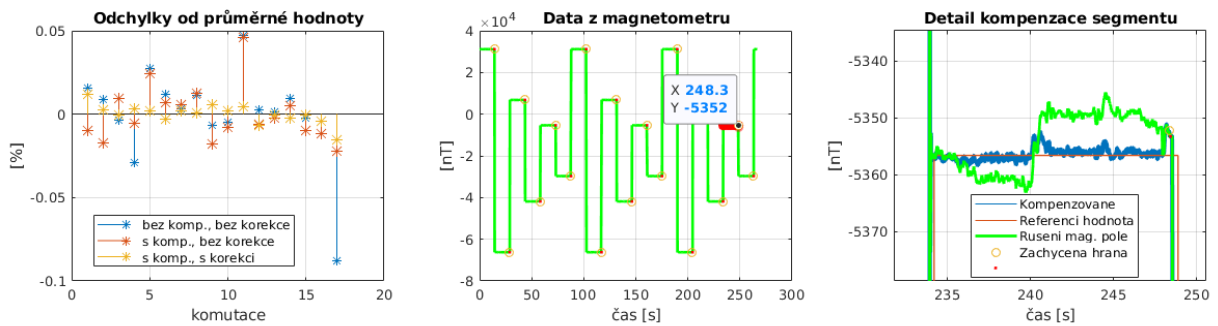
Lepší řešení je tak ukládat hodnotu pole kompenzace těsně před skokem a pouze ji odečítat od myšleného skoku, vztah pro výpočet citlivosti přejde do tvaru

$$S = \frac{E(t_2) - E(t_1)}{(B_c(t_2) - B_c(t_1)) - B_{\text{Komp}}(t_1 \rightarrow t_2)} \quad (4-2)$$

Toto se snažím ilustrovat na Obr. 4-8, kde jsou kvůli přehlednosti voleny 500 nT skoky. Velikost poslední zapisované hodnoty vlastně odpovídá driftu rušení ZMP (s opačným znaménkem) od posledního skoku a v ten okamžik započaté kompenzaci, v ilustraci jde o značky **M1**. Mezi značkami **M3** a **M1** je vždy rozdíl odpovídající skoku excitace. Výše zmíněnou korekci je myšlen tedy rozdíl **M1-M2**. Velikost provedeného/myšleného skoku mezi kompenzovanými hodnotami je po aplikaci korekce rovna **M3-M2**.

Tímto způsobem zůstanou hodnoty pole kalibrační sekvence stále ve zvoleném rozsahu. Stálou složka ZMP je také před spuštěním kalibrační procedury vhodné alespoň hrubě vynulovat.

Díky záznamu okamžitých hodnot kompenzace současně se čtením z magnetometru je možné dopočítat i teoretické hodnoty výsledků bez kompenzace, pouhým součtem těchto údajů.



Obr. 4-9 Původní podoba metody vyhodnocení kalibrace

V levém grafu Obr. 4-9 jsou odchyly citlivostí vypočtených z pěti sekundových úseků vůči jejich průměrné hodnotě. Samotná kompenzace rušení sice sníží odchyly citlivostí, ale teprve až výpočet s odečítáním poslední hodnoty kompenzace od myšleného skoku přinese významnější výsledky. Konkrétně pro kalibraci pro data z Obr. 4-9 ($50\mu\text{T}$ odstupňované schody) došlo ke snížení výběrových směrodatných citlivostí (z provedených 20 různých relativních skoků) postupně z 278 ppm na 170 ppm při kompenzaci a 58 ppm po korekci s odečtením hodnot poslední kompenzace. I přes nevhodné zpracování dat byla tímto metoda v základní verzi ověřena.

Z dalších výsledků byl sestaven počáteční rozpočet nejistot, který se později ukáže, především kvůli nehomogenitě jiných než Y-Merritt cívek, jako optimistický, resp. ho v závěru upravím o nové poznatky.

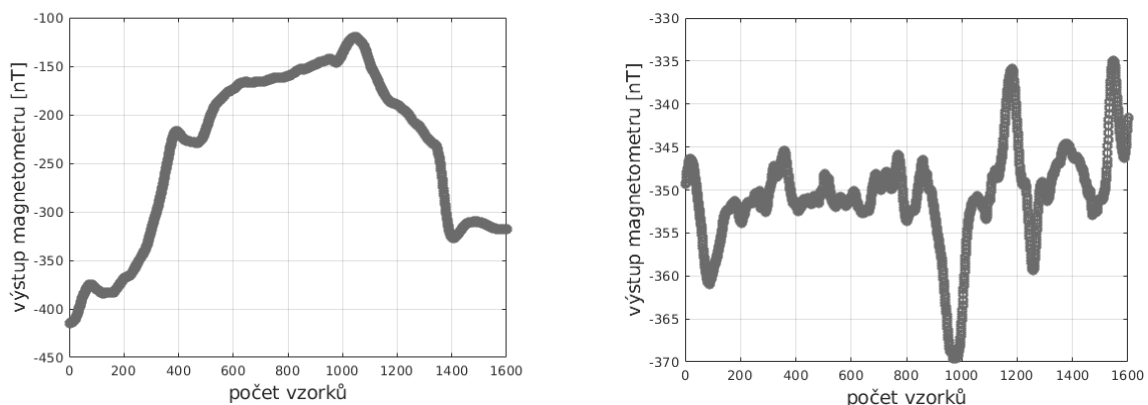
Zdroj nejistoty	Typ nejistoty	nerozšířená nejistota [ppm]
ČMI kalibrace cívek	B	70
Rezistor METRA	B	15
Multimetr Solartron 7071	B	14
Nehomogenita Merritt $50 \times 50 \text{ mm}^2$ oblast	B	50
1° výchylka z kalibrované osy	B	150
Kalibrace proudového zdroje	A	5
Výběrová směrodatná odchylka průměrů skoků	A	91
Nelinearita proudového zdroje	B	4
Celkem	A+B	318

Tab. 10 Původní rozpočet nejistot pro lineární kalibraci v Y („Merritt“) ose

4.3.2 Kalibrace s novým software

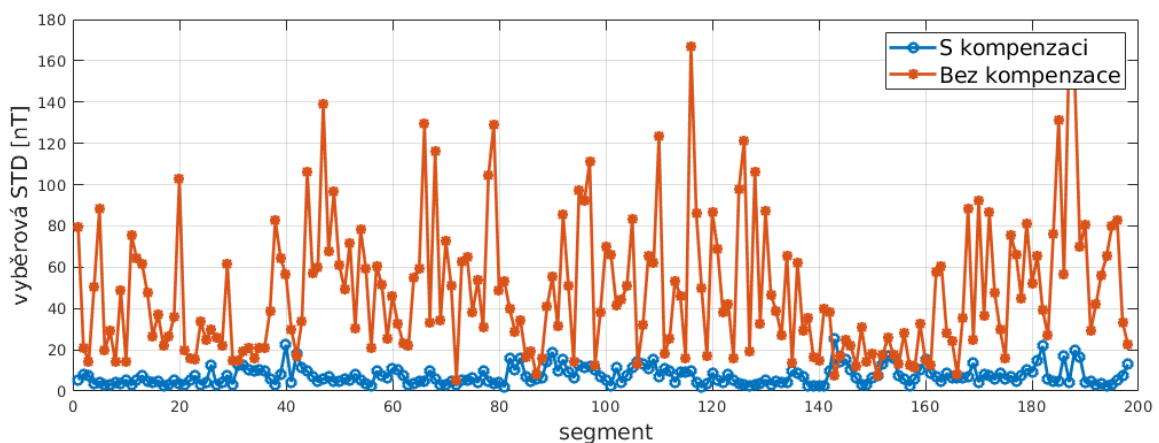
V současné podobě již lze nejen lineární jednoosou kalibraci provést pomocí modulu sekvence kalibračních skoků, který již vytváří kalibrační soubor ve tvaru popsaném v předcházející kapitole. Součástí zápisu v souboru (viz Obr. 3-5) jsou i hodnoty kompenzace těsně před skokem a během jeho *parsování* tak lze ihned hodnoty odečíst od myšlených skoků. Pro řádné vyhodnocení kompenzované kalibrace jsem provedl další měření alespoň sta relativních $\pm 50\mu\text{T}$ skoků s průchodem nulou v nejméně zarušené vertikální ose se segmenty o délce alespoň 5 sekund. Nejdříve s vypnutou kompenzací rušení a posléze se zapnutou.

Ze zobrazení jednoho zachyceného segmentu (1600 vzorků při 225 sa/s je cca 7 s) již po ustálení hodnoty, zvláště pro nekompensovanou a kompenzovanou variantu, je vidět výrazný rozdíl v rozptylu hodnot. Testovaný magnetometr je dříve kalibrován a tak můžu určit výběrovou směrodatnou odchylku dat v segmentu ve správných jednotkách, 5,6 nT pro kompenzovaný segment a 86,4 nT pro nekompensovaný segment z dat na Obr. 4-10.



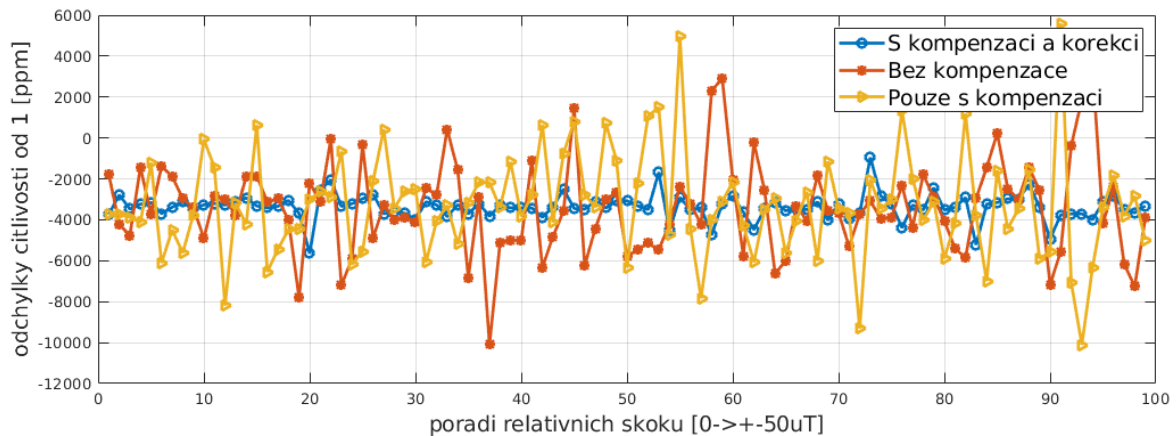
Obr. 4-10 Srovnání zachycení typického průběhu segmentu s vypnutou a zapnutou kompenzací

Stejně tak mohou nalézt výběrovou směrodatnou odchylku z dat segmentů všech relativních skoků (100 měření hodnoty skoku a 100 měření průchodu nulou) – viz Obr. 4-11.



Obr. 4-11 Výběrová směrodatná odchylka segmentů všech relativních skoků

Výpočet citlivosti lze provést velmi jednoduše pomocí výše uvedeného vztahu (4-2). A to dělením měřených velikostí relativních skoků pomocí relativních skoků zapisovaného pole (s odečtením několikrát zmíněné poslední hodnoty kompenzace, dále nazývané korekcí myšleného skoku).



Obr. 4-12 Výsledky získaných citlivostí z jednotlivých relativních skoků [0->50 μ T]

Posun -3000 ppm vůči Průhonické kalibraci je způsoben nehomogenitou cívek a je několikrát změřen i v následujících měřeních včetně vysvětlení. Směrodatná odchylka získaných citlivostí je vlastně výběrová směrodatná odchylka (STD) výběrových průměrů, ze které chci od začátku posuzovat nejistotu určení konstanty citlivosti.

Pro citlivosti bez kompenzace a s kompenzací, ale bez korekce s odečtením poslední zapisované hodnoty, vychází STD sta výběrových průměrů řádově 2500 ppm, oproti tomu po kompenzaci včetně korekce klesne STD na 622 ppm.

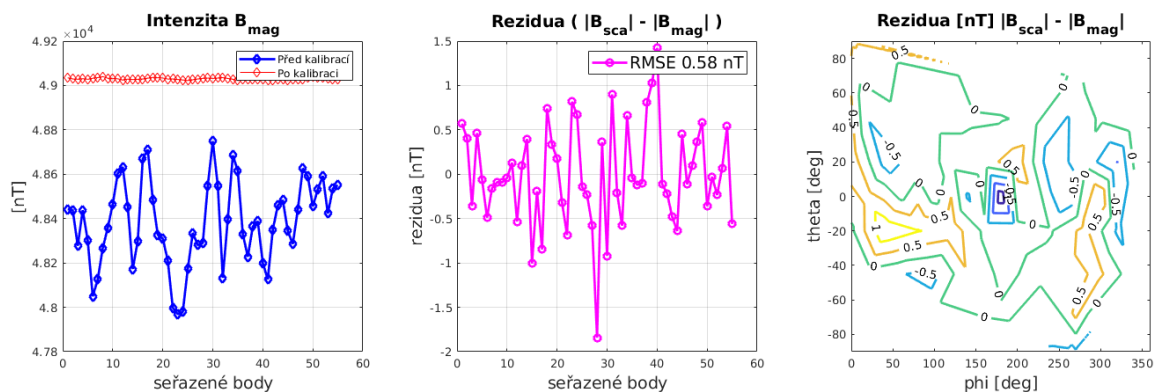
Přepočítáním na jednotky nT ze znalosti velikosti kalibračních skoků, získám hodnoty bez kompenzace 125 nT a s kompenzací včetně korekce 31 nT. Nekompenzovaný výsledek STD v nT řádově odpovídá hodnotám odhadnutým v kapitole 2.5 pro segmentovaná data s odečtením počáteční hodnoty (80 nT pro 5s a 100 nT pro 10s segmenty).

Výsledek po kompenzaci je zhruba jen dvakrát horší než odhad v kapitole 2.5.1, kde jsem pro vliv půl sekundového zpoždění počítal STD zhruba 15 nT pro 5s segmenty a v kapitole 2.5.2 také 15 nT pro 5s segmenty z reziduí.

