



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MODELOVÁNÍ INERCIÁLNÍCH SNÍMAČŮ

MODELING OF INERTIAL SENSORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAKUB TRLIČÍK

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR BENEŠ, Ph.D.

BRNO 2013



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Jakub Trličík

ID: 106837

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Modelování inerciálních snímačů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je vytvořit chybový model akcelerometru a gyroskopu v prostředí Matlab/Simulink. Student by měl zmapovat současnou situaci na trhu s přesnými MEMS inerciálními senzory. Prostudovat existující metody modelování chyb inerciálních senzorů a metodiky pro hodnocení jejich kvality. Student by měl změřit statické i dynamické parametry dostupných MEMS senzorů a porovnat je s katalogovými hodnotami. Výstupem práce by měl být chybový model s nastavitelnými parametry, který bude simulovat chování reálných inerciálních senzorů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Aggarwal, P.; Syed, Z.: MEMS-Based Integrated Navigation. Artech House, 2010.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 20.5.2013

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá měřením a modelováním MEMS inerciálních snímačů. V této práci jsou uvedeny základní principy inerciálních snímačů spolu s jejich nejčastěji se vyskytujícími chybami. Dále je proveden průzkum trhu, pomocí kterého byly vybrány snímače pro měření. Následují dvě kapitoly uvádějící metody testování a modelování inerciálních snímačů. Nejrozsáhlejší částí práce je prezentace naměřených výsledků, kdy byly provedeny statické měření Allanovy odchylky, zemské rotace, teplotní závislosti nuly snímačů a dynamické testy citlivosti gyroskopu v závislosti na teplotě. V poslední části práce je prezentován návrh chybového modelu snímače pomocí autokorelačních funkcí a Allanovy odchylky se zhodnocením dosažených výsledků.

Klíčová slova

Akcelerometr, gyroskop, INS, MEMS, chyby inerciálních snímačů, Allanova odchylka, citlivost, nula, angle random walk, bias instability, zemská rotace.

Abstract

This master thesis deals with measurement and modeling of MEMS inertial sensors. This paper describes basic principles of inertial sensors along with their most often errors. The next part shows results from inertial sensor market analysis, which enabling a selection of sensors to be measured. The following two chapters present methods for inertial sensor modeling and testing. The biggest part of text is dedicated to presentation of measurement results showing us static measurement of Allan variance, Earth rotation, temperature dependent bias and dynamic measurement of gyroscope sensitivity testing over temperature. In the last part of the thesis is presented a design of sensor error model by autocorrelation function and Allan variance and also an evaluation of achieved results.

Keywords

Accelerometer, gyroscope, INS, MEMS, inertial sensor errors, Allan variance, scale factor, offset, angle random walk, bias instability, earth rotation.

Bibliografická citace:

TRLIČÍK, J. *Modelování inerciálních snímačů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 104s.
Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Modelování inerciálních snímačů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 20. Května 2013

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petr Benešovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Vágnerovi, za pomoc při realizaci praktických měření v laboratoři a poskytnutí přístupu k potřebným zařízením. A v neposlední řadě také Ing. Marku Fojtáchovi ze společnosti Honeywell, za poskytnuté senzory a čas při konzultacích.

V Brně dne: 20. Května 2013

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	9
1.1	Úkol	9
1.2	Motivace	9
1.3	Záměr práce	10
2	Inerciální snímače	11
2.1	Akcelerometry	11
2.1.1	Princip	11
2.1.2	Technologie	14
2.2	Gyroskopy	15
2.2.1	Princip	15
2.2.2	Technologie	19
2.3	Inerciální měřicí jednotky	20
2.3.1	Systémy stabilní platformy	21
2.3.2	Systémy typu Strapdown	22
3	Chyby inerciálních snímačů	23
3.1	Deterministické chyby	24
3.1.1	Bias / Offset	24
3.1.2	Vstupní citlivost / Scale Factor	24
3.1.3	Chyby ortogonality / vyrovnaní	25
3.1.4	Run-to-Run Bias/Scale Factor	25
3.1.5	In Run Bias/Scale Factor	26
3.1.6	Teplotně závislý Bias/Scale Factor	26
3.2	Stochastické chyby	26
3.3	Shrnutí	27
4	Inerciální snímače na trhu	28
4.1	Výrobci inerciálních snímačů	29
4.2	Udávané parametry inerciálních snímačů	30
4.3	Srovnávací tabulky vybraných snímačů	32
4.3.1	Akcelerometry	33
4.3.2	Gyroskopy	33
5	Metody testování inerciálních snímačů	34
5.1	Metody testování gyroskopů	34
5.1.1	Statické testy stability – multi poziční testy	34
5.1.2	Dynamické rotační testy	36
5.1.3	Dynamické multi poziční testy	40
5.2	Metody testování akcelerometrů	43

5.2.1	Multi-poziční testy.....	43
5.2.2	Testy dlouhodobé stability	45
5.2.3	Vibrační testy	46
5.3	Teplotní testy	47
5.4	Shrnutí	47
6	Modelování a kalibrace inerciálních snímačů	48
6.1	Model výstupu snímače.....	48
6.2	Allanova odchylka a spektrální analýza	51
6.2.1	Definice.....	51
6.2.2	Charakteristika náhodných procesů.....	54
6.2.3	Kombinovaný efekt všech náhodných procesů.....	58
6.3	Shrnutí	59
7	Praktická měření.....	60
7.1	Použité senzory	60
7.1.1	STmicroelectronics iNemo [25]	60
7.1.2	Murata Scc1300-D02 [20]	61
7.1.3	Invensense MPU 6050 [23].....	63
7.2	Měření nuly inerciálních snímačů	64
7.2.1	Závislost nuly na teplotě	64
7.3	Měření citlivosti gyroskopu.....	72
7.3.1	Závislost citlivosti na teplotě	74
7.4	Allanova odchylka	76
7.4.1	STmicroelectronics iNemo	79
7.4.2	Invensense MPU 6050	80
7.4.3	Murata Scc1300-D02.....	82
7.5	Vlastní experiment	84
7.6	Shrnutí	87
8	Návrh modelu	88
9	Závěr.....	94
	Literatura	96
	Seznam obrázků.....	100
	Seznam tabulek	101
	Seznam grafů	102
	Seznam zkratk.....	103
	Seznam příloh	104

1 ÚVOD

1.1 Úkol

Zadání vzniklo z podnětu firmy Honeywell - Aerospace zabývající se vývojem a aplikací softwarového i hardwarového řešení řízení a navigace letadel, konkrétně ve skupině zaměřené na navádění a navigaci. Cílem je pomocí prostředí Matlab Simulink vytvořit chybový model několika vybraných akcelerometrů a gyroskopů aproximující co nejpřesněji jejich výstupy. Před vytvořením modelu je však nutné identifikovat hlavní zdroje chyb, tj. parametry mající vliv na přesnost výstupu snímače a tyto parametry udávané výrobcem ověřit měřením a implementovat do modelu. Úkol práce lze rozdělit do tří částí, které na sebe mají logickou návaznost.

Za první část práce lze označit seznámení se s dostupnými snímači pro inerciální navigaci a jejich parametry. Pokusit se zjistit způsob, jakým výrobce definuje, či zjišťuje udávané hodnoty a v neposlední řadě vytvořit tabulku snímačů znázorňující jejich udávané parametry / výkon v poměru k jejich cenové relaci, se zaměřením na snímače nižší cenové relace použitelné v leteckých navigačních systémech, tedy především MEMS senzory. Tento předběžný průzkum dá poté indicie k tomu, který snímač se vybere a bude otestován.

V druhé části je potřeba seznámit se s metodikou měření inerciálních snímačů, resp. jejich klíčových parametrů určujících jejich přesnost a podmínek, za jakých je tato přesnost dodržena. Vybrané metody následně popsat a tím připravit půdu pro reálné otestování inerciálních snímačů. Následně daná měření připravit a provést za pomoci dostupných prostředků.

V posledním logickém celku, tedy třetí části, vhodně vyhodnotit získané parametry a jejich impakt na celkovou přesnost snímače a na základě zjištěných parametrů navrhnout model snímače.

1.2 Motivace

Jak již atribut inerciální napovídá, jedná se o oblast související s pohybem a ve spojení se senzory s jeho snímáním a detekcí polohy vzhledem k vztažné - inerciální soustavě. Potřeba detekce pohybu je v oboru kybernetiky velmi rozšířena a je nutná téměř pro každou aplikaci pohybujícího se přístroje, který má být řízen. Z tohoto hlediska představují inerciální senzory nezastupitelnou část řídicí elektroniky. Stejně tak je pro vývoj a simulaci chování navigační jednotky nutný správný model vstupních

signálů ze senzorů, pro správný návrh a odladění řídicího algoritmu. Jedním z nejpoužívanějších prostředků pro simulaci je již zmíněný simulační modul Simulink, programového prostředí Matlab.

Využití technologie mikro obrábění dalo možnost vzniknout snímačům miniaturních rozměrů, které jsou svou cenou velmi dostupné a inerciální snímače vyráběné MEMS technologií zažily obrovský rozmach. Neustálý vývoj této technologie, ve které výrobci vidí obrovský potenciál, zpřesňuje parametry těchto snímačů a nacházejí využití i pro navigační účely, kde byly doposud na vrcholu jiné technologie. Výhodou MEMS zařízení je jejich malý rozměr a vyšší odolnost vůči přetížení, díky jejich menší hmotnosti. Nejproblematictější částí se zatím zdá být vlastní šum těchto zařízení, který se však daří úspěšně eliminovat díky metodám modelování.

1.3 Záměr práce

Díky této práci bych rád porozuměl principům navigace a inerciálních snímačů, významu jejich parametrů, zorientoval se mezi výrobci a v neposlední řadě se naučil, jakým způsobem se provádí měření a následná kalibrace, či modelování těchto senzorů.

2 INERCIÁLNÍ SNÍMAČE

Inerciální navigace je založena na měření složek zrychlení ve třech prostorových osách absolutními senzory zrychlení (akcelerometry) a následné dvojnásobné integraci výstupních signálů pro zjištění polohy. Spolu s akcelerometry se kombinují úhlové senzory rychlosti (gyroskopy). Z principu snímačů vyplývá, že pro určení polohy je nutné znát počáteční polohu objektu.

I přes rozsáhlé portfolio MEMS inerciálních snímačů a jejich výrobců vychází většina ze stejného principu kombinace převodu mechanického pohybu popsaného pohybovými rovnicemi na elektrický signál, např. pomocí kapacitních změn definovaných elektrickými zákony a jeho následného zpracování do výstupního signálu.

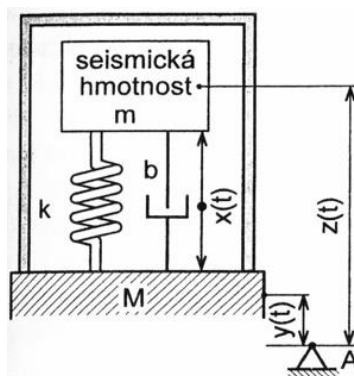
V této kapitole jsou přiblíženy základní principy a technologické rozdělení akcelerometrů a gyroskopů, a jejich následné využití v inerciálních jednotkách.

2.1 Akcelerometry

Akcelerometry jsou senzory pro měření dynamického zrychlení – tj. síly vzniklé změnou rychlosti pohybujícího se předmětu, na němž je umístěn senzor. Při měření dynamického zrychlení je nutno brát v úvahu přítomnost statické složky zrychlení, která je způsobena vlivem zemské gravitace a tuto filtrovat, pokud není přímo předmětem měření.

2.1.1 Princip

Jelikož pro navigaci je potřeba určit absolutní zrychlení vůči zemi, lze považovat akcelerometr za absolutní senzor zrychlení, jehož model je znázorněn na Obr. 2.1.



Obr. 2.1 Základní model akcelerometru [2]

Uvedený model se skládá se základny **M** pevně spojené s měřeným objektem, setrvačné hmoty o hmotnosti **m**, upevněné přes pružinu o tuhosti **k** a tlumič o tlumení **b**, jež reprezentuje jak fyzický tlumič, tak např. i vliv proudění vzduchu při pohybu hmoty.

Vibrační akcelerometry [2]

Pro vibrační akcelerometry lze zapsat pohybovou rovnici:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + b \frac{dz}{dt} + kz = 0 \quad (2.1)$$

S využitím závislosti $z(t) = x(t) + y(t)$ lze (2.1) upravit na tvar:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = -m \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (2.2)$$

Pro zjednodušení se zanedbá tlumení b , rovnice je poté:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -\frac{d^2 x}{dt^2} - \omega_0^2 x \quad (2.3)$$

Kde $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ je rezonanční kmitočet.

Při vyjádření y a x rovnicemi pro harmonický pohyb, $y(t) = y_0 \sin \omega t$ a obdobně také $x(t) = x_0 \sin \omega t$, lze po dosazení do (2.3) psát:

$$-\omega^2 y_0 \sin \omega t = \omega^2 x_0 \sin \omega t - \omega_0^2 x_0 \sin \omega t \quad (2.4)$$

Z čehož vyplývá amplitudová charakteristika:

$$\frac{x_0}{y_0} = \frac{\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (2.5)$$

Z poměru frekvencí ω a ω_0 přibližně platí:

a) pro $\omega \ll \omega_0$

je amplituda x_0 přímo úměrná amplitudě měřeného zrychlení $a = a_0 \sin \omega t$

Na tomto principu jsou postaveny všechny akcelerometry využívající pro měření kmitající nosník.

b) pro $\omega \gg \omega_0$

je $x(t) = -y(t)$ a senzor v tomto režimu měří amplitudu (dráhu) pohybu. Seismická hmotnost m je tedy v klidu a tvoří hledaný vztažný bod uvnitř senzoru. Pro určení pohybu $x(t)$ je poté možno využít vhodného senzoru měřícího polohu.

Lineární akcelerometry (lineární translace)

Pokud uvažujeme pouze nekmitavý lineární pohyb ve směru jedné osy, lze popsat model jednodušeji, a to vztahy vycházejícími z 2. Newtonova pohybového zákona, kdy síla působící na seismickou hmotnost, lze vyjádřit jako:

$$F = m \cdot a \quad (2.6)$$

, kde zrychlení a , lze vyjádřit jako součet působících zrychlení na danou hmotu:

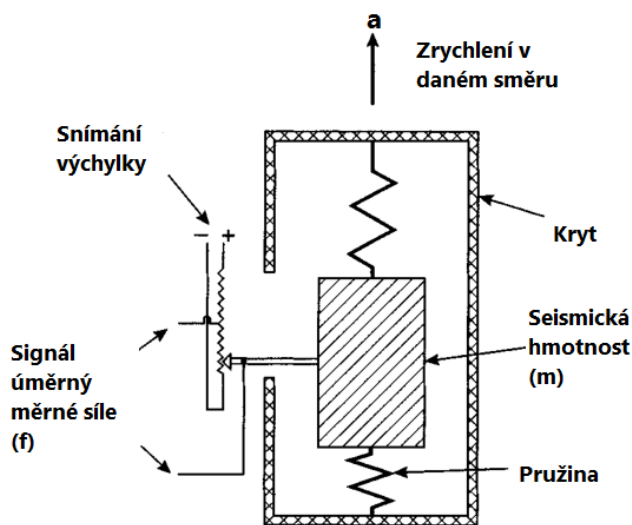
$$F = m \cdot a = m \cdot f + m \cdot g \quad (2.7)$$

Toto vyjádření se jednoduše upraví na rovnici často uváděnou ve vztahu s akcelerometry [5]:

$$f = a - g \quad (2.8)$$

, kde a je zrychlení v daném směru k vztažné soustavě, g je gravitační zrychlení a f je označováno jako měrná síla (*specific force*), která je vhodným způsobem uvnitř akcelerometru snímána a vyhodnocována.

Pro jasnější představu v souvislosti s uvedenými vztahy, lze předchozí obrázek upravit na zobrazení na Obr. 2.2.



Obr. 2.2 Jednoduchý akcelerometr [3]

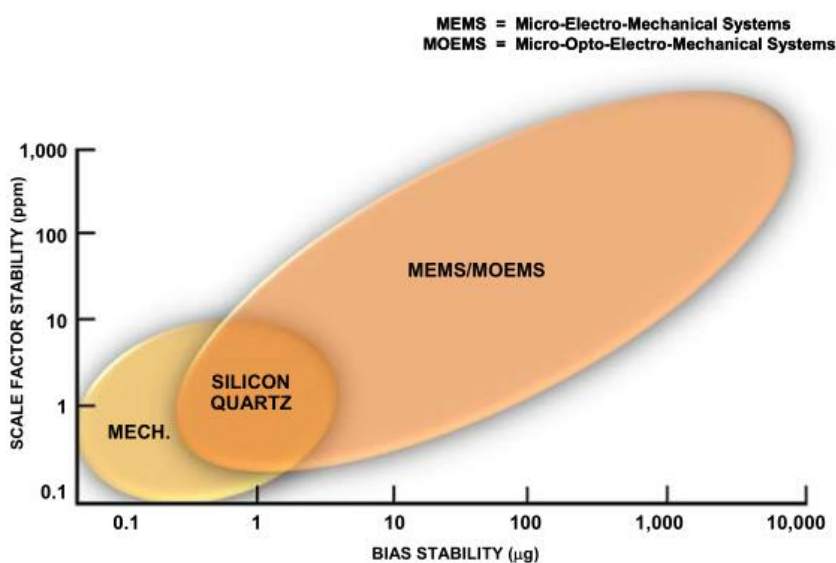
Akcelerace a v daném směru způsobí pohyb seismické hmoty směrem dolů vzhledem k rovnovážné poloze. Velikost výsledné výchylky od výchozí pozice je snímána a vyhodnocena jako informace o zrychlení v dané ose.

Pokud je akcelerometr v klidu a je umístěn na podložce, změřená síla bude rovna reakční síle podložky, která je $-g$, výstup akcelerometru tedy bude $f = -g$. V opačném případě, kdy akcelerometr padá volným pádem je $f = 0$ ($a = g$). Poněvadž pro navigaci je potřeba celkové zrychlení a , lze hodnota jednoduše upravit přičtením g z f na a [1].

2.1.2 Technologie

Hlavní způsob, jak rozlišit akcelerometry, se odvíjí od typu převodu použitého pro konverzi mechanické výchylky seismické hmoty na elektrický signál. Nejčastější principy převodu jsou piezorezistivní, kapacitní, piezoelektrické, optické a pomocí tunelovacího proudu.

V současnosti zažívá technologie MEMS velký rozvoj a předpokládá se její využití v budoucích letech v široké škále přesností a citlivostí, jak ukazuje Obr. 2.3, na němž jsou zobrazeny používané technologie a parametry, od nichž se odvíjí přesnost senzoru (nižší hodnota = přesnější), *Scale factor stability* a *Bias stability*, které jsou blíže popsány v 3. kapitole - Chyby inerciálních snímačů.



Obr. 2.3 Predikce technologického vývoje okolo r. 2020 [6]

Nejširší škálu zaujímají právě mikro elektro mechanické systémy spolu s nově se vyvíjejícími mikro elektro optickými mechanickými systémy (MEMS/MOEMS), stále se však nepředpokládá, že budou dosahovat takových přesností jako čistě mechanické systémy (Mech.), či piezokrystalické akcelerometry (Quartz), jejich vyšší přesnost je však vykoupěna menším rozsahem měřených hodnot, nižší životností a vyšší cenou, proto se jako nejvýhodnější varianta jeví použití MEMS akcelerometru s odpovídajícími parametry pro požadovanou úlohu.