4.4 Rychlá *thin-shell* kalibrace bez kompenzace

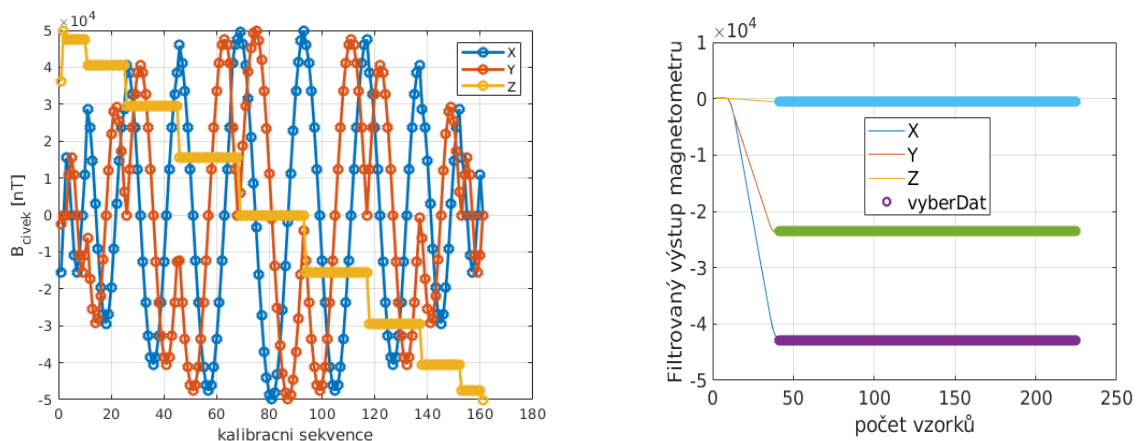
Protože jsou všechny použité testovací magnetometry dostatečně rychlé, použil jsem je také pro vyhodnocení naimplementované metody bez kompenzace variací a rušení. Jedna kalibrační sekvence, odběr 161 bodů pomocí relativních skoků s průchodem nulou, pak mohla být vykonána do 5 minut a to umožnilo rychlejší testování metody. Použitá metoda *thin-shell* vychází z [20] a je podrobně popsána v kapitolách 1.7 a 3.

Následují výsledky kalibrace magnetometru CTUMAG viz Tab. 4. Pro lepší srovnání uvedu výsledek skalární kalibrace v Průhonicích. Jedná se o vektorově kompenzovaný magnetometr a tak jsou rezidua od intenzity měřené skalárním magnetometrem po skalární kalibraci minimální, v řádu jednotek nT. Měření bylo provedeno pomocí ruční rotační platformy v 51 bodech pouze jedním průchodem za zhruba 20 minut. U kalibrace ostatních magnetometrů, konkrétně FLAT s třemi individuálně kompenzovanými plochými jádry, jsou dosažená rezidua o řád horší.



Obr. 4-13 Výsledek skalární kalibrace CTUMAG Průhonice

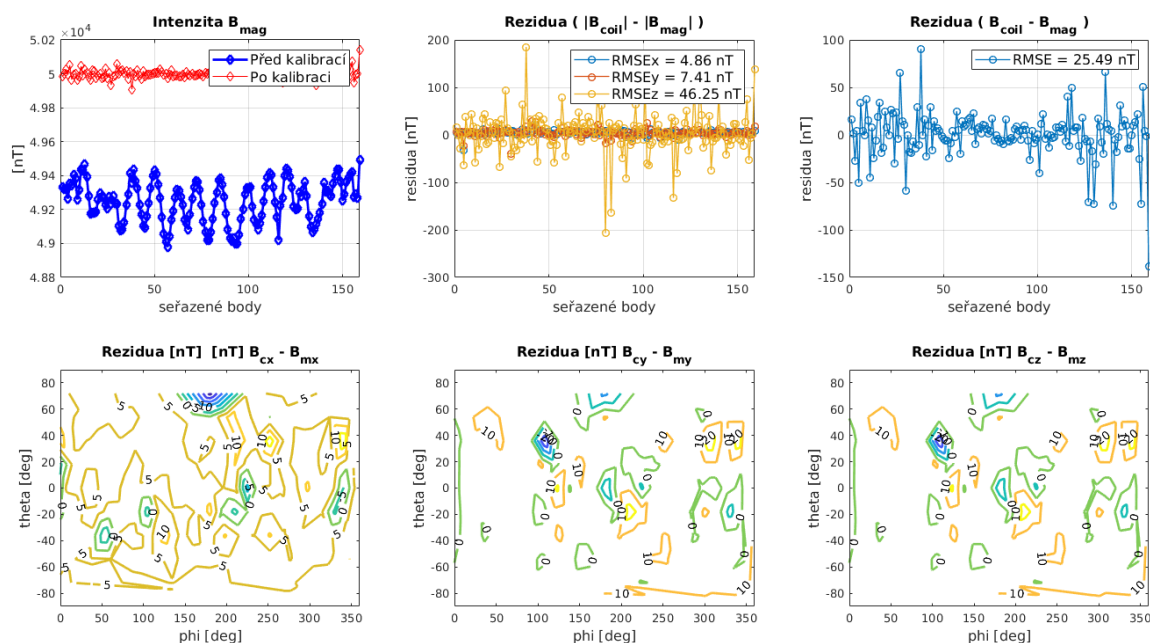
V tomto konkrétním experimentu byla velikost sférické plochy zvolena 50 μT a doba záznamu po zadání požadavku na změnu pole přesně jedna sekunda (225 vzorků). V odezvě filtrovaného výstupu magnetometru na jeden skok můžeme pozorovat zpoždění počátku změny 40 ms a dalších 150 ms pro plné ustálení.



Obr. 4-14 Kalibrační sekvence *thin-shell* a zachycení jednoho měření po skoku pole

Ze zbytku dat jednoho skoku se vybere segment po ustálení, který nepřekračuje uživatele zvolený práh odchylky od střední hodnoty a zprůměruje se. Zde se volí celý zbytek do konce, bez újmy na obecnosti by stačilo vzít první vzorek po plném ustálení.

Nejdříve uvedu výsledek cívkové kalibrace při ponechání výstupu magnetometru nekorigovaného kalibrační maticí z Průhonic. Z jedné 5 minutové kalibrace vychází celková RMSE jen chyba 25 nT.



Obr. 4-15 Výsledek cívkové kalibrace nekorigovaného CTUMAG

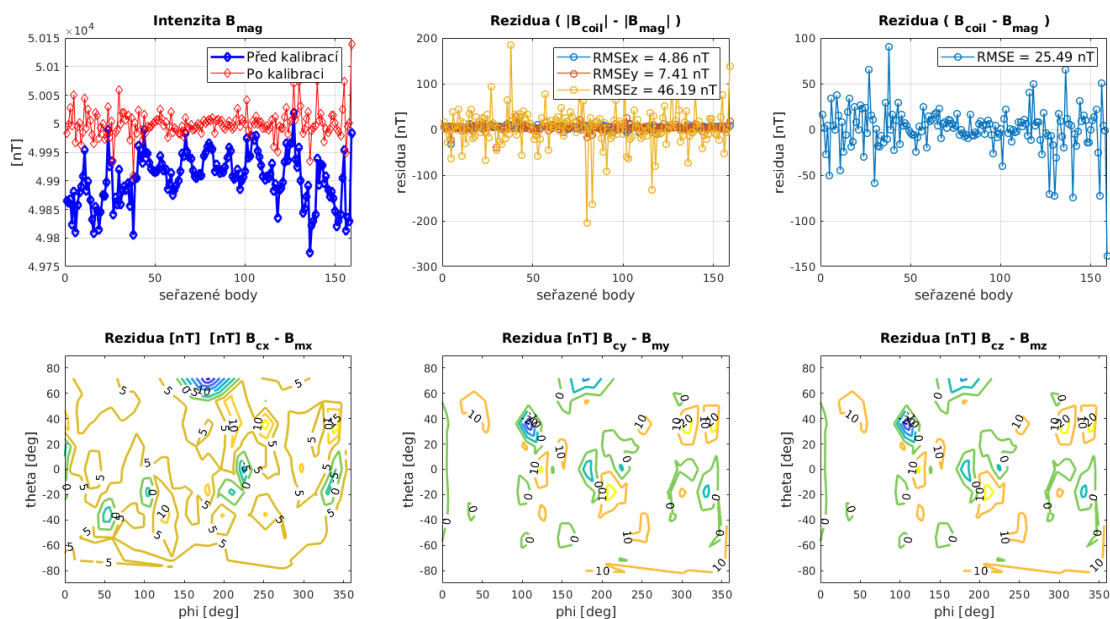
Ve výpisu po složkách, zcela převažuje RMSE chyba ve vertikální složce. Residua jednotlivých složek jsou náhodně rozprostřena. Ale v reziduích intenzity lze zřetelně zaznamenat menší rezidua v oblasti, kdy se vytváří body sférické plochy v horizontální rovině a chyba způsobená vychýlením do vertikální složky je minimální.

V porovnání výsledků lze vidět jednak rozdíl v citlivostech i neortogonalitách. Offsets nelze kvůli relativním skokům nalézt. O orientaci k cívkám, jako výsledku vektorové kalibrace se vrátím v následující kapitole.

Cívková kalibrace	X, u1	Y, u2	Z, u3
Citlivost [EU/nT]	0,9811660	0,9867300	0,9869900
Neortogonality [deg]	0,280	-0,103	-0,236
Orientace k cívkám Z''Y'X	0,850	359,510	179,090
Skalární kalibrace Průhonic	X, u1	Y, u2	Z, u3
Citlivost [EU/nT]	0,981979	0,988495	0,990082
Neortogonality [deg]	0,285	-0,006	-0,192
Offsets [EU]	114,20	91,67	189,76

Tab. 11 Výsledné hodnoty cívkové kalibrace v porovnání se skalární kalibrací pro magnetometr CTUMAG

Pro lepší srovnání budu dále všechny výsledky uvádět vztažené relativně vůči výsledkům kalibrace z Průhonic. Data jsou stále zaznamenávána v surové podobě, jen se před vstupem do výpočtu kalibrace data korigují odečtením offsetů a násobením transformační maticí **PS**. Zopakováním výpočtu kalibrace na totožných datech, avšak s provedením korekce Průhonicou kalibrací, se hodnoty RMSE chyb nemění, to mimochodem také znamená, že residua jsou způsobena hlavně rušením a nejsou způsobena nedokonalostí výpočtu mé implementace vektorové kalibrace. Jediný rozdíl je vidět v grafu intenzity před a po kalibraci.



Obr. 4-16 Výsledek cívkové kalibrace korigovaného CTUMAG

Hodnoty citlivostí budu vyhodnocovat jako ppm odchylku od 1, tedy ideálního stavu, kdy by se hodnoty shodovaly se skalární kalibrací. Stovky ppm by bylo ještě možné přičíst gradientu mezi kalibrovaným a skalárním magnetometrem při kalibraci v Průhonicích, který nebyl měřen. Ale tisíce ppm (desetiny procenta) jsou způsobeny, jak už bylo naznačeno, hlavně nehomogenitou cívkového systému a chyba silně závisí na poloze senzoru v nich. Tomu se věnuji v samostatné kapitole.

relativní vůči kalibraci	X, u1	Y, u2	Z, u3
Citlivost [PPM]	-829	-1786	-3127
Neortogonality [deg]	-0,006	-0,096	-0,044
Orientace k cívkám Z''Y'X	0,840	359,510	179,090

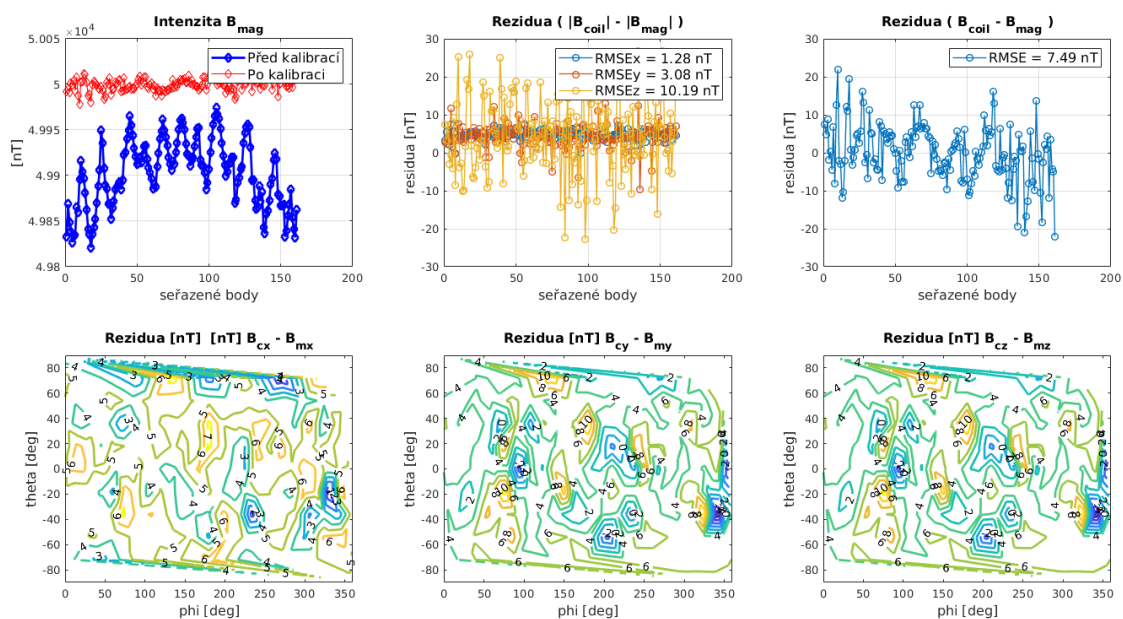
Tab. 12 Relativní výsledky vektorové kalibrace CTUMAG vůči Průhonicím

Pro získání stejných relativních hodnot jako v tabulce výše stačí odečíst nebo dělit příslušné řádky tabulky Tab. 16.