2.2 Gyroskopy

Abychom mohli plně popsat pohyb objektu v trojrozměrném prostoru, je potřeba snímat kromě translačního pohybu i pohyb rotační. Senzory měřící úhel, nebo úhlovou rychlost vzhledem k referenčnímu souřadnému systému se nazývají gyroskopy [4].

Gyroskopy mají široké využití v různých oblastech, od stabilizace, přes zpětnou vazbu autopilota, herní průmysl, až k vyvažování stabilní platformy pro navigační systémy.

2.2.1 Princip

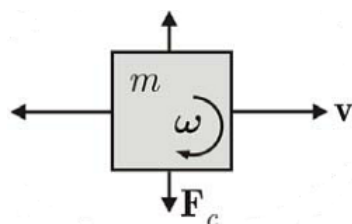
Původní a nejjednodušší forma gyroskopu vychází ze setrvačných vlastností rychle rotujícího těžkého kovového kola umístěného ve dvouosém kardanově závěsu, tvořeného dvěma osově kolmými otočnými rámy [3]. Pokud je rotor roztočen dostatečně velkou rychlostí, zůstává jeho osa ve stejném směru, přestože je s rámy otáčeno. Snímáním natočení rámu vůči referenční ose otáčejícího se gyroskopu, lze poté usuzovat na úhlech natočení v jednotlivých směrech zvoleného referenčního souřadného systému. Takto lze stručně popsat původní mechanický gyroskop, od něhož se současné snímače úhlového natočení podstatně liší, lze je spíše označit za senzory úhlové rychlosti než jako gyroskopy v původním významu, kdy se má na mysli využití setrvačných vlastností rotujícího hmoty. Nicméně se pro tyto senzory přijalo označení gyroskopy, jelikož jsou využívány pro měření rotace objektu zájmu.

Vibrační gyroskopy

Téměř všechny senzory úhlové rychlosti, vyráběné technologií MEMS, využívají vibrujícího mechanického elementu pro zjištění rotačního pohybu. Na tento element je vlivem otáčení aplikována Coriolisova síla, již propůjčil své jméno francouzský vědec a inženýr, G. G. de Coriolis [1]. Coriolisovu sílu je možno označit za důsledek aplikace Newtonových pohybových zákonů na rotující hmotné objekty. Lze ji definovat dle vztahu (2.9) [2] jako součin hmotnosti m s výsledkem vektorového součinu působící úhlové rychlosti $\vec{\omega}$ a rychlosti pohybu objektu v daném směru $\vec{v}$.

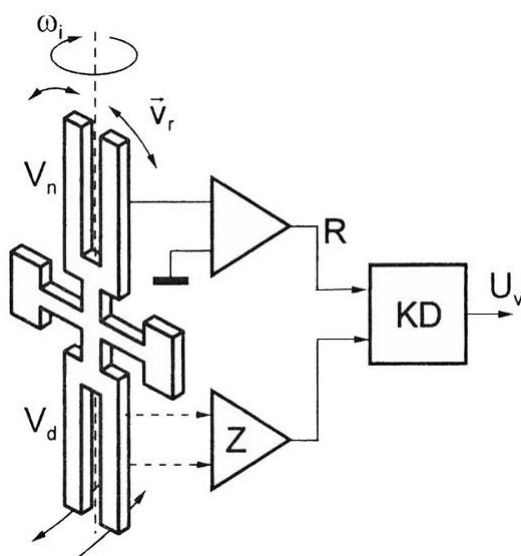
$$F_C = 2 \cdot m \cdot \vec{\omega} \times \vec{v} \quad (2.9)$$

Tomuto vyjádření Coriolisovy síly F_C odpovídá obrázek Obr. 2.4.



Obr. 2.4 Působení Coriolisovy síly na hmotný objekt [8]

Příklad využití výše zmíněných fyzikálních principů je právě v konstrukci vibračních gyroskopů viz Obr. 2.5, kde jsou ramena horní vidlice V_n rozkmitávána elektrostaticky v rovině plochy senzoru a radiální rychlost jejich pohybu má amplitudu $\vec{v}$. Působením vnější rotace s měřenou úhlovou rychlostí $\vec{\omega}$ se obě vidlice otáčejí kolem hlavní osy a tím vzniká Coriolisova síla F_C , jež má za následek vznik krouticího momentu M_k , úměrného působící rychlosti $\vec{\omega}$. Takto vzniklý moment vykazuje periodicitu a vybuzuje kmity spodní části vidlice V_d , amplituda kmitů (úměrná $\vec{\omega}$) je následně snímána např. kapacitně.



Obr. 2.5 Princip gyroskopu s vibrační vidlicí [2]

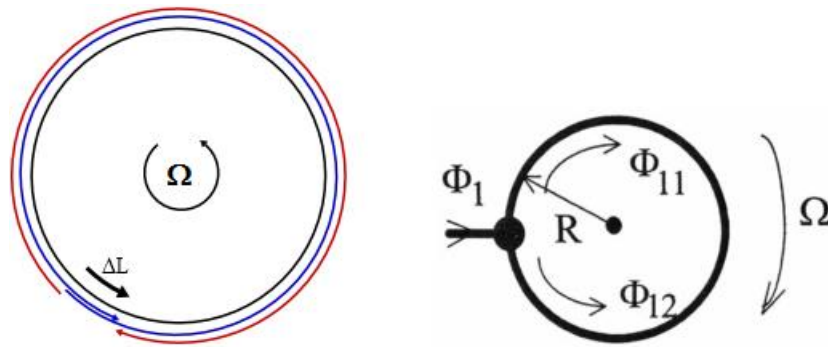
Signál senzoru je zpracováván koherentním demodulátorem (KD), což je vlastně synchronní detektor s referenčním signálem odvozeným z generátoru kmitů horní vidlice (R) a modulovaným signálem z vidlice V_d (Z). Po demodulaci je výstupem napětí U_v , jehož velikost odpovídá působící úhlové rychlosti $\vec{\omega}$. Touto koncepcí lze dosáhnout velmi vysokých citlivostí senzoru [2].

Hlavní komplikací u vibračních gyroskopů je to, že snímací vidlice se musí pohybovat či vibrovat ve dvou osách či stupních volnosti, jedním pro buzenou část vidlice V_n a druhým pro snímanou část V_d . Takto lze označit vibrační gyroskop jako rezonátor v ose buzené části a jako akcelerometr v ose snímané části [1].

Optické vláknové gyroskopy

Dalším významným typem gyroskopů jsou optické gyroskopy, využívající vlnové vlastnosti světla a s tím spojený Sagnacův jev.

Pro šíření paprsku světla (vyslaného např. z laserového zdroje) se používá buďto optické vlákno, takovéto senzory se označují jako optické vláknové gyroskopy (fiber optic gyroscope - FOG), nebo plynné prostředí se systémem zrcadel, tyto senzory se označují jako laserové gyroskopy (ring laser gyroscope - RLG). Druhý typ gyroskopů (RLG) však nebude nijak více rozebírán, poněvadž tyto gyroskopy využívají také Sagnacova jevu, resp. Sagnacova interferometru. Jsou přesnější a vykazují vyšší stabilitu výstupních parametrů, tato kvalita je však vykoupena velmi vysokou kupní cenou.



Obr. 2.6 Sagnacův jev, změna dráhy a popis [9, 2]

Sagnac (1913) zjistil, že při rotaci kruhového vlnovodu, v němž proti sobě obíhají dva světelné svazky úhlovou rychlostí Ω , je obvodová rychlost svazku ve směru Ω zvyšována a pro opačný směr snižována přibližně o hodnotu $v = \Omega R$, při zanedbání relativistických efektů (Obr. 2.6 vpravo). Změna rychlosti se projeví ve změně dráhy paprsků ΔL (Obr. 2.6 vlevo).

V následujících vztazích dle [2] je c rychlost světla, $v = \Omega R$ obvodová rychlost vyvolaná otáčením soustavy a n index lomu světlovodu. Pro dobu oběhu v obou směrech platí:

$$t_+ = \frac{2\pi R}{u_+} = \frac{2\pi R}{\frac{c}{n} - \Omega R}, \quad t_- = \frac{2\pi R}{u_-} = \frac{2\pi R}{\frac{c}{n} + \Omega R} \quad (2.10)$$

Z čehož lze určit rozdíl dob oběhu Δt :

$$t_+ - t_- = \frac{2\pi R}{\frac{c}{n} - \Omega R} - \frac{2\pi R}{\frac{c}{n} + \Omega R} = \frac{4\pi\Omega R^2}{\frac{c^2}{n^2} - \Omega^2 R^2} \cong \frac{4\pi\Omega R^2}{\frac{c^2}{n^2}} \quad (2.11)$$

A hledaný rozdíl fáze $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{c}{n\lambda} \Delta t = 8\pi^2 R^2 \frac{n}{c\lambda} \Omega \quad (2.12)$$