Ke snížení velikosti reziduí lze použít postup naznačený v návrhu metody a to opakování kalibrační sekvence. Zopakoval jsem měření stejným způsobem a hlavně v naprosto stejné poloze magnetometru ještě desetkrát. Celé měření nezabralo více než hodinu a byl tak eliminován i vliv případného teplotního driftu offsetů.

Výsledky je pak možné zpracovat dvojím způsobem. První méně vhodný způsob je vložení dat ze všech měření do výpočtu najednou. Výsledek bude na hranici rozlišitelnosti stejný, kvůli minimalizaci čtvercových odchylek, ale výpočtem RMSE přes všechny vzorky vyjde zdánlivě stejná nezmenšená hodnota. Rezidua odpovídajících si bodů lze ale průměrovat a tím se sníží i celková RMSE chyba počítaná dle vztahu (1-7). Ztrácí se ale informace o rozptylu parametrů. Lepší je tedy provést výpočet kalibrace (citlivostí, neortogonality a úhlů rotační matice k cívkám) pro všechna měření zvlášť a posoudit jejich rozptyl ze statistické směrodatné odchylky.

Již z výsledného grafu reziduí v rovině i polárních souřadnicích lze pozorovat výrazné zlepšení.



Obr. 4-17 Výsledek desíti opakování cívkové kalibrace CTUMAG

Hodnoty RMSE klesly dle očekávání téměř ve všech případech s odmocninou z 10. V 2D grafu reziduí je vidět mnohem větší detail a i konturový graf je hustější díky menším vzájemným odchýlkám. Tabulka výsledků lze rozšířit o výběrový průměr a standardní odchylku souboru kalibrací. Pro vykreslení histogramu 10 měření nestačí. Ale dá se předpokládat, že mají rezidua opravdu normální rozdělení.

relativní vůči kalibraci	X, u1	Y, u2	Z, u3	průměr			standardní odchylky		
Citlivost [PPM]	-835	-1809	-3210	-835	-1809	-3210	14	29	85
Neortogonality [deg]	-0,007	-0,081	-0,039	-0,007	-0,081	-0,039	0,002	0,007	0,004
Orientace k cívkám Z''Y'X	0,850	359,510	179,090	0,846	359,51	179,09	0,003	0,001	0,001

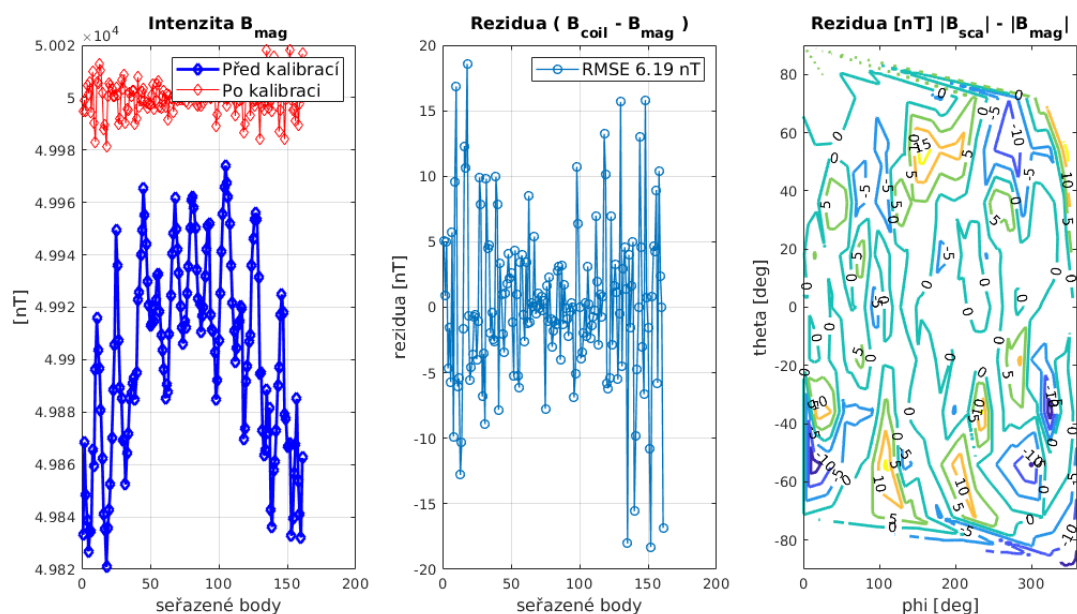
Tab. 13 Výsledky vícenásobné kalibrace CTUMAG se statistikou parametrů, parametry jsou relativní vůči skalární kalibraci v Průhonicích

K zajištění rovnoměrného rozložení je průchod sekvence z toho důvodu ještě navíc náhodný, aby se případné krátkodobé rušení nepřeneslo pouze do určité oblasti bodů plochy kalibrace. Standardní odchylka citlivosti v Z ose 85 ppm koresponduje s měřenými hodnotami rušení, resp. jeho vlastní výběrové směrodatné odchylky počítané odhadem v kapitole 0. Při 50μT relativním skoku lze 85 ppm přepočítat na 4,25 nT. Odhad STD rušení pro 1sekundové segmenty s odečítáním počáteční hodnoty byl pro osu Z dokonce 32 nT (10 nT po dělení √10) viz Obr. 2-29. Měření jsem zopakoval druhý den do 10 minut po zapnutí proudového zdroje a magnetometru, z důvodu otestování možného pozorování odchylky vlivem teplotní závislosti. Kromě prvního úhlu orientace vůči cívkám jsou všechny hodnoty od sebe vzdálené maximálně o 2σ. RMSE hodnoty pro jednotlivé složky jsou řádově stejné (RMSE_x=1.29 nT, RMSE_y=3.4 nT, RMSE_z=10.63 nT a RMSE=8.24 nT).

relativní vůči kalibraci	X, u1	Y, u2	Z, u3	průměr			standardní odchylky		
Citlivost [PPM]	-878	-1835	-3377	-881	-1843	-3388	29	35	61
Neortogonality [deg]	-0,009	-0,079	-0,038	-0,009	-0,08	-0,039	0,001	0,002	0,005
Orientace k cívkám Z''Y'X	0,880	359,500	179,090	0,878	359,5	179,09	0,001	0,001	0,002

Tab. 14 Výsledky opakované vícenásobné kalibrace CTUMAG - parametry jsou relativní vůči skalární v Průhonicích

Stejná data z kalibrace je možné zpracovat i pomocí metod pro skalární kalibraci, pouze se ztratí informace o natočení vůči cívkám. Zde uvádím výsledek skalární kalibrace na shodných datech jako na Obr. 4-17. Zároveň tím srovnám i numerické výsledky jednotlivých metod výpočtu.



Obr. 4-18 Výsledek skalární kalibrace na totožných datech

Zde je oproti minulému obrázku navíc i konturový graf reziduí v intenzitě, ve kterém je opět vidět, že největší rezidua jsou opravdu na horní a spodní části ($\text{abs}(\theta) \rightarrow 90^\circ$) povrchu koule. Z numerického srovnání výsledků dat z vícenásobných kalibrací (tabulky Tab. 13 a Tab. 14) lze konstatovat rozdíl ve výsledku v řádu maximálně desítek PPM vůči stejným datům.

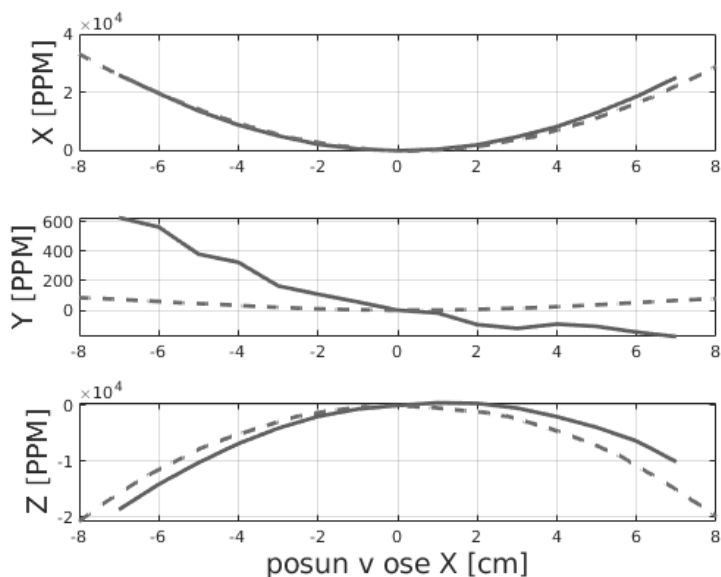
Výpočet metodou		Kalibrace z Tab. 13			Kalibrace z Tab. 14		
		X, u1	Y, u2	Z, u3	X, u1	Y, u2	Z, u3
Olsen	[PPM]	-872	-1789	-3182	-866	-1831	-3407
Elipsoid	[PPM]	-880	-1791	-3184	-868	-1839	-3380
Brauer	[PPM]	-835	-1809	-3211	-877	-1835	-3376
BrauerQR	[PPM]	-835	-1809	-3210	-878	-1835	-3377
Olsen	[deg]	-0,006	-0,081	-0,037	-0,008	-0,080	-0,037
Elipsoid	[deg]	-0,007	-0,080	-0,037	-0,008	-0,080	-0,037
Brauer	[deg]	-0,007	-0,081	-0,039	-0,009	-0,080	-0,038
BrauerQR	[deg]	-0,007	-0,081	-0,039	-0,009	-0,079	-0,038

Tab. 15 Numerické srovnání výsledků různých metod vyhodnocení rychlé kalibrace magnetometru CTUMAG - parametry jsou relativní vůči skalární kalibraci v Průhonicích

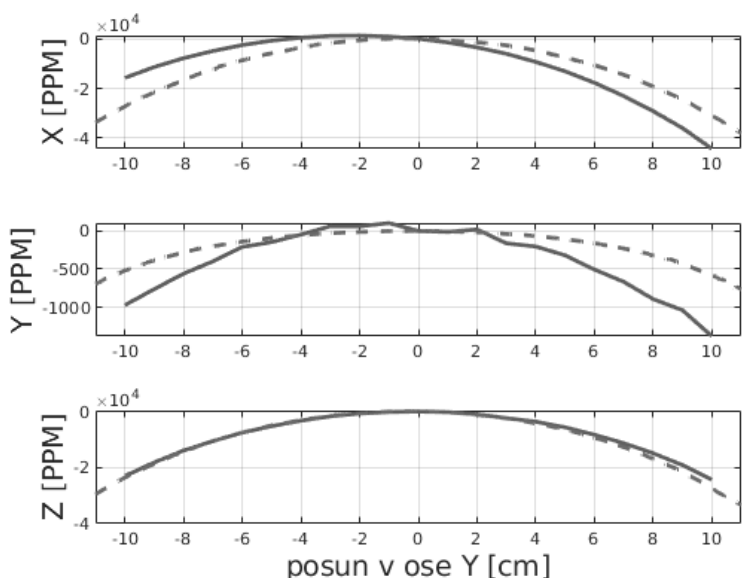
Hodnotou PPM se zde stále myslí rozdíl získaných citlivostí oproti citlivostem získaných při kalibraci v Průhonicích, resp. rozdíl od jedničkové citlivosti při aplikaci Průhonicí kalibrační korekční matice před provedením výpočtu kalibrací zde uvedených.

4.5 Homogenita cívek jak zdroj majoritní chyby kalibrací

Při hledání důvodu rozdílných výsledků kalibrace v závislosti na poloze senzoru jsem ověřoval i shodu homogenity cívek v laboratoři se simulací homogenity cívek v programu ANSYS viz kapitola 2.2.2.2. K měření byl použit CTUMAG senzor a jednoduchá excitace příslušných os obdélníkovým průběhem s amplitudou 60 μT . Měřená homogenita pole je vypočtena z naměřené amplitudy hodnoty v podílu s hodnotou při nulovém posuvu. Senzor byl posouván pouze v horizontální rovině. Homogenita je změřena pro excitace všech tří os zvlášť. Vertikální osy v grafech níže nejsou ve stejném měřítku a hodnoty odchylek jsou relativně vztažené k hodnotám v předpokládaném středu systému, nevypovídají tak o reálné přesnosti kalibrovaných cívkových konstant nebo proudového zdroje.



Obr. 4-19 Měření homogenity při posuvu v ose X



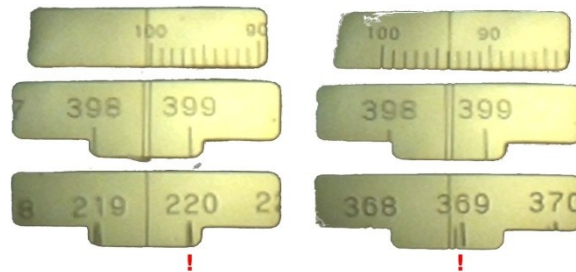
Obr. 4-20 Měření homogenity při posuvu v ose Y

Reálná data se shodují s ANSYS simulací (přerušovaná čára). Nepatrné odchylky lze odůvodnit nepřesným určením středu senzoru na jeho krabici a úhlem natočení.

4.6 Ověření úhlových kalibrací přímým měřením

4.6.1 Měření s teodolitem

Velkou část úsilí jsem také věnoval umístění teodolitu do systému pro experimenty s přímým měřením neortogonalit cívek a magnetometrů (doposud jsme uvažovali cívkový systém jako ortogonální). Používal jsem upravený teodolit Meopta T1c zbavený většiny feromagnetických součástí, který má gradovou stupnici a setinové dělení. Vyrobil jsem držák z MDF k aretaci teodolitu do středu systému. Protože jsou cívky relativně malé a nedá se do nich „strčit hlava“, tak jsem na odečtení úhlů musel používat Raspberry Pi s kamerou, kterou jsem přikládal na kukátko k pozorování stupnice. Bohužel byl přesný odečet úhlu ztížen hlavně vadou dvojrýsky optického mikrometru, pravděpodobně způsobenou axiálním vychýlením skleněného kruhu se stupnicí. V důsledku toho se paprsek při dvojitým průchodu stupnicí mírně vychýlil a po odrazu z planparalelního hranolu optického mikrometru se rozjžděla dvojrýska horizontální stupnice v závislosti na natočení kruhu viz detaily konstrukce teodolitů [10].



Obr. 4-21 Detail chyby dvojrýsky horizontální stupnice teodolitu T1c

Přesnost odečtení se ze setin rázem snížila na desetiny. Ortogonalitu cívek jsem tak nebyl schopen změřit s rozumnou nejistotou. Teodolit byl tak využíván zejména jen jako otočná platforma.



Obr. 4-22 CTUMAG magnetometr na teodolitu v cívkách

K ověření výsledků získané rotační matice vzájemné orientace cívkového systému a vnitřního souřadného systému magnetometrů jsem umístil CTUMAG magnetometr na držák dalekohledu teodolitu srovnaném do vodorovné polohy (dalekohled i teodolit). Poté jsem provedl sérii rychlých kompletních kalibrací (viz kapitola 4.4, bez kompenzace a pouze jeden průchod 161 bodů) s postupným pootáčením celého magnetometru podle jeho osy Z otáčením horizontální osy teodolitu (postrkem limbu).

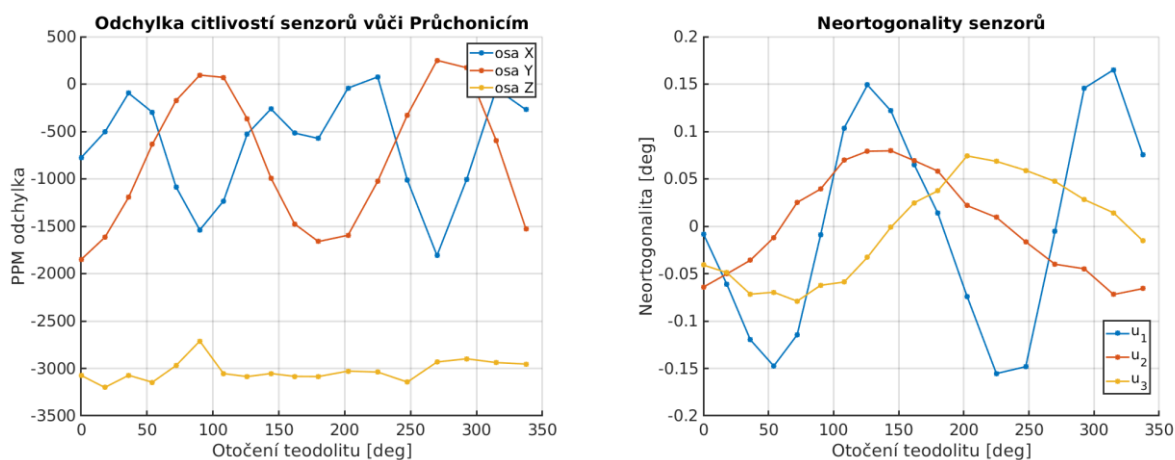
Výsledkem je tabulka Tab. 16, kde jsou matice vzájemných orientací rozloženy na korespondující Eulerovy úhly v pořadí ZY'X''. Úhel otočení podle Z je v celé tabulce pro lepší názornost posunut o 0.286° odpovídající prvotnímu natočení.

Úhel limbu Z	Z(cal)	rozdíl Z	Y'(cal)	X''(cal)
0,00	0,00	0,00	0,17	180,28
18,00	18,08	-0,08	0,16	180,29
36,00	36,04	-0,04	0,14	180,30
54,00	53,94	0,06	0,14	180,30
72,00	71,94	0,06	0,12	180,30
90,00	90,00	0,00	0,11	180,29
108,00	108,12	-0,12	0,11	180,26
126,00	126,07	-0,07	0,11	180,26
144,00	144,07	-0,07	0,11	180,24
162,00	162,02	-0,02	0,12	180,23
180,00	179,99	0,01	0,13	180,22
202,50	202,46	0,04	0,14	180,20
225,00	224,87	0,13	0,16	180,20
247,50	247,29	0,21	0,20	180,20
270,00	269,93	0,07	0,21	180,21
292,50	292,54	-0,03	0,23	180,24
315,00	315,09	-0,08	0,21	180,27
337,50	337,50	0,00	0,20	180,31

Tab. 16 Srovnání výsledků úhlů rotace magnetometru z výsledku kalibrace a odečtu z teodolitu

Vzhledem k nehomogenitě cívek a problémům se stupnicí teodolitu je výsledná odchylka vypočteného úhlu z kalibrace a odečteného ze stupnice více než přijatelná. Odchylka se v závislosti na otočení pohybuje v rozsahu -0.12 ° až 0.21 °. Navíc mohla být reálná osa Z magnetometru mírně vychýlená od mechanické. V době měření jsem ještě neměl implementovanou metodu pro nalezení jejich vzájemné orientace.

Pokud vykreslím závislost měřených odchylek citlivostí od 1 a úhly neortogonalit po korekci kalibrační matic z Průhonic (referenční hodnoty) viz Obr. 4-23, pak lze pozorovat změny v závislosti na tom, jak se jednotlivé senzory pohybují v nehomogenním poli cívkového systému. Sensor osy Z byl nejblíže ose otáčení a proto má změna jeho citlivosti nejmenší amplitudu. Absolutní velikost odchylky citlivosti osy Z je dána její špatnou kalibrací.



Obr. 4-23 Závislost citlivostí a úhlu neortogonalit na otočení senzoru v reálných cívkách

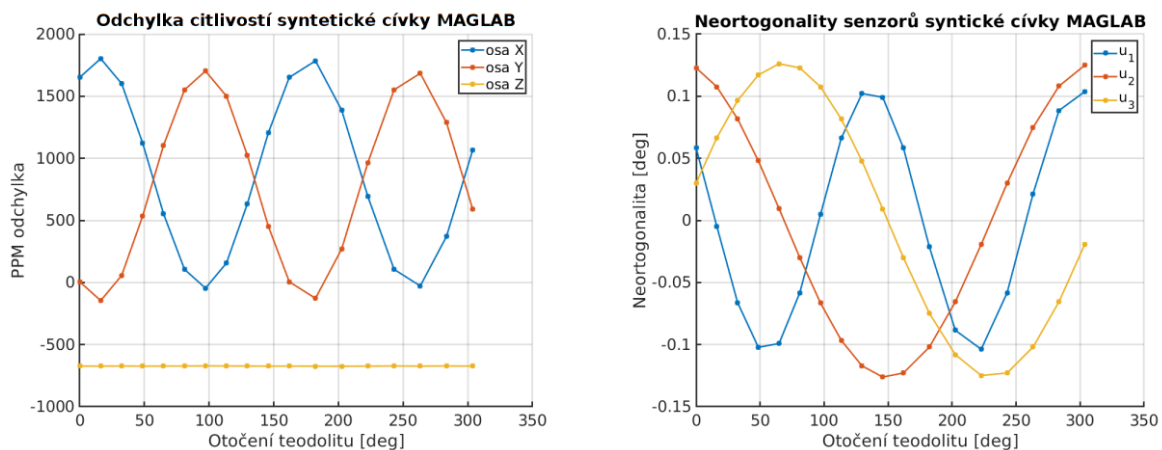
4.6.2 Syntetické cívky – ověření vlivu nehomogenit

Závislost parametrů na úhlu natočení jsem ověřil simulací v syntetických cívkách, zahrnujících jejich nehomogenitu a více popsanych v kapitole 3.2.2 pro následující parametry senzoru.

	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
Střed krabice	20	10	-10
Offset senzoru X	0	0	0
Offset senzoru Y	0	0	0
Offset senzoru Z	0	0	0

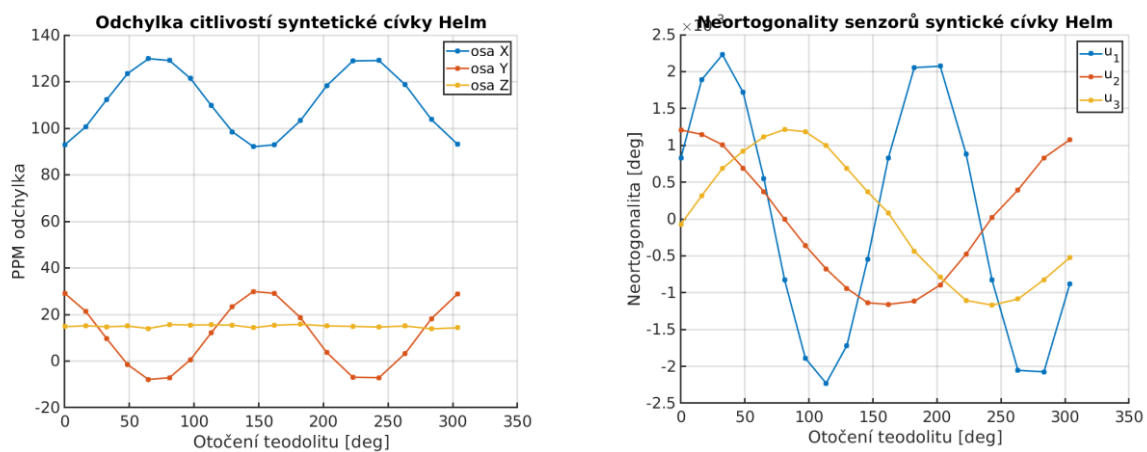
Tab. 17 Parametry sensorové trojice v syntetických cívkách při ověření měření na teodolitu

Tvar simulovaných odchylek citlivostí v závislosti na natočení je pro zvolené vstupní parametry shodný s reálným měřením. Neortogonalita jsou zhruba poloviční. Získaná závislost citlivostí je intuitivní a díky symetrii vstupních parametrů stačí popsat závislost pouze pro jeden senzor. Z dřívějších měření a simulací vím, že odchylka od středu osy X je zhruba 2000 ppm ve 2 cm. Senzor je při otáčení stále vzdálen 2 cm od středu, ale mění se osa jeho citlivosti. Odchylky blížící se nule je dosaženo při natočení senzoru v ose homogenních Y „Merritt“ cívek. Změna polarity odchylek mezi simulací a reálným měřením je lehce zdůvodnitelná. V případě simulace předpokládám absolutní přesnost vytvářeného pole. Při reálném měření citlivosti osy Y, jak předvedu v následující kapitole, vychází odchylka Y citlivosti zhruba -2000 ppm oproti Průhonicím, proto se celý graf jeví posunutý. Nehomogenita osy X je také při axiálním posuvu podél osy nejdříve rostoucí viz Obr. 4-19 a Obr. 2-19.



Obr. 4-24 Simulace závislosti kalibrace na otočení senzoru v MAGLAB cívkách

Pro srovnání jsem provedl simulaci i pro kulaté Helmholtzovy cívky se stejnými vstupními parametry. Amplituda odchylek všech citlivostí je okolo 50 ppm a odchylka získaných úhlů neortogonalit se drží pod 5 tisícinu stupně (zhruba 18 úhlových vteřin).

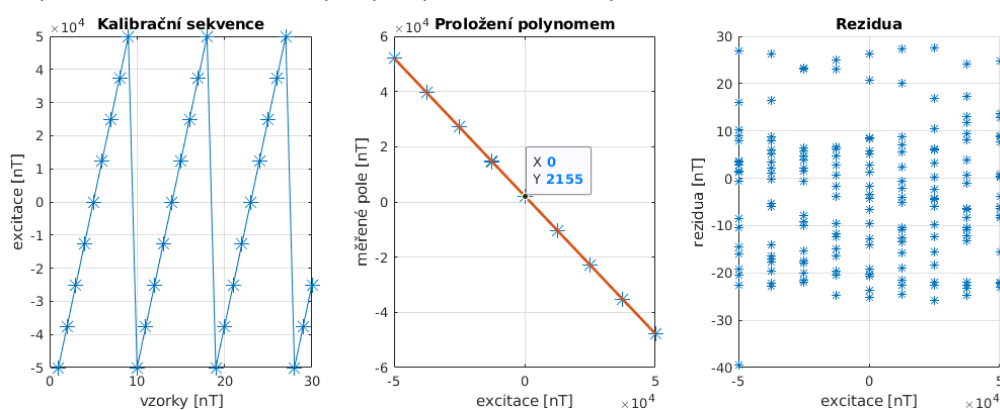


Obr. 4-25 Simulace závislosti kalibrace na otočení senzoru v kruhových cívkách

4.7 Ověření jednotlivých citlivostí senzorů rychlou lineární kalibrací

Abych ověřil získané citlivosti magnetometrů získané při Průhonické skalární kalibraci a co nejvíce minimalizoval vliv nehomogenity cívkového systému, přistoupil jsem k měření citlivosti každé osy magnetometru zvlášť, při zarovnání pouze do Y-Merritt osy cívek. Využil jsem hotového držáku magnetometru na teodolitu v cívkovém systému k zarovnání. Vychýlení měřené osy z horizontální roviny jsem předpokládal minimální, resp. jsem ho minimalizoval pomocí postupu s minimalizací odezvy aktuálně měřené osy magnetometru na obdélníkovou excitaci vertikálních cívek. Stejně tak jsem postupoval i při zarovnání v azimutu, kdy jsem ale minimalizoval odezvu z excitace Y osy a následně provedl přesné otočení o 90 ° pomocí odečtu stupnice teodolitu. Skoky $\pm 50 \mu\text{T}$ jsem byl při detekci nulové odezvy schopen snížit řádově na 1000 nT_{pp} .

Samotné měření jsem provedl bez hrubého odečtení ZMP a kalibrační sekvence se skládala z postupné excitace $\pm 10 \mu\text{T}$, $\pm 20 \mu\text{T}$ a $\pm 30 \mu\text{T}$, bez kompenzace variací. K výpočtu jsem použil jednak obyčejné proložení výstupu aktuálně měřené složky pomocí polynomu prvního řádu (posunuté přímky), kdy ale může vzniknout chyba při špatně zarovnaných osách.