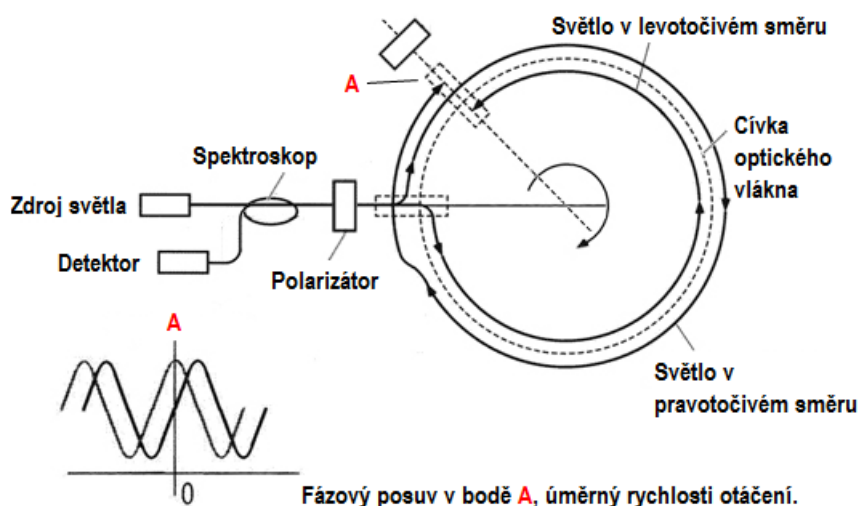
Pro přesnější výpočet výsledných obvodových rychlostí je nutno použít Lorentzovy transformace pro správné složení rychlostí. Obvodová rychlost u_+ ve směru Φ_{11} je pak dána vztahem:

$$u_+ = \frac{\frac{c}{n} + v}{1 + \frac{c}{n} \frac{v}{c^2}} \quad (2.13)$$

Tyto a další poznatky jsou využity při konstrukci Sagnacova interferometru znázorněného na Obr. 2.7, jenž tvoří základ optického vláknového gyroskopu. Ze zdroje světla putují paprsky do polarizátoru a jsou rozděleny do dvou svazků směřovaných do opačných konců cívky optického vlákna, vše je podpořeno vhodnou optikou. Svazky světla putující proti sobě mění svou rychlost díky úhlové rotaci a proto v místě jejich opětovného setkání A vzniká fázový posuv, působící interferenci vracejících se paprsků, která je snímána spektroskopem a takto získaná informace putuje do detektoru světla, následně je detekovaný signál vhodně zpracován.

Tato koncepce gyroskopu je odolná vůči otřesům a gravitačním účinkům, pro účely navigace letadel se využívá zpětnovazební uspořádání pro zvýšení přesnosti měření [2].

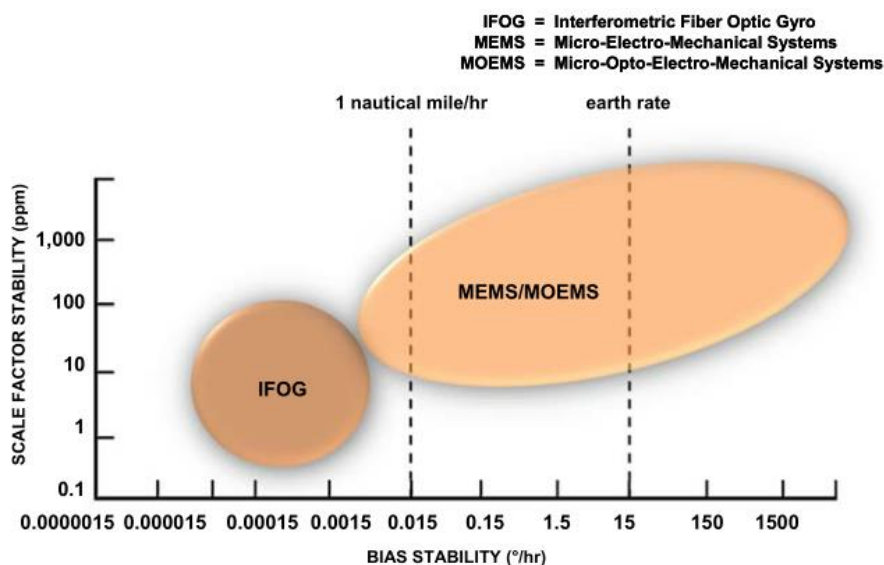
Přesnost je také ovlivněna kvalitou a délkou zvoleného optického vlákna, která může být až v řádu km. I při takovýchto délkách vlákna lze počítat s rozměry cívky okolo 10 cm v průměru.



Obr. 2.7 Sagnacův interferometr [10]

2.2.2 Technologie

Na rozdíl od akcelerometrů, kde převládá technologie MEMS v nejširší škále použití od nejlevnějších senzorů pro snímání pohybu až po přesné senzory určené pro využití v navigaci, u gyroskopů jsou v současnosti kromě mechanických systémů hojně využívány pro účely navigace senzory optické. Laserové gyroskopy (RLG) a interferometrické optické vláknové gyroskopy (IFOG), lze v současné době považovat za špičku. MEMS i MOEMS snímače však představují velký potenciál z hlediska technologického vývoje a přesnosti a počítá se s jejich rozšířením. Jak ukazuje Obr. 2.8, predikující technologický vývoj, interferometrické a mikro elektro mechanické gyroskopy by měly nahradit ostatní stávající technologie a zůstat převládajícími hráči na trhu pro účely navigace.



Obr. 2.8 Predikce technologického vývoje okolo r. 2020 [6]

Předpokládá se však, že IFOG gyroskopy nebudou MEMS systémy překonány z hlediska přesnosti a stability (*Scale factor stability*, *Bias stability* popsáno blíže v 3. kapitole - Chyby inerciálních snímačů), což lze usuzovat, bere-li se v úvahu jejich princip založen na interferenci, kdy se pracuje s vlnovými vlastnostmi světla, které vykazuje nižší tendenci k elmag. rušení a generaci šumu.

Všechny MEMS gyroskopy vychází z využití principu Coriolisova efektu, základní typy jsou gyroskopy využívající vibrující vidlice (*Tuning fork*), kola (*Vibrating wheel*), nebo prstence (*Wine Glass resonator*) buzeného elektrostatickým, elektromagnetickým, či piezoelektrickým rezonátorem [11]. Působící Coriolisova síla při otáčení senzoru má za následek detekovatelné změny vibrující části, které jsou snímány elektrostaticky, elektromagneticky, piezoelektricky či kapacitně [1].

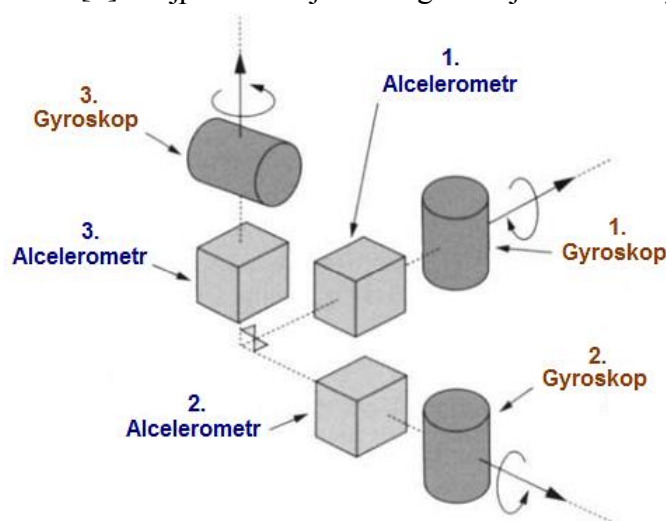
2.3 Inerciální měřicí jednotky

Inerciální navigace, gps, akcelerometry, gyroskopy předmětem práce, lowcost.

Consumer, tactical, navigation grade.referenční rámec.

Inerciální měřicí jednotka, dále jen IMU (*Inertial Measurement Unit*) měří lineární i úhlový pohyb ve třech rozměrech. Výstupem IMU jsou naměřená úhlová rychlost a akcelerace v souřadném systému rozmístění inerciálních senzorů, tyto se dále zpracovávají na informaci o pozici, rychlosti a směru, vzhledem k definovanému souřadnému systému.

Vzájemné rozmístění inerciálních snímačů se označuje jako ISA (*Inertial Sensor Assembly*). ISA je definováno jako struktura obsahující vícero inerciálních snímačů, gyroskopů a/nebo akcelerometrů, ve vůči sobě definovaných orientacích [12]. IMU je typicky složena ze třech na sebe kolmých gyroskopů a třech na sebe kolmých akcelerometrů (Obr. 2.9), takováto konfigurace se označuje jako úplná (*full IMU*) a je schopna operovat s šesti stupni volnosti. Kompletní výčet možných prostorových konfigurací lze nalézt v [3]. Nejpoužívanější konfigurace jsou uvedeny v příloze B.



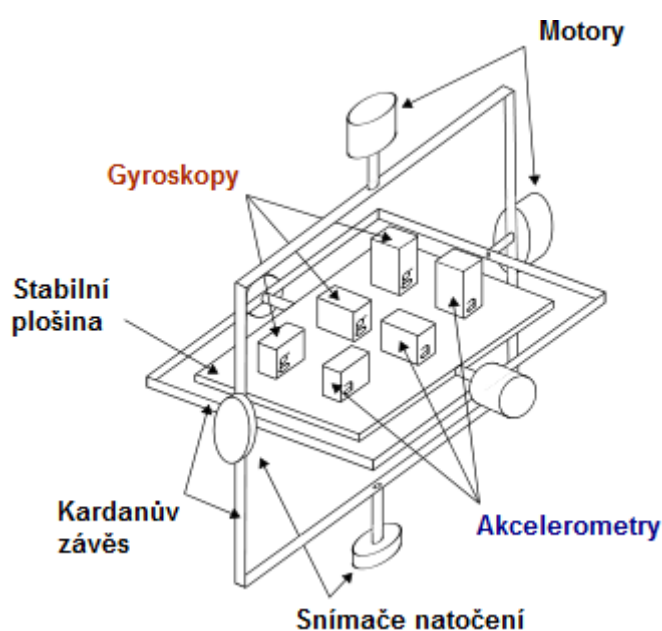
Obr. 2.9 Ortogonální rozmístění senzorů IMU [3]

Inerciální navigace je využívána v široké škále aplikací zahrnující navigaci automobilů, letadel, taktických střel, raketoplánů, ponorek a lodí. Stálé pokroky ve zmenšování zařízení typu MEMS, umožňují vyrábět velmi malé a lehké inerciální měřicí systémy [7].