Tab. 18 Naivní lineární kalibrace proložením přímkou

Ve druhém případě jsem proto pro výpočet použil postup pro výpočet cívkové konstanty cívek z vypočítané totální intenzity pole ze všech tří složek výstupu magnetometru. Jde přímo o metodu skalární kalibrace cívkového systému v přítomnosti zemského pole, která byla zmíněna v kapitole 1.6. Skalární sensor je zde pouze nahrazen tříosým magnetometrem, který by při správné vlastní kalibraci, měl při výpočtu velikosti vektoru ze složek aproximovat měření intenzity (dále nazývám metodu pseudoskalární). Tento postup (pseudoskalární kalibraci cívek) jsem zkoušel z důvodu snahy použití pro měření neortogonalit cívkového systému nepřímým způsobem, ke kterému se vrátím v následující kapitole. Výsledné citlivosti v jednotkách PPM, v tabulce Tab. 19, opět vznikly z rozdílu výsledných citlivostí a jedničky, vyjadřující shodu kalibrace cívkách se skalární kalibrací v Průhonících.

	Pseudoskalární kalibrace cívkové konstanty			Naivní kalibrace proložením př.	
	Citlivost [PPM]	Intenzita ZMP [nT]	Úhel k vektoru ZMP [°]	Citlivost [PPM]	Projekce ZMP [nT]
CTUMAG X	-1698,6	39484	183,743	-1585	2287
CTUMAG Y	-1767,7	39495	183,629	-1760,8	2042
CTUMAG Z	-1489,7	39548	183,718	-1718,1	2159
VECTOR X	-1711,7	39468	183,554	-1864,2	2490
VECTOR Y	-2022,1	39546	183,594	-1782,6	2374
VECTOR Z	-2359,4	39467	183,561	-1993,3	2413
FLAT X	-2187,3	39432	183,736	-2274	2652
FLAT Y	-3145,2	39460	183,611	-3164,6	2203
FLAT Z	-2644,1	39495	183,725	-2718,9	2408

Tab. 19 Výsledné hodnoty naměřených citlivostí v Y cívkách pro každou osu magnetometru

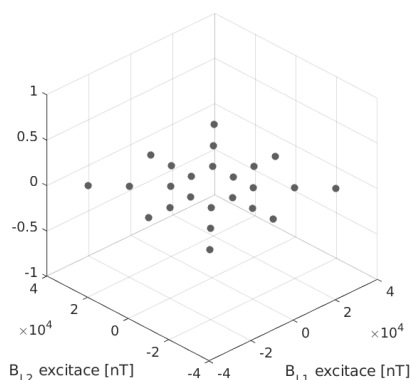
Přestože se jednalo o kalibrace z poměrně malého počtu bodů (20 opakování 9bodové sekvence), lze z podobných hodnot citlivostí (cca -1500 až -3000 ppm napříč všemi magnetometry viz Tab. 19) vyvodit závěr, že někde vznikla systematická chyba. Ta může být způsobena špatnou skalární kalibrací z Průhonic, špatně určenou cívkovou konstantou z ČMI kalibrace nebo kalibrací proudového výstupu zdroje s driftujícím bočником. K tomuto jevu se vrátím ještě v závěrečné kapitole. Z toho důvodu (není jisté, kde chyba vzniká) zanedbávám fakt, že pseudoskalární kalibrace je určena pro kalibrací cívkových konstant, zatímco zde zaměřuji výsledek volně s citlivostí magnetometru.

Z třetího sloupce Tab. 19 lze také mimo jiné znovu vidět (dosud jsem explicitně nezmínil) intenzitu ZMP uvnitř cívek, která se značně liší od očekávaných hodnot 49 μT kvůli deformaci pole prostředím laboratoře. V posledním sloupci je pak projekce vektoru ZMP do Y osy cívek. Zajímavý z pohledu rušení je také poslední graf na Obr. 4-25, kde jsou vidět rezidua lineární kalibrace ve V-Z ose cívek.

4.8 Snaha o získání cívkových neortogonalit pomocí pseudoskalární kalibrace

Chyba dvojrysky odečtu teodolitu a také nehomogenita cívek neumožnila ruční měření neortogonalit cívek. Velký gradient pole v laboratoři neumožňuje měření s dostupnými pravými skalárními magnetometry (typ Overhauser GSM-19), protože dochází k měření více frekvencí precesního pohybu a magnetometr nedokáže odlišit signál od šumu.

Pokusil jsem se aproximovat skalární magnetometr pomocí výpočtu intenzity z tříosého vektorového magnetometru. Ukázalo se, že stejně jako při vektorové kalibraci magnetometru, je výsledek silně závislý na natočení magnetometru v cívkovém systému.



Obr. 4-26 Rozložení bodů při skalární kalibraci dvojice cívek

Kalibrační sekvence pro měření jedné dvojice cívek odpovídá bodům rozprostřeným po ploše, kombinací $\pm 10 \mu\text{T}$, $\pm 20 \mu\text{T}$ a ± 30 hodnot excitace. Výpočet citlivostí a úhlů mezi dvojicí cívek vychází z článku [18], metodu také stručně popisují na konci kapitoly 1.6.

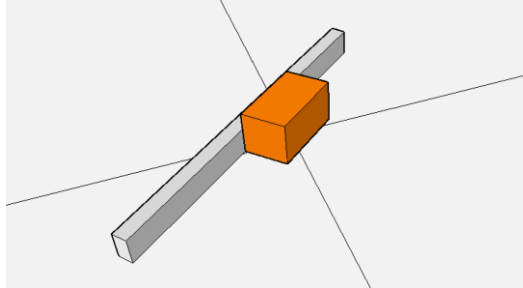
Natočení magnetometru [°]	X [PPM]	Y [PPM]	Z [PPM]	$\alpha 1$ [°]	$\alpha 2$ [°]	$\alpha 3$ [°]
45	342,9	-765,6	-1486,8	89,994	89,999	90,007
90	-381,6	1078,8	-354,3	90,04	90,013	89,993
180	-1215,6	28,1	-1080,9	90,014	89,997	89,962

Tab. 20 Výsledky z měření pseudoskalární kalibrace cívek

Z výsledků v Tab. 20 lze pouze opět konstatovat nemožnost provedení spolehlivé kalibrace použitých cívek z důvodu jejich nehomogenity. Nehomogenita je tak velká, že i případné měření s opravdovým skalárním magnetometrem spolehlivějšímu určení nepomůže. Na druhou stranu, získané úhly α , mezi dvojicí os cívek, se poměrně blíží ideálnímu 90 ° pro plnou ortogonalitu.

4.9 Ověření metody pro nalezení vzájemné orientace

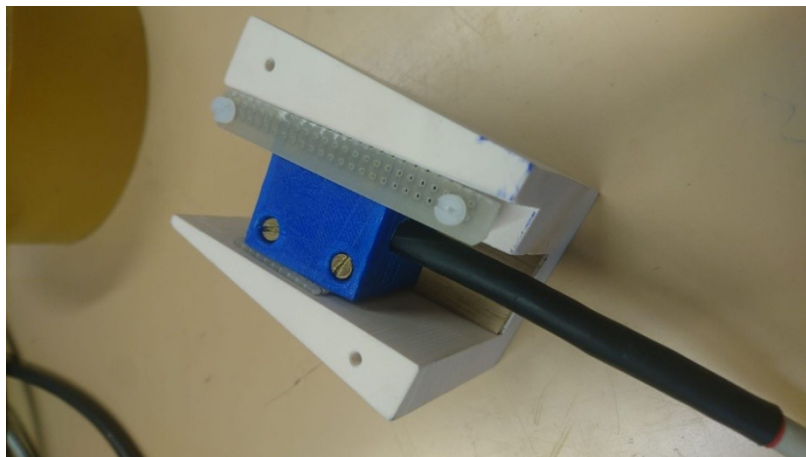
Odvození metody společně se základním popisem je v kapitole 2.6. Nutným praktickým předpokladem je dostatečně ortogonální konstrukční krabice, jež je u magnetometrů ve frézovaném FR4 splněno. Potom k ustavení senzoru stačí uvnitř cívek vytvořit plochu s jedním hranolem jako mechanickou zarážkou. Zarovnání plochy i hranolu vůči cívkám je libovolné.



Obr. 4-27 Zarovnání magnetometru k zarážce

Po provedení výchozí kalibrace lze následující polohy dosáhnout snadno otočením podle příslušné hrany a doražením k hranolu. Pokud to konstrukce neumožňuje, je možné za cenu zvětšení počtu měření umístit senzor na otočný stůl nebo teodolit a provést celkem 6 měření pro získání třech relativních rotací pro každou z ploch senzoru.

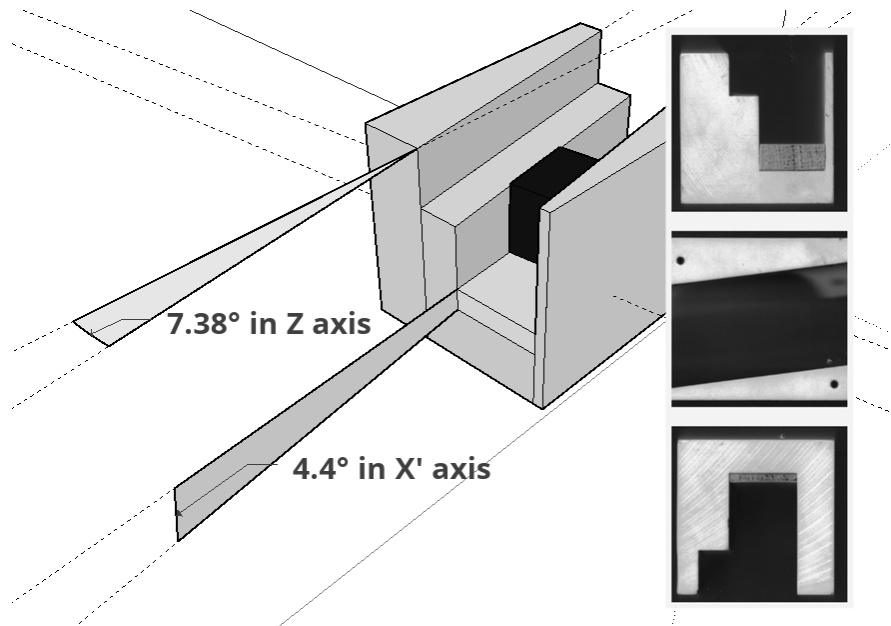
V dostatečně homogenních cívkách by stačilo umístit senzor na dalekohled teodolitu a provést zkrácenou variantu metody s využitím naklápění vertikálního úhlu. Na začátku bylo nutné ověřit proveditelnost metody a reálnou funkci skriptu. U dostupných magnetometrů nebyly výchytky polohy k dispozici a dalo se předpokládat, že jsou menší jak 1° a kvůli nejistotám nebyly vhodné k ověření metody, protože se dají snadno zaměnit s chybou z nejistoty. Přestože dostupné magnetometry mají vhodné konstrukční krabice, tak bylo nutné vyrobit přípravek o ověření metody se známými výchytkami, resp. snadno doměřitelnými v požadované přesnosti.



Obr. 4-28 Frézovaný přípravek pro otáčení hlavice AMR magnetometru

Pro tříosý digitálně kompenzovaný AMR magnetometr – viz Tab. 4 - jsem vyrobil jednoduchý držák s vyfrézovanou drážkou a klínkem. S takto umístěným senzorem jsem provedl metodu se čtyřmi polohami a následně porovnal získanou rotační matici, respektive úhly rotací, s úhly odměřenými z přípravku.

V tomto konkrétním případě jsou úhly odměřené z přípravku v pořadí postupné rotace ZX'Y'' pro jasnější srovnání s výsledkem metody.



Obr. 4-29 Odměření úhlů z přípravku překreslením profilů

Ze čtyř krokové varianty lze získat celkem 4 transformační matice vzájemné polohy. První je tvořena sestavením ze třech vlastních vektorů relativních rotací a není ortogonální. Zbývající tři jsou tvořeny doplněním na bázi při vynechání jednoho vlastního vektoru. Výsledné úhly rotace z transformačních matic jsou spolu s odměřenými v následující tabulce.

vynecháno	Z [°]	X' [°]	Y'' [°]
-	352,51	4,09	1,13
X	352,50	4,32	1,33
Y	352,58	4,10	0,99
Z	352,45	3,83	1,12
přípravek	352,62 (-7,38)	4,40	0,00

Tab. 21 Výsledek ověření nalezení vzájemné orientace

Odchytky úhlů v jednotlivých řádcích jsou způsobené neortogonalitou relativních rotací, která ale mohla vzniknout z nejistoty kalibrace vlivem nehomogenity cívek. Rozdíl odměřených úhlů a výsledků metody je dán také neznámou výchylkou AMR vůči své vytištěné krabici. Přesto lze pozorovat, že metoda funguje a umožňuje minimálně rychlé orientační určení vzájemné polohy bez nutnosti přesného zaměřování. Přesnější ověření a posouzení nejistoty určení bude vyžadovat přímé porovnání s jinou metodou anebo alespoň několikanásobné provedení vícekrokové varianty a pozorování rozptylu naměřených hodnot. Dalším přínosem je možnost získání transformační matice vzájemné orientace magnetického s. s. cívkového systému a s. s. definovaného plochou a hranolem použitým původně jako zarážka přípravku, který je teď ale ztotožněn s vnějším s. s. magnetometru.

$$\mathbf{R}_0 = \mathbf{R}_{BG} \mathbf{R}_{SB} \rightarrow \mathbf{R}_{BGfix} = \mathbf{R}_{SB} \mathbf{R}_0^T \quad (4-3)$$

Toho můžu využít při kalibraci jiného magnetometru, který zarovnam ke stejné zarážce a provedením jedné jediné kalibrace pak ihned získám jeho matici vzájemné orientace

$$\mathbf{R}_{SBnew} = \mathbf{R}_{BGfix}^T \mathbf{R}_{0new} \quad (4-4)$$

5 Vyhodnocení výsledků a budoucí úpravy

5.1 Samotná kompenzace rušení

Nejprve vyhodnotím výsledky kompenzace rušení magnetického pole a připomenu limity z omezení reálného systému. První překážkou ideální kompenzace rušení v laboratoři jsou příliš velké gradientní změny, které nejdou systémem kompenzovat a v důsledku limitují dosažitelné potlačení rušení, čteně snížení nejistot během kalibrací. Druhé omezení vzniká rychlostí, resp. zpožděním kompenzační smyčky způsobeným filtrací výstupu referenčního magnetometru.

V kapitole 4.1 je ukázán reálný dosažitelný výsledek potlačení v laboratoři č. 17 pro jednotlivé složky ve formě hodnot špička-špička. Impulzy je myšleno krátké (do 500 ms) trvajícím impulsy opakující se s periodou přibližně 5 minut (tramvaj). Hrubě odečtené hodnoty z grafů se započítáním a bez započítání impulsů shrnuji v tabulce Tab. 22 níže.

(s impulsy)	S-J [nT _{pp}]	V-Z [nT _{pp}]	vert [nT _{pp}]
Bez kompenzace	50 (150)	100 (300)	800
S kompenzací	20 (100)	30 (60)	100

Tab. 22 Hrubě odečtené hodnoty špička-špička rušení z grafu

Lepšího srovnání se dá dosáhnout výpočtem hodnot špička-špička z efektivních hodnot získaných z odhadu výkonové hustoty signálu, který s určitou mírou chyby, považuji za bílý šum. Kromě prvního řádku, kde se projevuje nestacionarita dat, je toto přiblížení možné, protože rezidua mají již alespoň tvarově normální rozdělení (pouhým posouzením histogramu a koeficientu špičatosti, bez korektního testu normality).

[0 - 10 Hz]	X [nT _{pp}]	Y [nT _{pp}]	Z [nT _{pp}]	X [nT _{rms}]	Y [nT _{rms}]	Z [nT _{rms}]
Původní hodnoty	116,04	185,51	640,74	17,58	28,11	97,08
Syntetická kompenzace	8,02	10,49	16,19	1,22	1,59	2,45
Zpoždění 0,1 s	9	26,23	121,67	1,36	3,97	18,44
Zpoždění 0,2 s	14,79	41,91	170,8	2,24	6,35	25,88
Reálná kompenzace	13,57	32,47	60,47	2,06	4,92	9,16

Tab. 23 Srovnání odhadů amplitud šumu ze spektrální hustoty

Syntetickou kompenzací myslím výpočet reziduí z rozdílu dat AUX magnetometru a REF dat transformované maticí T_{rms} viz kapitola 2.4.1, jejíž výsledky představují absolutní limit dosaženého potlačení s jedním referenčním magnetometrem v laboratoři č. 17 s nekonečně rychlou kompenzací. Nenulová rezidua jsou způsobena gradientními složkami rušení a možnou nepřesností transformační matice.

Odhadované zhoršení kompenzace při uvážení zpoždění je vytvořeno na datech vzniklých z rozdílu signálu a jeho zpožděné verze, gradient MP ani nepřesnost trans. matice nehraje roli. Reálně dosažené výsledky nejsou oproti odhadu syntetické kompenzace v laboratoři horší více než čtyřikrát. Zmíněný rozdíl je způsoben zpožděním filtrací, ale z odhadů vyplývá, že rozdíl není větší než zhoršení při zpoždění 0,2 s.

Potlačení rušení kompenzací v prostředí laboratoře je v průměru přes všechny osy více než pětinasobné. Otázkou zůstává, jak se bude systém chovat v jiném prostředí, resp. v bývalé Průhonické observatoři, kde rušení magnetického pole svojí velikostí splývá s geomagnetickými variacemi (rozdíl se dá přesto identifikovat ve frekvenční oblasti). Bohužel jsem při provedených návštěvách neprovedl měření dvojicí magnetometrů, abych mohl alespoň odhadnout tamní limit pro syntetickou kompenzací.

5.2 Vyhodnocení nejistot kalibrací

Tuto kapitolu je nutné rozdělit na dvě části, nejdříve vyhodnotím výsledky kompenzované jednoosé kalibrace z hlediska snížení výběrové směrodatné odchylky získaných citlivostí a následně uvedu výsledky rychlé *thin-shell* kalibrace (bez kompenzace rušení využívající relativní skoky) vzhledem ke snížení RMSE reziduí v porovnání s typickými hodnotami dosažitelnými skalární kalibrací v Průhonicích.

5.2.1 Nejistoty typu A

Aplikací kompenzace rušení se daří snížit směrodatnou odchylku STD získaných citlivostí pro v laboratoři nejvíce zarušenou vertikální osu Z z původních 2500 ppm (při provádění pomalé nekompenzované kalibrace), až na 622 ppm při kalibraci s kompenzací a korekcí viz kapitola 4.3.2, při které se používaly pětisekundové 50 μ T skoky MP (celkem 100 přechodů z nuly do $\pm 50\mu$ T).

Důležitý detail je právě v přepočtu na jednotky ppm z velikosti skoků, pro 50 μ T je 622 ppm zhruba 31 nT. Při srovnání s výsledky reálné kompenzace vychází dosažené hodnoty STD horší, problém tkví v tom, že je nutné připočítat i chybu z prodlevy, která vznikne při relativním skoku, resp. ustalování referenčního magnetometru. Výsledek po kompenzaci je zhruba jen dvakrát horší než odhad v kapitole 2.5.2, kde pro 5s segmenty z reziduí vychází STD výběrových průměrů 15 nT. Výhody kompenzace v ostatních osách se jeví menší, protože zejména v V-Z ose je rušení poměrně nízké i bez kompenzace. V kapitole 4.3.1 je vybrána kalibrace ve V-Z ose, kde STD klesne zhruba z 250 ppm na 60 ppm. Vliv limitů kompenzace na nejistoty lze omezit zvětšením velikosti skoků, které ovšem musí být v rozsahu magnetometru. Vyhodnocení nejistot pomalé kalibrace není vyčerpávající z časových důvodů a také z obtížného srovnání, kdy k porovnání dochází vždy na různých datech a pro jasný závěr bude nutné dlouhodobější měření, nejlépe s opravdovým observatorním magnetometrem.

Dále jsem ověřoval snížení RMSE v případě rychlé *thin-shell* kalibrace, kde lze pozorovat lepší celkové dosažené výsledky nejistot, při zanedbání vlivu nehomogenity cívek. V rámci vyhodnocení snížení nejistoty tak uvedu výsledky kalibrací provedených s magnetometrem v jedné fixní poloze. V kapitole 4.4 ukazují výsledky cívkové kalibrace nejdříve pro jeden průchod kalibrační (*thin-shell* s $r=50\mu$ T) sekvence, následovaný opakovaným desetinásobným průchodem s průměrováním výsledků. Nejistoty se pokusím určit stejně jako v předcházejícím případě, jako nejistotu typu A označím směrodatnou odchylku získaných citlivostí, úhlů neortogonalit a úhlů natočení magnetometru vůči cívkovému systému. Z vypočtené STD prvních desíti opakování (viz Tab. 13 - kalibrace magnetometru CTUMAG) vychází nejistoty citlivostí pro osy X,Y a Z 14, 29 a 85 ppm. Ze stejné desetinásobné kalibrace z druhého dne vychází nejistoty typu A u citlivostí 29, 35 a 61 ppm. Malým důkazem správnosti takto získaných nejistot je i fakt, že většina parametrů z obou provedených opakovaných kalibrací je vůči sobě rozdílná maximálně o 2 σ a zbytek o 3 σ (tedy s rozšířením nejistoty 2 a 3) srovnání s Tab. 14.

Výsledné RMSE hodnoty reziduí desetkrát opakované kalibrace (cca 60 minut) jsou do 10 nT a jsou tvořena převážně rezidui ve vertikální složce. Hodnoty RMSE brané z těchto průchodů po jednom (6 min), tedy bez opakování, jsou průměrně 25 nT. Pro CTUMAG byla v Průhonicích provedena skalární kalibrace (cca 20 minut) s RMSE reziduí do 1 nT. Bohužel hodnota RMSE vypovídá poměrně málo o nejistotě získaných parametrů, protože v ní nemusí být odhalitelná systematická chyba.

5.2.2 Nejistoty typu B

Do odhadu nejistot vstupuje nejistota kalibrace proudového zdroje (resp. jeho navázání na přenosný etalon Metra 1 Ohm, který byl navázán na sekundární etalon elektrického odporu), nejistota kalibrace cívek a nehomogenita cívek (obdobně jako v případě kapitoly 4.3.1, kdy byl rozpočet nejistot stanoven pouze pro jednu osu Y „Merritt“).

Nehomogenita cívkového systému je v tomto případě dominantní zejména pro X a Z cívky, které nejsou z konstrukčních důvodů přesně v Helmholtzově konfiguraci (až 1200 ppm v 1 cm od středu v X a Z cívek). V případě zvolení nevhodného natočení, kdy se chyba přenesse maximálně do všech os, je odhad nejistoty nehomogenitou řádově až 5000 ppm (pro oblast 5x5 cm² okolo středu cívek). Z měření parametrů cívkové vektorové kalibrace (citlivosti a úhly) v závislosti na natočení magnetometru CTUMAG na teodolitu v cívkách, byla ověřena nejistota typu B z nehomogenity zvlášť pro citlivosti a úhly. Z výsledků ověřovacích měření na Obr. 4-23 a v Tab. 16 vychází chyba citlivosti zhruba 2000 ppm a úhlů až 0,3 ° (18 úhlových minut). Rozdíl mezi nejistotou typu A a B tak v případě citlivostí vychází řádově a u úhlů jde o rozdíl minut a vteřin.

Navíc se ukázalo, že i citlivost měřená pomocí osy Y, která je homogenní do 1000 ppm do 10 cm od středu, vychází rozdílně. U skalárně kalibrovaných magnetometrů vychází odchylka oproti kalibraci v Průhonicích průměrně zhruba -2000 ppm ve všech osách magnetometrů viz kapitola 4.7. To indikuje systematickou nejistotu typu B v měřícím řetězci, kterou nebylo možné z naměřených dat odhalit. Skalární kalibrace magnetometrů v Průhonicích mohla být ovlivněna gradientem magnetického pole (všechny magnetometry byly kalibrovány v jeden den a ve stejném prostředí viz podrobněji kapitola 4.7), gradient však typicky nedosahuje těchto hodnot. Stejně tak může být chyba v teplotním driftu měřícího bočnicku použitého při kalibraci proudového zdroje viz kapitola 2.2.1, ta však vzhledem k použitému materiálu (manganin) bude typicky řádově nižší i při značném teoretickém ohřevu. Poslední možností je chyba kalibrace cívkové konstanty systému, kdy záleží na umístění NMR sondy v nehomogenní oblasti cívek. Tuto systematickou chybu bude možné odhalit provedením dalších měření, ověřením kalibrace cívkového systému a proudového zdroje, resp. pomocí nové skalární kalibrace magnetometrů. V na poslední chvíli provedeném měření pomocí DMM 34401A v režimu ampérmetru jsem pro nastavených 0,5 A proudového výstupu osy Y, naměřil 0,500090 A s nastaveným maximálním rozlišením. Naměřená odchylka od ideální hodnoty je 90 μA (180 ppm z hodnoty). Nejistota typu B vlastního provedeného měření na daném rozsahu 1 A je 179 μA, resp. 358 ppm z hodnoty. Toto s nemalou pravděpodobností potvrzuje chybu jinde v měřícím řetězci, než v kalibraci proudového zdroje.

Shrnutím výše zmíněných nejistot je v Tab. 24 upraven celkový rozpočet nejistot pro současnou konfiguraci s malými čtvercovými cívkami, představující nejhorší možný případ u nejistot typu B při kalibraci v oblasti 5x5 cm². Nejistoty typu A představují typické hodnoty dosažitelné v laboratoři č. 17 pomocí obou typů kalibrací.

Zdroj nejistoty kalibrace citlivostí – lab. 17	Typ nejistoty	nejistota [ppm]
Nehomogenita MAGLAB čtvercových cívek pro 5x5 cm ²	B	X,Z<5000 a Y<500
Řetězec cívkové konstanty, proudový zdroj a skalární kalibrace	B	<2000
Výběrová směrodatná odchylka při pomalé kalibraci	A	XYZ (100, 100, 500)
Výběrová směrodatná odchylka při rychlé kalibraci	A	XYZ (20, 50, 100)

Tab. 24 Pesimistický rozpočet nejistot citlivostí se započtením nehomogenity cívek

5.3 Budoucí úpravy a další kroky

K lepšímu potlačení rušení v laboratorním prostředí bude nutné použít soustavu více referenčních magnetometrů, umístěných po stranách cívkového systému. Tak půjde odstranit lineární složka gradientu pomocí výpočtů z hodnot složek rušení z protilehlých magnetometrů, případně použití kombinace magnetometru a gradiometru.

K dalšímu zlepšení by mělo dojít při zrychlení kompenzační smyčky, k tomu bude potřeba rekonfigurovat použité magnetometry anebo použít úplně jiné, s ještě rychlejším digitálním výstupem. Prodleva smyčky kompenzace se dále sníží implementací přímo do *firmware* proudového zdroje. Nevyřešenou otázkou zůstává, jaký vliv by mělo použití levnějších méně přesných magnetometrů, včetně například jednoosých, jako referenčních. Nutným požadavkem je totiž pouze krátkodobě nízký offset a nízký šum, přesnost citlivosti může být menší, protože se kompenzují pouze změny pole.

Měření a kalibrace bude v současné době již možné provést na menších kulatých tříosých MAGLAB cívkách, které i přes menší rozměry mají nepatrně větší homogenní oblast, než čtvercové s modifikovanou roztečí.