Téměř všechny inerciální jednotky lze rozdělit do dvou kategorií uvedených v následujících podkapitolách (Systémy stabilní platformy, Systémy typu Strapdown). Hlavní rozdíl mezi těmito kategoriemi je souřadný systém, ve kterém gyroskopy a akcelerometry pracují. Lze definovat dva hlavní referenční souřadné systémy, a to souřadný systém navigovaného objektu, na kterém je IMU umístěna a souřadný systém, ve kterém probíhá navigace, tento bude označen jako globální.

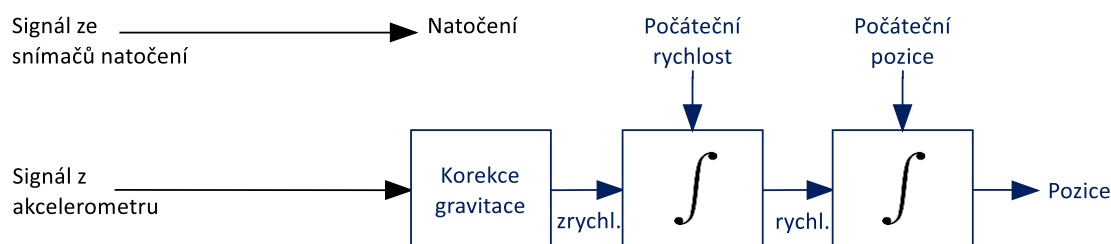
2.3.1 Systémy stabilní platformy

V systémech stabilní platformy jsou inerciální snímače připevněny na plošině, která je izolovaná od jakéhokoli vnějšího rotačního pohybu, jinými slovy je plošina konstantně udržována v poloze vyrovnané s globálním souřadným systémem. Toho je docíleno připevněním plošiny pomocí kardanova závěsu, jež je tvořen vzájemně ortogonálně umístěnými otočnými rámy, to umožňuje kompenzaci natočení ve všech třech osách (Obr. 2.10). Gyroskopy připevněné na plošině detekují jakékoliv natočení plošiny a takto získaná informace je zpracována a vyvolá takové natočení motorů ovládajících rámy, aby detekovaná rotace byla vykompenzována. Tímto způsobem je zajištěno, že plošina zůstává vyrovnaná s globálním souřadným systémem.



Obr. 2.10 Inerciální jednotka stabilní platformy [7]

Informace o natočení objektu vůči globálnímu souřadnému systému je získávána pomocí jednoduchých snímačů natočení, které sledují úhly natočení mezi jednotlivými sousedními rámy. Jak ukazuje diagram na Obr. 2.11, pozice objektu je získávána dvojitou integrací signálů z akcelometrů rozmístěných na plošině, ještě před integrací je od vertikálního signálu nutno odečíst vliv gravitačního zrychlení g .

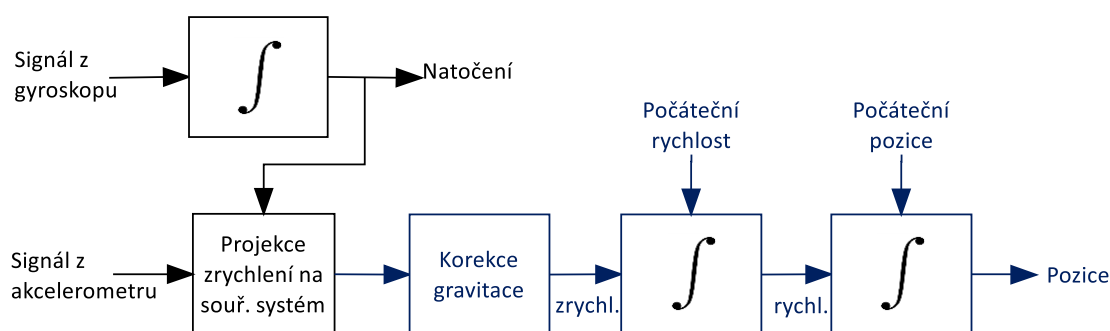


Obr. 2.11 Navigační algoritmus systémů stabilní platformy

2.3.2 Systémy typu Strapdown

V navigačních systémech tohoto typu jsou inerciální snímače pevně spojeny s měřeným objektem a výsledné hodnoty jsou tudíž měřeny v souřadném systému objektu a následně převedeny na globální, ve kterém probíhá navigace.

Orientace objektu je zjišťována integrací signálů z gyroskopu, odpovídajícím úhlové rychlosti. Pozice je poté získávána ze signálů z akcelerometrů, které jsou díky známé orientaci z gyroskopů převedeny do globálního souřadného systému a následně integrovány jako v předchozím případě systémů stabilní platformy. Stejně tak se počítá s eliminací vlivu gravitačního zrychlení. Postup získání pozice (v globálním souřadném systému) ve Strapdown systémech popisuje Obr. 2.12.



Obr. 2.12 Navigační algoritmus systémů typu Strapdown

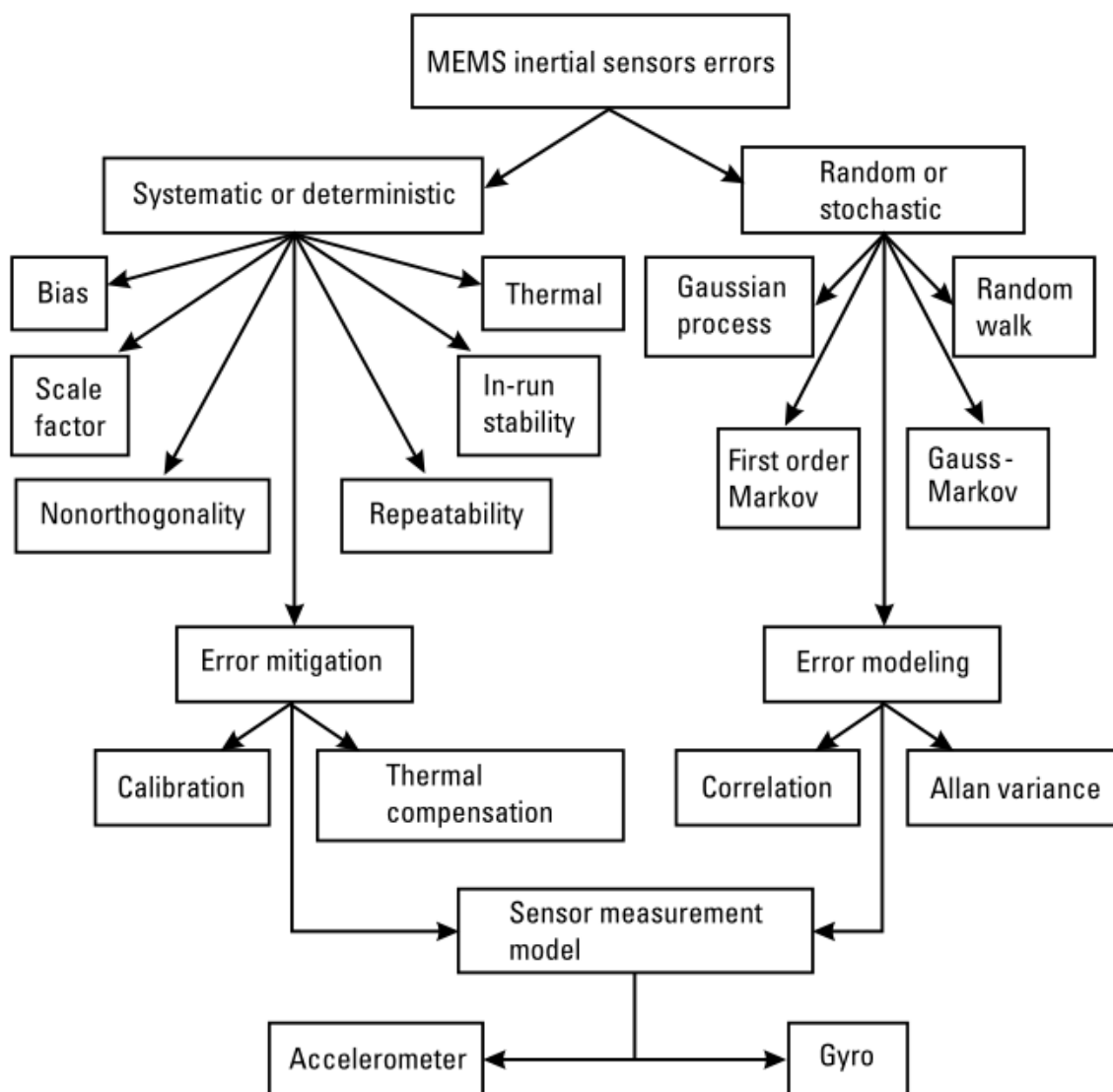
Vzhledem k integračnímu procesu jsou jakékoliv chyby vzniklé při měření snímačem akumulovány a způsobují v čase se zvyšující odchylku od skutečné pozice, tj. divergenci pozice v čase. Pokud jsou vzniklé chyby minimalizovány vhodnou kompenzací a působí pouze jejich zbytkové hodnoty, bude poziční odchylka navigačního systému minimální. Například nekompenzovaný *bias/scale factor* akcelerometru zapříčiní poziční odchylku úměrnou druhé mocnině uběhnutého času t (působící síly detekované akcelerometrem jsou dvakrát integrovány pro zjištění pozice). Obdobně nevykompenzovaný *bias/scale factor* gyroskopu způsobí poziční odchylku úměrnou třetí mocnině času [14].

Oba zmíněné systémy IMU (Stabilní platforma, Strapdown) jsou založeny na stejných základních principech, odlišují se pouze ve způsobu pojetí převodu změřených hodnot do globálního souřadného systému. Systémy typu Strapdown nepotřebují takovou mechanickou základnu a to je předurčuje k menším rozměrům oproti systémům stabilní platformy, proto jsou také téměř všechny MEMS IMU typu Strapdown. Malé rozměry Strapdown systémů jsou však vykoupěny vyššími výpočetními nároky, to však při dnešní ceně výkonných integrovaných čipů, nepředstavuje překážku a Strapdown systémy se staly dominantním typem INS (*inerciálních navigačních systémů*).