Celý systém by měl být také přenesen do Průhonic s využitím jiného proudového zdroje (momentálně v opravě) a tamních cívek HELM-3 respektive Braunbek. Kompenzace rušení a variací bude mít hlavní význam právě zde, kde se předpokládají kalibrace s požadovanou nejistotou v řádech stovek ppm, a kompenzace pomůže tuto nejistotu dále snížit (rušení v Průhonicích je až desítky nT_{pp}).

Pro využití k testování vyvíjených magnetometrů s menší požadovanou přesností kalibrace, lze v laboratoři č. 17 v Dejvicích využít implementované rychlé kalibrace bez kompenzace, se všemi výhodami z toho plynoucími, jako je doba nutná k provedení kalibrace a nároky na cívkový systém. Dále bude vhodné měření ověřit kompenzovanou variantu *thin-shell* kalibrace i v prostředí laboratoře, protože prozatím byly výsledky přínosu kompenzace testovány pouze při jednoosé kalibraci.

K ověření navržené metody více krokové úplné kalibrace magnetometru v cívkovém systému bude potřeba zajistit tuto kalibraci jiným způsobem alespoň pro jeden magnetometr. Optické zaměření v laboratoři je velmi nepravděpodobné a jedinou možností ověření bude úplná kalibrace s využitím zemského pole. V nejbližší době ale bude možné ověřit princip metody provedením kalibrace na observatoři SANSA v Hermanusu, JAR, kde bude možné výsledky srovnat s konvenční metodou získání vzájemné orientace pomocí optického zaměření.

Největší úpravy bude nutné provést u uživatelského rozhraní provádění a výpočtu kalibrací, které v současné době vyžaduje výraznou asistenci obsluhy.

6 Závěr

Všechny cíle formulované v zadání byly po jednotlivých dílčích částech splněny. Nejdříve jsem dokončil v mé bakalářské práci navržený tříkanálový proudový zdroj. Následně jsem implementoval a ověřil funkčnost jednotlivých modulů nutných ke kompenzaci rušení magnetického pole, provádění základních jednoosých kalibrací senzorů magnetického pole a nakonec i úplnou *thin-shell* kalibraci pro tříosé magnetometry, byť tu jsem zatím důkladně ověřil pouze pro rychlou nekompenzovanou variantu. Překážka k provedení standardních cívkových kalibrací, přítomnost zemského magnetického pole, je jednoduše řešena pomocí přechodu na relativní skoky magnetického pole. Protože vývoj SW probíhal v průběhu vlastního návrhu metod kalibrace, kdy nebyly plně známy všechny požadavky, není jeho stav zatím optimální, nicméně je použitelný a funkční. Oproti zadání navíc jsem v práci odvodil a následně i měřením ověřil princip metody úplné kalibrace magnetometru v cívkovém systému, tzn. včetně získání úhlů natočení jeho vnitřního souřadného systému vůči vnějšímu konstrukčnímu systému hlavice magnetometru, resp. rotační matici mezi nimi.

Klíčovou část textu práce tvoří prezentace a diskuze výsledků měření potlačení rušení, kalibrace magnetometrů různými metodami a rozbor vlivu nehomogenity používaného cívkového systému. Ukázalo se, že největším zdrojem nejistot v současném používaném systému je nehomogenita jeho cívek a tedy i silná závislost výsledků kalibrace magnetometru na jeho umístění (až 5000 ppm pro senzor umístěný mimo 5x5 cm² oblast). K tomu jsem provedl sadu ověřovacích měření a kalibrací s pomocí teodolitu, které jsem pak srovnal s výsledky z provedených simulací v nehomogenních cívkách.

Práce přináší vyhodnocení výsledků potlačení rušení magnetického pole v laboratoři č. F1-17, včetně jejich porovnání s v práci odhadnutými a rozebranými výsledky plynoucích z jednotlivých omezení kompenzační smyčky a charakteru rušení v laboratoři. Pro v laboratoři nejvíce zarušenou vertikální složku, dokáže kompenzační systém snížit hodnoty rušení z 600 nT_{pp} na zhruba 60 nT_{pp}, odhad přitom činil 16 nT_{pp} pro ideální kompenzaci.

Dále jsem vyhodnotil snížení nejistoty získané citlivosti magnetometru při pomalé kompenzované jednoosé kalibraci a také snížení nejistot všech citlivostí a úhlů neortogonalit tříosých magnetometrů při opakující se rychlé *thin-shell* kalibraci bez kompenzace rušení. Pro pomalou jednoosou kalibraci ve vertikální ose pomocí 50 μT skoků lze díky kompenzaci snížit výběrovou směrodatnou odchylku získaných citlivostí z 2500 ppm na 622 ppm (31 nT). Využitím opakující se rychlé *thin-shell* kalibrace lze pro 50 μT poloměr bodů *thin-shell* dosáhnout nerozšířených nejistot citlivosti typu A pro jednotlivé osy magnetometru v řádu zhruba 30, 50 a 100 ppm (X, Y a Z).

Výsledky rychlých kalibrací jsem také u použitých magnetometrů srovnal s referenčními výsledky ze skalární kalibrace v Průhonicích. Výsledky kalibrovaných citlivostí vůči Průhonicím však nelze plně srovnat, kvůli nehomogenitám použitých cívek, resp. rozdílly se ztrácí v nejistotě způsobené nehomogenitou. Pozitivním výsledkem je ale možnost dosažení jen o řád horších hodnot RMSE z reziduí cívkové kalibrace oproti hodnotám skalární kalibrace v Průhonicích. To v budoucnu (po výměně cívek) usnadní provádění kalibraci vyvíjených rychlých magnetometrů přímo v laboratorních podmínkách, za cenu nepatrného snížení přesnosti.

7 Citované zdroje

- [1] JANKOWSKI, Jerzy a Christian SUCKSDORFF. *IAGA Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice*. Varšava: IAGA, 1996. ISBN 0-9650686-2-5.
- [2] BRITHIS GEOLOGICAL SURVEY. *An Overview of the Earth's Magnetic Field* [online]. [vid. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://www.geomag.bgs.ac.uk/education/earthmag.html>
- [3] OLSEN, Nils. In-flight calibration methods used for the Ørsted mission. *Esa - Sp on Calibration of Magnetometers*. 2000.
- [4] PETRUCHA, Vojtěch. *Disertační práce: Calibration of Selected Sensors for Space Applications* [online]. B.m., 2012. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/9730>
- [5] VČELÁK, Jan. *Application of magnetic sensors for navigation systems*. B.m.: Shaker, 2007. ISBN 3832277382.
- [6] NXP. *Calibrating an eCompass in the Presence of Hard and Soft Iron Interference* [online]. 2013. Dostupné z: www.freescale.com/sensorfusion.
- [7] KIRSCHVINK, Joseph L. Uniform magnetic fields and double-wrapped coil systems: Improved techniques for the design of bioelectromagnetic experiments. *Bioelectromagnetics* [online]. 1992, **13**(5), 401–411. ISSN 0197-8462. Dostupné z: doi:10.1002/bem.2250130507
- [8] KOTT, Petr. *Diplomová práce: Kalibrace trojosých magnetometrů*. B.m., 2002. České vysoké učení technické v Praze.
- [9] AUSTER, H U, K H FORNACON, E GEORGESCU, K H GLASSMEIER a U MOTSCHMANN. Calibration of flux-gate magnetometers using relative motion. *Measurement Science and Technology* [online]. 2002, **13**(7), 1124. ISSN 09570233. Dostupné z: doi:10.1088/0957-0233/13/7/321
- [10] ČIHÁK, Vlastimil. *Geodesie ve stavební praxi*. B.m.: SNTL, 1953.
- [11] SIPOS, Martin, Pavel PACES, Jan ROHAC a Petr NOVACEK. Analyses of Triaxial Accelerometer Calibration Algorithms. *IEEE Sensors Journal* [online]. 2012, **12**(5), 1157–1165. ISSN 1530-437X. Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2011.2167319
- [12] RISBO, Torben, Peter BRAUER, Jose M G MERAYO, Otto V NIELSEN, Jan R PETERSEN, Fritz PRIMDAHL a Ingo RICHTER. Ørsted pre-flight magnetometer calibration mission. *Measurement Science and Technology* [online]. 2003, **14**(5), 674. ISSN 0957-0233. Dostupné z: doi:10.1088/0957-0233/14/5/319
- [13] PETRUCHA, Vojtech, Petr KASPAR, Jose M.G. MERAYO, Peter BRAUER a Fritz PRIMDAHL. Non-magnetic platform for scalar calibration of magnetometers. *2008 IEEE Sensors* [online]. 2008, 1444–1447. Dostupné z: doi:10.1109/ICSENS.2008.4716716
- [14] BONNET, S., C. BASSOMPIERRE, C. GODIN, S. LESECQ a A. BARRAUD. Calibration methods for inertial and magnetic sensors. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2009, **156**(2), 302–311. ISSN 09244247. Dostupné z: doi:10.1016/j.sna.2009.10.008
- [15] ZIKMUND, Aleš. *Disertační práce: Magnetic calibration by using non-linear optimization method* [online]. B.m., 2014. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/61085>
- [16] ZIKMUND, Ales, Michal JANOSEK, Michal ULVR a Josef KUPEC. Precise Calibration Method for Triaxial Magnetometers Not Requiring Earth's Field Compensation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* [online]. 2015, **64**(5), 1242–1247. ISSN 0018-9456. Dostupné z: doi:10.1109/TIM.2015.2395531
- [17] ZIKMUND, Ales a Michal JANOSEK. Calibration procedure for triaxial magnetometers without a compensating system or moving parts. *2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings* [online]. 2014, 473–476. Dostupné z: doi:10.1109/I2MTC.2014.6860790
- [18] ZIKMUND, A. a P. RIPKA. Calibration of the 3-D Coil System's Orthogonality. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2013, **49**(1), 66–68. ISSN 0018-9464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2012.2218583
- [19] SAPUNOV, V., J. RASSON, A. DENISOV, D. SAVELIEV, S. KISELEV, O. DENISOVA, Y. PODMOGOV a S. KHOMUTOV. Theodolite-borne vector Overhauser magnetometer: DIMOVER. *Earth, Planets and Space* [online]. 2006, **58**(6), 711–716. ISSN 1880-5981. Dostupné z: doi:10.1186/BF03351972
- [20] BRAUER, P, JMG MERAYO, T RISBO, F Primdahl - Workshop on Calibration OF a Undefined 1999. Magnetic calibration of vector magnetometers: linearity, thermal effects and stability. *Citeseer* [online]. nedatováno. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.36.1718&rep=rep1&type=pdf>
- [21] MERAYO, J M G, P BRAUER, F PRIMDAHL a J R PETERSEN. ABSOLUTE MAGNETIC CALIBRATION AND

- ALIGNMENT OF VECTOR MAGNETOMETERS IN THE EARTH ' S MAGNETIC FIELD Optical bench with : Triaxial fluxgate magnetometer (MAG) and Star Imager (SIM). *Building* [online]. 1999, 1–8. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.34.2694>
- [22] VERNIER, Robert, Todd BONALOSKY a James SLAVIN. Goddard Space Flight Center Spacecraft Magnetic Test Facility Restoration Project [online]. 2004. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20050203733>
- [23] PŘÍHODA, Karel, M KRS, B PEŠINA a J BLÁHA. *MAVACS - a new system creating a non-magnetic environment for palaeomagnetic studies*. Brno: Geofyzika N. P. 1988.
- [24] BILLINGSLEY AEROSPACE & DEFENSE, Inc. *APEX-CS HELMHOLTZ COIL CONTROLLER Manual*. nedatováno.
- [25] BARTINGTON INSTRUMENTS. *Operation Manual for CU2 Closed Loop Module* [online]. nedatováno. Dostupné z: www.bartington.com
- [26] FANSELAU, Gerhard. *Geomagnetismus und Aeronomie*. B.m.: Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1960.
- [27] PAJUNPÄÄ, Kari, E. Yu. KLIMOVICH, Varelly KOREPANOV, Pentti POSIO, Heikki NEVANLINNA, Wolfgang Dipl Ing SCHMIDT, Maria GENZER a A.M.F. LOURENÇO. *Accredited Vector Magnetometer Calibration Facility* [online]. 2007. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Accredited-Vector-Magnetometer-Calibration-Facility-Pajunpää-Klimovich/96dff0516b0abc6b9cc5a356b541b959cf7d126>
- [28] HALL, M J, S A C HARMON a S TURNER. Magnetic environment and magnetic field standards at NPL for the calibration of low noise magnetometers and gradiometers for cleanliness studies. In: *2012 ESA Workshop on Aerospace EMC*. 2012, s. 1–6.
- [29] PO GYU PARK, V.Ya. SHIFRIN, YOUNG GYUN KIRN, MUN-SEOG KIM a KYU-TAE KIM. Automatic compensation of Earth magnetic field and calibration system of magnetometers below 1 mT. In: *INTERMAG Asia 2005. Digests of the IEEE International Magnetism Conference, 2005*. [online]. B.m.: IEEE, 2005, s. 1159–1160. ISBN 0-7803-9009-1. Dostupné z: [doi:10.1109/INTMAG.2005.1464009](https://doi.org/10.1109/INTMAG.2005.1464009)
- [30] PRIMDAHL, F, P BRAUER, J M G MERAYO, J R PETERSEN a T RISBO. Determining the direction of a geometrical/optical reference axis in the coordinate system of a triaxial magnetometer sensor. *Measurement Science and Technology* [online]. 2002, **13**(12), 2094–2098. ISSN 0957-0233. Dostupné z: [doi:10.1088/0957-0233/13/12/339](https://doi.org/10.1088/0957-0233/13/12/339)
- [31] FIGARO, Davy, Tyler BRYANT a Anders BOEEN. Spherical calibration and reference alignment algorithms [online]. 7930148. 19. duben 2011. Dostupné z: <http://www.freepatentsonline.com/7930148.html>
- [32] RENISHAW. Interferometric angle measurement and the hardware options available from Renishaw. *Technical white paper: TE326* [online]. Dostupné z: <https://resources.renishaw.com/en/details/white-paper-interferometric-angle-measurement-and-the-hardware-options-available-from-renishaw--56681>
- [33] DIETRICH, M. R., K. G. BAILEY a T. P. O'CONNOR. Alignment of a vector magnetometer to an optical prism. *Review of Scientific Instruments* [online]. 2017, **88**(5), 055105. ISSN 0034-6748. Dostupné z: [doi:10.1063/1.4983146](https://doi.org/10.1063/1.4983146)
- [34] JANOSEK, Michal, Michal DRESSLER, Vojtech PETRUCHA a Andrey CHIRTSOV. Magnetic Calibration System With Interference Compensation. *IEEE Transactions on Magnetism* [online]. 2019, **55**(1), 1–4. ISSN 0018-9464. Dostupné z: [doi:10.1109/TMAG.2018.2874169](https://doi.org/10.1109/TMAG.2018.2874169)
- [35] DRESSLER, Michal. *Bakalářská práce: Zdroj proudu pro testovací cívkový systém* [online]. B.m., 2017. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/68554>
- [36] PETRUCHA, Vojtěch a Michal DRESSLER. *Function Sample: 3D coils for magnetic calibrations*. 2017
- [37] ULVR, Michal a Josef KUPEC. Improvements to the NMR Method With Flowing Water at CMI. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* [online]. 2018, **67**(1), 204–208. ISSN 0018-9456. Dostupné z: [doi:10.1109/TIM.2017.2756119](https://doi.org/10.1109/TIM.2017.2756119)
- [38] TYAGUNOV, D. S. Distribution of Manmade Low-Frequency Magnetic Noise in a Big Industrial City. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* [online]. 2018, **54**(7), 700–704. ISSN 0001-4338. Dostupné z: [doi:10.1134/S0001433818070162](https://doi.org/10.1134/S0001433818070162)
- [39] PETRUCHA, Vojtech, Michal JANOSEK a Marco A. AZPURUA. Vector Feedback Homogeneity and Inner Layout Influence on Fluxgate Sensor Parameters. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* [online]. 2015, **64**(5), 1285–1291. ISSN 0018-9456. Dostupné z: [doi:10.1109/TIM.2014.2362831](https://doi.org/10.1109/TIM.2014.2362831)
- [40] NOVOTNY, David, Vojtech PETRUCHA a Michal JANOSEK. A Digitally Compensated AMR Magnetometer. *IEEE Transactions on Magnetism* [online]. 2019, **55**(1), 1–5. ISSN 0018-9464. Dostupné z: [doi:10.1109/TMAG.2018.2873235](https://doi.org/10.1109/TMAG.2018.2873235)

8 Tabulky

Tab. 1 Koeficienty kalibrace proudového zdroje MAGLAB	25
Tab. 2 Parametry čtvercových cívek MAGLAB	27
Tab. 3 Odhad hodnot amplitud šumu (barva šumu zde zanedbána).....	30
Tab. 4 Parametry použitých magnetometrů	32
Tab. 5 Vybrané vlastnosti transformačních matic použitých v předešlých grafech	37
Tab. 6 Odhady amplitud šumu pro rezidua vzniklá různým zpožděním kompenzace	43
Tab. 7 Odhad amplitud šumu reziduí po syntetické kompenzaci	45
Tab. 8 Odhad amplitud šumu reziduí po reálné kompenzaci.....	57
Tab. 9 Přibližné polohy referenčního magnetometru při testování.....	58
Tab. 10 Původní rozpočet nejistot pro lineární kalibraci v Y („Merritt“) ose	61
Tab. 11 Výsledné hodnoty cívkové kalibrace v porovnání se skalární kalibrací pro magnetometr CTUMAG	65
Tab. 12 Relativní výsledky vektorové kalibrace CTUMAG vůči Průhonicím	66
Tab. 13 Výsledky vícenásobné kalibrace CTUMAG se statistikou parametrů, parametry jsou relativní vůči skalární kalibraci v Průhonicích.....	67
Tab. 14 Výsledky opakované vícenásobné kalibrace CTUMAG - parametry jsou relativní vůči skalární v Průhonicích.....	67
Tab. 15 Numerické srovnání výsledků různých metod vyhodnocení rychlé kalibrace magnetometru CTUMAG - parametry jsou relativní vůči skalární kalibraci v Průhonicích	68
Tab. 16 Srovnání výsledků úhlů rotace magnetometru z výsledku kalibrace a odečtu z teodolitu	71
Tab. 17 Parametry sensorové trojice v syntetických cívkách při ověření měření na teodolitu	72
Tab. 18 Naivní lineární kalibrace proložením přímkou	73
Tab. 19 Výsledné hodnoty naměřených citlivostí v Y cívkách pro každou osu magnetometru	73
Tab. 20 Výsledky z měření pseudoskalární kalibrace cívek	74
Tab. 21 Výsledek ověření nalezení vzájemné orientace	76
Tab. 22 Hrubě odečtené hodnoty špička-špička rušení z grafu	77
Tab. 23 Srovnání odhadů amplitud šumu ze spektrální hustoty.....	77
Tab. 24 Pesimistický rozpočet nejistot citlivostí se započtením nehomogenity cívek.....	79

9 Obrázky

Obr. 1-1 Rozmístění magnetických observatoří INTERMAGNET [převzato [2]]	1
Obr. 1-2 Použitá definice úhlů neortogonalit podle [3, 4],	2
Obr. 1-3 Znázornění systému souřadnic v prostoru.....	3
Obr. 1-4 DI Flux Teodolit při měření inklinace a deklinace	5
Obr. 1-5 Ruční rotační platforma	6
Obr. 1-6 Automatická platforma [převzato [13]]	6
Obr. 1-7 Ukázka výstupu skriptu skalární kalibrace převzatého a upraveného z [4] (syntetická data) ..	8
Obr. 1-8 Orientace sensorové osy magnetometru vůči s. s. cívek a vektoru ZMP [převzato [17]].....	9
Obr. 1-9 Rozdělení řídicích systémů cívek.....	12
Obr. 1-10 Satelit ST-5 v 12metrových Braunbek cívkách [převzato nasa.gov].....	13
Obr. 1-11 Blokové schéma systému MAVACS [převzato [23]]	13
Obr. 1-12 Systém vlečných cívek [převzato [26]]	14
Obr. 1-13 Útlum rušení ZMP v systému NPL [převzato [28]]	15
Obr. 1-14 He-Cs systém kompenzace pro kalibrace etalonů magnetické indukce [převzato [29]]	15
Obr. 1-15 Kalibrace vzájemné orientace AMR kompasu [převzato [5]].....	17

Obr. 1-16 Kalibrace magnetometru vrtací hlavice [z archivu MAGLAB]	17
Obr. 1-17 Interferometrické měření úhlu [převzato [32]]	18
Obr. 1-18 Schéma optického autokolimátoru [převzato trioptics.com]	18
Obr. 1-19 Zaměření magnetometru pomocí dvou autokolimátorů [převzato [33]]	19
Obr. 2-1 Návrh vlastního kompenzačního cívkového systému	20
Obr. 2-2 Kalibrační skok MP k vytváření jednoho bodu cívkové kalibrace	21
Obr. 2-3 Proudový zdroj MAGLAB částečně realizovaný v mé BP [35]	23
Obr. 2-4 Detail teplotně stabilizovaných snímacích rezistorů VISHAY VPR221ZT	24
Obr. 2-5 Měření teplotní stability nastaveného proudu (0.5A) po zapnutí přístroje	24
Obr. 2-6 1Ω manganinový bočník	24
Obr. 2-7 Variace a rušení intenzity MP v Průhonicích [převzato [16]]	26
Obr. 2-8 Homogenita 1m čtvercových cívek HELM-3	26
Obr. 2-9 Cívkový systém Billingsley HELM-3	26
Obr. 2-10 Rozmístění prvků v laboratoři a vzdálenosti k hlavním zdrojům rušení	27
Obr. 2-11 Konstrukce tříosých cívek MAGLAB	27
Obr. 2-12 FEM simulace homogenní oblasti MAGLAB cívek pomocí SW ANSYS	28
Obr. 2-13 Tvar a homogenita nových kulatých cívek MAGLAB	28
Obr. 2-14 Záznam rušení v laboratoři v časové oblasti, pořízeno 13.02.2019 16:00	29
Obr. 2-15 Spektrogramy a odhad šumové amplitudové hustoty (ASD) rušení MP, pořízeno 13. 02. 2019	30
Obr. 2-16 Autokorelace pro nalezení periodicity rušení – horizontální složka, pořízeno 14022019	31
Obr. 2-17 Konstrukční krabice z FR4 použitých magnetometrů CTUMAG, FLAT a VECTOR	32
Obr. 2-18 Charakteristiky možných filtrů	33
Obr. 2-19 Průběh poklesu pronikání pole cívek do vstupu referenčního magnetometru	34
Obr. 2-20 Postup výpočtu odhadu matice vzájemné orientace variací	35
Obr. 2-21 Odstranění zpoždění mezi záznamy z magnetometrů	36
Obr. 2-22 Ukázka ideální kompenzace z výsledku výpočtu transformační matice	36
Obr. 2-23 Detail reziduí absolutního limitu kompenzace z obr. 2-22	37
Obr. 2-24 Naznačení způsobů segmentace vstupních dat	39
Obr. 2-25 Možné kombinace vyhodnocení limitů	39
Obr. 2-26 Odhad rozdělení základního souboru původních zarušených dat	40
Obr. 2-27 Odhad rozdělení po syntetické kompenzaci rušení ($AUX-REF * T_{rms}$)	40
Obr. 2-28 Rozdělení výběrových průměrů segmentovaných dat bez odstranění počáteční hodnoty .	41
Obr. 2-29 Rozdělení výběrových průměrů segmentovaných dat s odstraněním počáteční hodnoty ..	41
Obr. 2-30 Odezva hřebenového filtru na změnu pole v časové oblasti pro různá zpoždění	42
Obr. 2-31 Odhad spektrální amplitudové hustoty reziduí vzniklých zpožděním v závislosti na jeho velikosti	42
Obr. 2-32 Rozdělení výběrových průměrů reziduí zpožděného signálu o půl sekundy	43
Obr. 2-33 Rozdělení výběrových průměrů segmentovaných reziduí ($AUX-REF * T_{rms}$)	44
Obr. 2-34 Spektrální hustota reziduí pro jednotlivé složky	44
Obr. 2-35 Natočení vytvářeného vektoru k vektoru chyby	45
Obr. 2-36 Postupné rotace senzoru k nalezení vzájemné orientace	46
Obr. 3-1 Ovládací panel proudového zdroje MAGLAB	48
Obr. 3-2 Rozdělení řešení na části podle implementace	49
Obrázek 3-3 Způsob procházení kalibrační sekvence	50
Obr. 3-4 Rozhraní provádění kalibrační sekvence	50
Obr. 3-5 Formát kalibračního záznamu	51
Obr. 3-6 Diagram kompenzovaného proudového zdroje	52

Obr. 3-7 Rozhraní modulu kompenzovaného zdroje proudu	52
Obr. 3-8 Tok dat v části zpracovávající čtení magnetometru.....	53
Obr. 3-9 Uživatelské rozhraní čtení z magnetometru	53
Obr. 4-1 Reálné výsledky kompenzace rušení v 30 minutovém segmentu	55
Obr. 4-2 Minutový detail srovnání kompenzace rušení v 30m segmentu	56
Obr. 4-3 Detail reziduí reálné kompenzace.....	56
Obr. 4-4 Odhad amplitudového šumového spektra reziduí (data filtrovány MVA s 120ms oknem)....	57
Obr. 4-5 Rozdělení výběrových průměrů segmentovaných reálně měřených reziduí viz Obr. 4-1	57
Obr. 4-6 Nevykompenzovatelná rezidua způsobená gradientem.....	58
Obr. 4-7 Úhel vektoru pole v rovině kolmé na osu vybraných cívek.....	59
Obr. 4-8 Ilustrace vzniku nutné korekce na syntetických datech.....	60
Obr. 4-9 Původní podoba metody vyhodnocení kalibrace.....	61
Obr. 4-10 Srovnání zachycení typického průběhu segmentu s vypnutou a zapnutou kompenzací	62
Obr. 4-11 Výběrová směrodatná odchylka segmentů všech relativních skoků	62
Obr. 4-12 Výsledky získaných citlivostí z jednotlivých relativních skoků [0->50 μ T].....	63
Obr. 4-13 Výsledek skalární kalibrace CTUMAG Průhonice	64
Obr. 4-14 Kalibrační sekvence <i>thin-shell</i> a zachycení jednoho měření po skoku pole.....	64
Obr. 4-15 Výsledek cívkové kalibrace nekorigovaného CTUMAG	65
Obr. 4-16 Výsledek cívkové kalibrace korigovaného CTUMAG	66
Obr. 4-17 Výsledek desíti opakování cívkové kalibrace CTUMAG.....	67
Obr. 4-18 Výsledek skalární kalibrace na totožných datech	68
Obr. 4-19 Měření homogenity při posuvu v ose X	69
Obr. 4-20 Měření homogenity při posuvu v ose Y	69
Obr. 4-21 Detail chyby dvojrysky horizontální stupnice teodolitu T1c	70
Obr. 4-22 CTUMAG magnetometr na teodolitu v cívkách	70
Obr. 4-23 Závislost citlivostí a úhlu neortogonalit na otočení senzoru v reálných cívkách	71
Obr. 4-24 Simulace závislosti kalibrace na otočení senzoru v MAGLAB cívkách.....	72
Obr. 4-25 Simulace závislosti kalibrace na otočení senzoru v kruhových cívkách	72
Obr. 4-26 Rozložení bodů při skalární kalibraci dvojice cívek	74
Obr. 4-27 Zarovnání magnetometru k zarážce.....	75
Obr. 4-28 Frézovaný přípravek pro otáčení hlavice AMR magnetometru	75
Obr. 4-29 Odměření úhlů z přípravku překreslením profilů.....	76