3 CHYBY INERCIÁLNÍCH SNÍMAČŮ

Zdroje [1, 3, 4, 13]

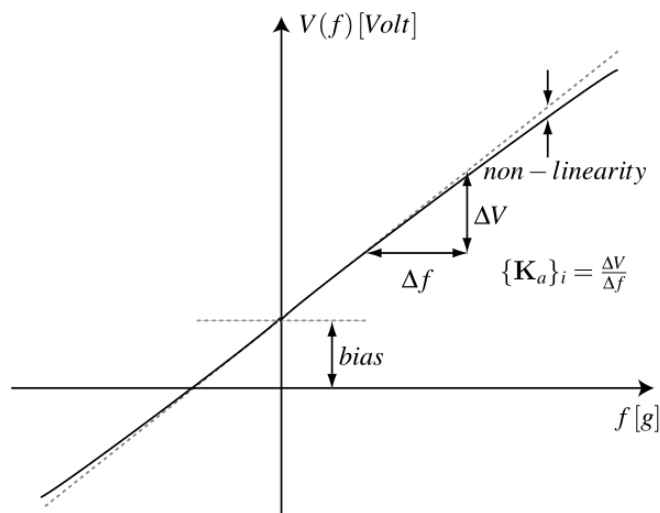
Tato kapitola se zabývá především chybami inerciálních snímačů typu MEMS. Tyto snímače představují cenově efektivní řešení spolu s výhodou malých rozměrů těchto jednotek. Jsou však oproti svým mechanickým předchůdcům zatíženy mnoha chybami, danými použitou technologií (Obr. 3.1). Chyby sčítající se v čase významně ovlivňují výsledek měření, a proto je důležité před navigací vhodně tyto chyby kompenzovat.



Obr. 3.1 Přehled chyb inerciálních snímačů a metody kompenzace [1]

3.1 Deterministické chyby

Systematické či deterministické chyby, jak již název napovídá, se vyskytují systematicky a lze tedy určit jejich hodnotu (determinovat) a vhodným způsobem tyto chyby minimalizovat (eliminovat). Na základě správného určení těchto chyb lze vystavět chybový model, se kterým se bude počítat při určování pozice z naměřených signálů inerciálních snímačů.



Obr. 3.2 Vztah mezi výstupním signálem akcelerometru (gyra) a měřenou silou (úhlovou rychlostí) je modelován jako lineární funkce o směrnici K_a (scale-factor), popisující bias (offset) a odchylku od linearity (non-linearity)[13]

3.1.1 Bias / Offset

Pokud na senzor nepůsobí žádné vnější síly, měl by ideálně jeho výstup ukazovat nulovou hodnotu. Nicméně není tomu tak a je přítomen offset, neboli posun nuly, označovaný jako *bias*. Průměrná hodnota výstupu akcelerometru resp. gyroskopu, která nemá žádný vztah k působící akceleraci resp. rotaci je označována jako *bias*. Na Obr. 3.2 je *bias* graficky znázorněn na přenosové funkci snímače.

Jednotky, ve kterých je *bias* uváděn, jsou:

[g], [m/s²] pro akcelerometry

[°/h], [°/s] pro gyroskopy

3.1.2 Vstupní citlivost / Scale Factor

Scale factor je definován jako poměr změny výstupu ke změně vstupu, čili představuje směrnici přenosové funkce senzoru (K_a na Obr. 3.2). V ideálním případě by *scale factor* měl být roven 1, proto jakákoliv jeho hodnota odlišující se od 1 představuje ovlivnění chybou senzoru. Rozdíl mezi ideální a skutečnou hodnotou představuje chybu

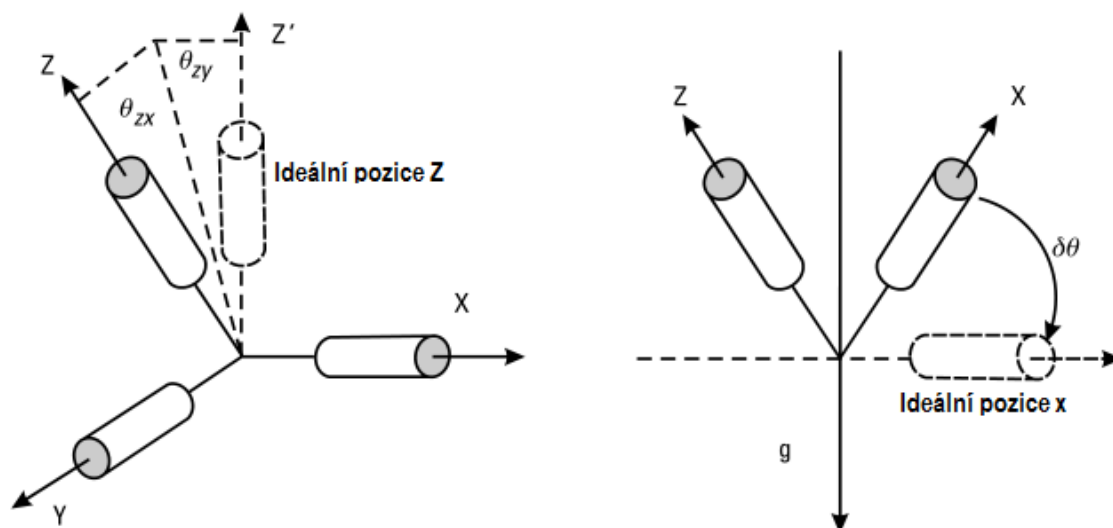
citlivosti, která je označována jako *scale factor error*, či *input-sensitivity error* a je uváděna v jednotkách:

[ppm], [%] tj. odchylka vyjádřená v miliontinách, či setinách

Obdobně lze definovat i nelinearitu (*non-linearity* na Obr. 3.2), jež představuje odchylku (ppm) od ideálního průběhu definovaného výrobcem.

3.1.3 Chyby ortogonality / vyrovnaní

Tyto chyby souvisí s odchylkami od ideální vzájemné osové ortogonalitě snímačů při výrobě (Obr. 3.3 vlevo) a od ideálního sesouhlasení os (vyrovnaní) při upevňování senzorů na objekt (Obr. 3.3 vpravo).



Obr. 3.3 Chyby rozmístění způsobené ve výrobě (vlevo) a při montáži k objektu (vpravo)
[1]

Jedná se o malé odchylky, se kterými je však nutno počítat, jsou označovány jako *nonorthogonality error*, nebo *misalignment error* a vyjadřovány v:

[ppm]

3.1.4 Run-to-Run Bias/Scale Factor

Tuto chybu lze též označit jako opakovatelnost (*repeatability*) uvedených parametrů *bias* a *scale factor*, je to vlastně odchylka těchto parametrů od udávané hodnoty, lišící se při každém zapnutí senzoru. Odráží fakt, že po každém zapnutí senzoru lze pozorovat mírně odlišnou hodnotu *biasu* či *scale factoru*, která zůstává po dobu daného zapnutí neměnná. Tyto chyby jsou významné pouze v případě použití low-cost senzorů. Jelikož

se jedná o odchylky daných parametrů, jejich jednotky jsou totožné, případně se nabízí bezrozměrné poměrové vyjádření.

3.1.5 In Run Bias/Scale Factor

Uváděno také jako *bias/scale factor stability*. Tato chyba vzniká díky změnám hodnot *bias/scale factor* v průběhu měření při jednom zapnutí. Oproti předchozí statické chybě, je tato v daném zapnutí senzoru dynamická, jednotky zůstávají totožné.

Tato chyba není čistě deterministická, ale obsahuje i stochastickou část. Deterministická část chyby je způsobena měnicími se podmínkami okolí, např. teplotou, a je modelovatelná, zbylá část chyby je považována za náhodnou a je obtížné ji namodelovat. Vzhledem k tomu, že tyto chyby nelze jednoduše vyčíst s naměřených hodnot senzorů, jsou vesměs modelovány jako náhodný proces.

3.1.6 Teplotně závislý Bias/Scale Factor

Chyba způsobená odchylkami hodnot (*bias/scale factor*) se změnou teploty senzoru. Teplotní odchylky mohou být výrazné u velmi levných MEMS snímačů a pro určité aplikace je potřeba je snížit kompenzačními technikami. Tyto odchylky jsou zjišťovány pomocí teplotních testovacích procedur, kdy se měří odchylky základních parametrů senzoru, operujícího při různých teplotách.

3.2 Stochastické chyby

Stochastické chyby jsou náhodné chyby, které nastávají díky náhodným změnám přenosové funkce (*bias/scale factor*) senzoru v čase, označují se jako drifty těchto parametrů. Drift může být také např. zapříčiněn interferencí výstupních signálů s dalším elektronickým zařízením. Tyto chyby jsou čistě náhodné, můžou být však modelovány známými stochastickými procesy, z nichž nejužívanějšími jsou:

Gaussův náhodný proces (normální rozložení)

Gauss-Markovův náhodný proces (exponenciální autokorelace Gaussova procesu)

Random Walk proces (integrovaný bílý šum výstupního signálu senzoru)

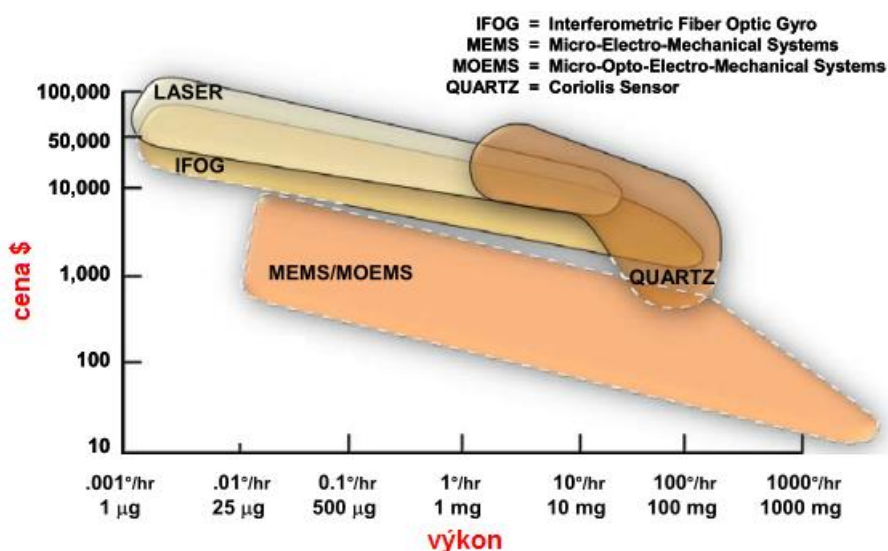
Aby bylo možné implementovat co nejvhodnější model pro daný set dat, je důležité porozumět rozdílům mezi jednotlivými náhodnými procesy a na základě toho vybrat vhodný proces.

3.3 Shrnutí

Všechny chyby vyskytující se u inerciálních snímačů lze označit za odchylky od stavu, kdy výstup snímače přesně odpovídá působícím hodnotám. Tyto odchylky jsou vyjádřeny diferencemi od ideálního (definovaného) přenosu snímače. Kromě chyb vzájemného rozmístění (*non-orthogonality/misalignment*), které samozřejmě také ovlivňují výsledný přenos, jde hlavně o nelinearitu (*non-linearity*) přenosu snímače a především o *bias* a *scale factor*. Tyto dva parametry lze totiž rozdělit do tří částí. Jsou to statická, teplotně proměnná a náhodná část (*drift*), první dvě jsou deterministické a lze je určit kalibrací, třetí část musí být modelována vhodně zvolenými stochastickými procesy. Parametry snímačů udávané výrobcí jsou shrnuty v následující kapitole 4. Metody testování inerciálních snímačů jsou uvedeny v kapitole 5.

4 INERCIÁLNÍ SNÍMAČE NA TRHU

Kapitola poskytuje krátký průzkum trhu inerciálních snímačů, jelikož je cílem nalézt co nejlevnější snímač s co nejlepšími parametry neboli poměrem cena výkon, který bude moci být použit pro navigační účely. Jelikož zde hraje roli cena, zužuje se průzkum na MEMS inerciální snímače, které díky levné výrobě spadají do nižší cenové kategorie, viz Obr. 4.1, který ukazuje cenu inerciálních jednotek dané technologie v závislosti na výkonu. Výkon se dá v tomto případě označit za přesnost IMU, která je zde vyjádřena pomocí parametru *bias stability*, často používaného k porovnání kvality.



Obr. 4.1 Cena Inerciálních jednotek vzhledem k technologii a výkonu [6]

V jednotlivých podkapitolách jsou postupně uvedeni výrobci inerciálních snímačů, jednotlivé parametry snímačů a nakonec srovnávací tabulky pro akcelerometry a gyroskopy.

4.1 Výrobci inerciálních snímačů

Na trhu existuje spousta výrobců inerciálních snímačů, z nichž jsem se snažil vybrat ty nejznámější, snímače od těchto výrobců jsou uvedeny ve srovnání na konci kapitoly.

Analog Devices

Americká nadnárodní společnost, zabývající se výrobou polovodičů, specializující se na převod dat a zpracování signálu. Hlavním sídlem této společnosti je Norwood, Massachusetts

VTI Technologies – Murata

Společnost zabývající se výrobou MEMS snímačů, byla odkoupena japonským koncernem Murata, kde tvoří divizi pro výrobu inerciálních snímačů.

Sensoror

Společnost zabývající se výrobou MEMS snímačů od roku 1965, vyrábějící přesné snímače pro průmysl i navigaci

Invensense

Společnost založená roku 2003 vyrábějící především snímače pohybu pro spotřební elektroniku, s hlavním sídlem společnosti je Sunnyvale v Kalifornii

Moog Crossbow – MEMSIC

Společnost založená roku 1995, dodávající inteligentní snímače pro vojenské programy a navádění se sídlem v Milpitas v Kalifornii

Xsens

Společnost založená v roce 2000, pro účely měření výkonu atletů pomocí snímačů pohybu, význačná obzvláště díky unikátním technologiím a algoritmu fúzování dat. Sídlo společnosti je ve městě Enschede v Nizozemsku.

Microstrain

Společnost sídlící v Cary v Severní Karolině, jejíž divize vyrábějící snímací systémy byla založena roku 1987, vyrábí snímače pro automobilový a letecký průmysl.

VectorNAV

Menší společnost specializující se na výrobu navigačních inerciálních systémů založena v roce 2008 se sídlem v Richardsonu v Texasu.

Bosch Sensortec

Divize firmy Bosch zabývající se výrobou inerciálních snímačů pro univerzální využití, sídlo společnosti je ve městě Kusterdingen v Německu

SDI Systron Donner Inertial

Prodejní značka společnosti Custom Sensors & Technologies (CST), vyrábějící přesné krystalové inerciální MEMS snímače pro precizní aplikace navigace.

ST microelectronics

Jedna z největších nadnárodních společností v Evropě zabývající se výrobou polovodičových součástek pro různá odvětví se sídlem v Ženevě ve Švýcarsku.

4.2 Udávané parametry inerciálních snímačů

Parametry udávané v produktových listech výrobců, ne korespondují vždy plně se zavedeným označením. Tato podkapitola shrnuje jednotlivá označení udávaných parametrů dávajících stejnou informaci, jelikož názvy daných parametrů se výrobce od výrobce mohou lišit. Ať již v případě akcelerometrů nebo gyroskopů je dobré orientovat se podle jednotek. Tučně jsou označeny názvy parametrů, které jsou uvedeny ve srovnávacích tabulkách následující podkapitoly. Jelikož jsou všechny produktové listy v anglickém jazyce, jsou i názvy parametrů ponechány v originálním znění se stručným popisem.

Je potřeba mít na mysli, že každý výrobce může mít jinou metodiku měření, dané parametry testovat při různých podmínkách a na různém počtu senzorů, či může být daný parametr vztažen k další podmínce, např. chyba citlivosti pro určitý rozsah teplot, nebo drift nuly pro daný časový rozsah atd. Díky tomu je nutné brát uváděné parametry s jistou rezervou, pro základní orientaci však postačí.

Parametry uvedené ve srovnání jsou:

Dynamic Range

Full-scale range, Operating range, Measurement range, Full range

Dynamický rozsah snímače ve výstupních jednotkách od minimální do maximální hodnoty, obvykle bývá volitelný, kdy pro nejnižší rozsah je nejvyšší přesnost.

Initial sensitivity

Sensitivity, Scale Factor, Resolution

Citlivost snímače vyjadřující poměr mezi výstupní hodnotou a působící vstupní veličinou. Hodnota by měla odpovídat poměru mezi dynamickým rozsahem a bitovým rozsahem.

Output bits

Bitový rozsah výstupního čísla udávajícího naměřenou hodnotu.

Initial sensitivity tolerance

Total sensitivity error, Sensitivity Scale Factor Tolerance, Scale Factor Error, Scale Factor Accuracy

Odchylka citlivosti od její udávané hodnoty v procentech. Vyjadřuje, jak se citlivost může měnit (bez udání zdroje působícího změnu), resp. její nepřesnost. Podobný parametr je nelinearita, ta je však vztažena na daný rozsah vstupní veličiny.

Sensitivity Temp. Coefficient

Sensitivity over temperature, Sensitivity temperature drift, Sensitivity Variation Over Temperature, Sensitivity change vs. temperature

Parametr vyjadřující možnou změnu citlivosti s teplotou, podíl procentní chyby a rozsahu teplot, pro který byla měřena, není zde myšleno přímo jako směrnice závislosti citlivosti na teplotě.

Initial Bias Error

Initial null, Offset error, Initial ZRO Tolerance, Offset accuracy, Bias

Odchylka nuly od její udávané hodnoty ve výstupních jednotkách. Vyjadřuje, jak se nula může měnit (bez udání zdroje působícího změnu) při daném rozsahu.

Bias Temp. Coefficient

Offset over Temperature, Offset temperature drift, ZRO Variation Over Temperature, Zero change vs. temperature, Bias error over temperature

Parametr vyjadřující možnou změnu nuly s teplotou, podíl odchylky ve výstupních jednotkách a rozsahu teplot, pro který byla měřena, není zde myšleno přímo jako směrnice závislosti nuly na teplotě.

Bias Stability

In-Run Bias Stability, Bias Instability, Offset short term instability, Zero Rate Bias Stability, Bias In-Run

Vyjadřuje hodnotu stability nuly výstupu snímače, čím nižší hodnota tím stabilnější. Náhodný proces popsateľný pomocí metod spektrální analýzy, či Alanovy odchylky.

Noise

RMS noise, Output noise

Efektivní hodnota působícího šumu, přibližně odpovídá směrodatné odchylce z výstupních hodnot snímače.

Noise Density

Spektrální šumová hustota, výkon šumu rozprostřený ve spektru pro dané frekvence.

Bandwidth

Amplitude response (-3dB)

Šířka pásma snímače, definovaná poklesem o 3dB ve frekvenční amplitudové charakteristice.

Angular Random Walk, Velocity Random walk

Angle random walk, Random walk noise

Náhodně pochodující šum, vyjadřuje rozptyl hodnot výstupu po integraci. Své pojmenování získal po podobnosti s chůzí v náhodném směru.

G sensitivity

Linear Acceleration Effect on Bias, Linear Acceleration Sensitivity, G-dependent bias

Parametr udávaný pro gyroskopy, vyjadřující citlivost gyroskopu na lineární akceleraci v dané ose.

4.3 Srovnávací tabulky vybraných snímačů

Ve srovnání bylo porovnáno šestnáct snímačů z kategorie akcelerometrů i gyroskopů běžně dostupných na trhu, ať již v samostatné, či kombinované konfiguraci. Byly vybrány MEMS snímače s číslicovým výstupem. Jednotlivé parametry uvedené v tabulkách jsou popsány výše. Kromě vybraných parametrů jsou v tabulkách uvedeny položky:

- | | |
|---------------|---------------------------------|
| • Výrobce | jméno výrobce |
| • Typ | katalogové označení snímače |
| • Konfigurace | počet stupňů volnosti snímačů |
| • Cena | průměrná orientační cena za kus |

Pod položkou konfigurace je uvedeno i AHRS, což je zkratka pro referenční systém pro stabilizaci kurzu při navigaci. Jednotka AHRS se skládá z 3osého akcelerometru, gyroskopu a magnetometru. Hlavní rozdíl mezi tímto referenčním systémem a klasickou inerciální jednotkou je ve zpracování a formátu výstupních dat, kdy na výstupu IMU jde informace o natočeních a zrychleních v jednotlivých osách a na výstupu AHRS jsou již vypočtené navigační úhly (*roll-pitch-yaw, rotace-náklon-otočení*), magnetický kurz a přetížení, kdy data z jednotlivých senzorů jsou vhodně fúzována a filtrována pro zvýšení přesnosti.

Senzory ve žlutě zvýrazněných řádcích byly na základě uváděných parametrů vybrány k otestování.

4.3.1 Akcelerometry

Výrobce	Typ	Konfigurace	Dynamic Range	Initial sensitivity	Output bits	Initial sensitivity tolerance	Sensitivity Temp. Coefficient	Initial Bias Error	Bias Temp. Coefficient	Bias Stability	Noise	Band width	Velocity Random Walk	Cena
STMicroelectronics	LSM303DLH	3acc+3magn	±2	1	16		±10	±20	mg/°C	µg	mg	µg/VHz	µg/√Hz	\$
Analog Devices	ADIS 16210	3acc	±1,7	0,061	15	±0,024	±1	±1	±0,1			190		<10
VTI Technologies	SCC1300-D04	1gyro+3acc	±6	1,5	13	±4	±60	±70	±0,24		5			150
VTI Technologies	SCC1300-D02	1gyro+3acc	±2	0,55	13	±4	±48	±16	±0,11		3			140
Sensoror	STIM300	3gyro+3acc	±10	0,0019	24	±0,03		±0,75	±2	50		262	60	160
YEI Technology	TSS-USB-S	AHRS	±2	2,400E-01	14		±80					99		
Invensense	MPU-6050	3gyro+3acc	±2	0,061	16	±3	±20	±50/80	±0,5/1,14		400	5-260		70
Moog Crossbow	VG700MB	3gyro+3acc	±4			<1				<24mg			100	12000
MEMSIC	VG800CA	3gyro+3acc	±5	0,5						<1mg		50	500	-
Xsens	Mti 100	3gyro+3acc	±5							40	80	375		2250
Xsens	Mti / Mti-g	AHRS / AHRS+GPS	±5							200	200	30		2200/4400
Microstrain	3DM-GX3-25 / -35	AHRS / AHRS+GPS	±5		16	0,05		2		40	80	1-225		2295 / 3075
VectorNAV	VN-100	AHRS	±2	0,4								50		500
Bosch Sensortec	BMA280	3acc	±2	0,24	14			±50			120	8-500		<10
Bosch Sensortec	BM1055	3gyro+3acc	±2	0,98	12			±70			150	8-1000		<10
SDI	SD1500-AB00	3gyro+3acc	±50			<0,02		±1		100		75	100	-

4.3.2 Gyroskopy

Výrobce	Typ	Konfigurace	Dynamic Range	Initial sensitivity	Output bits	Initial sensitivity tolerance	Sensitivity Temp. Coefficient	Initial Bias Error	Bias Temp. Coefficient	Bias Stability	Noise	Band width	Angular Random Walk	G sensitivity	Cena
Analog Devices	ADIS 16136	1gyro	°/s ±450 ±480	°/s/LSB 7,139E-05	b 24	% ±1	ppm/°C ±35	°/s ±0,15	°/s/°C ±0,00125	°/hr 4	°/s 0,11	°/s/√Hz 0,167	°/√Hz 0,017	°/sec/g 0,017	\$ 1290
Analog Devices	ADIS 16130	1gyro	±250	0,043	24			±3		5,76	0,22	0,0125	300	0,05	1000
VTI Technologies	SCC1300-D04	1gyro+3acc	±300	0,055	16	±2	±60	±1,5	±0,00545	<2,1	0,23	0,02		0,86	0,1
VTI Technologies	SCC1300-D02	1gyro+3acc	±100	0,02	16	±2	±60	±1	±0,0036	<1	0,06-0,1	0,0085		0,45	0,1
YEI Technology	TSS-USB-S	AHRS	±250	8,75E-03	16		±160			11		0,03			163
Sensoror	STIM210	3gyro	±400	2,50E-06	24	±0,05		±0,07	±0,000022	0,5			0,15	0,0027	5800
Invensense	MPU-6050	3gyro+3acc	±250	0,0076	16	±3	±160	±20	±0,16		0,05	0,005	10	0,1	15
Moog Crossbow	VG700MB	3gyro+3acc	±200			<1,5				<20			40	<0,4	12000
MEMSIC	VG800CA	3gyro+3acc	±200	0,025		<1				<3			50	<0,1	
Xsens	Mti 100	3gyro+3acc	±450							10		0,01	450		0,003
Xsens	Mti / Mti-g	AHRS / AHRS+GPS	±300							20		0,05	40		
Microstrain	3DM-GX3-25 / -35	AHRS / AHRS+GPS	±300		16		±0,25			18		0,03	1-440		2200/4400
VectorNAV	VN-100	AHRS	±500	0,01						<100			140		500
Bosch Sensortec	MG160	3gyro	±125	0,004	16			±1	0,015			0,014	12-230		<10
Bosch Sensortec	BM1055	3gyro+3acc	±125	0,004	16			±1				0,014	8-1000		<10
SDI	SD1500-AB00	3gyro+3acc	±1000			<0,02		0,0028		1			75	0,02	

5 METODY TESTOVÁNÍ INERCIÁLNÍCH SNÍMAČŮ

Správné vyhodnocení testu inerciálních senzorů je potřeba pro rozhodnutí o jejich vhodnosti použití pro danou aplikaci, neboli je potřeba ověřit, jestli senzory splňují požadované parametry. Metody testování a kalibrace by kromě typu aplikace měly počítat s vlastnostmi prostředí, ve kterém budou měřené senzory provozovány, jako jsou např. vibrace a rázy.

Výstupní signál ze snímače lze popsat matematickými výrazy, přesněji rovnicí, vyjadřující výstupní signál jako matematický výraz složený z částí reprezentujících deterministické (systematické) a stochastické procesy. Správným vyhodnocením měření, lze získat koeficienty (parametry) rovnice a modelovat výstup gyroskopu či akcelerometru, na základě zjištěných parametrů. Popisem vytvoření modelu se zabývá následující kapitola 6. Modelování a kalibrace inerciálních snímačů. V následující kapitole jsou přiblíženy základní způsoby zjišťování relevantních parametrů senzoru. V relaci na měření parametrů senzoru je potřeba si uvědomit, že výrobce testuje celé série vyrobených snímačů a uváděné parametry představují průměrné hodnoty z jednotlivých měření, tudíž se parametry jednotlivých kusů mohou lišit, proto je potřeba provést testování a kalibraci, a to i v případě, pokud má senzor již vnitřní kalibraci.

5.1 Metody testování gyroskopů

5.1.1 Statické testy stability – multi poziční testy

Pomocí tohoto typu testů lze vyhodnotit driftы výstupního signálu gyroskopu, a to konkrétně *run-to run (switch-on to switch-on)* a *in-run drift* [3]. Základní myšlenkou testu je proměření výstupního signálu gyroskopu při různé orientaci os gyroskopu vzhledem ke geografickým osám a místnímu vektoru gravitačního pole. Pro přesnější nastavení pozice os gyroskopu do požadované polohy se využívají polohovací stolky, přesněji stabilizované závěsné systémy (6osé), s možností nastavení úhlu natočení v jednotlivých rovinách závěsu a vibračním oddělením od okolního prostředí.

Samotný test gyroskopu se provádí při daném teplotním rozmezí a v jedné z předem definovaných pozic gyroskopu, které na příkladu dvouosého gyroskopu demonstruje

Tabulka 5.1, kde je uvedeno 8 základních pozic os gyroskopu (je možno až 12) a vliv přirozeně se vyskytujících přírodních sil, konkrétně gravitačního zrychlení g a zemské rotace Ω . Po zapnutí gyroskopu je potřeba počkat určitý čas, než se začne výstupní signál zaznamenávat. To se provádí z důvodu vyrovnaní teploty, která se ustálí okolo dané hodnoty až po určitém čase. Poté je gyroskop opět vypnut a znovu se čeká na vyrovnaní teploty a následně se celý proces opakuje znovu. Počet a délka měření se odvíjí od požadované přesnosti testu, která lze určit statistickými pravidly pro stupeň přesnosti [17]. Se zvyšující se kvalitou senzoru se používají delší časy měření. Po dokončení série zapnutí a vypnutí pro dané nastavení os, se nastaví nová orientace a celá série měření se opakuje. Od naměřených dat je možné odečíst vliv různých systematických chyb a vliv rotace Země, poté je pro jednotlivé naměřené série dat zjišťována střední hodnota a rozptyl.

Parametr *run-to-run stability* [16], neboli opakovatelnost výstupu gyroskopu je vypočten jako rozptyl středních hodnot výstupu gyroskopu z jednotlivých sérií testů, kdy gravitační vektor nepůsobil na citlivou osu gyroskopu.

Parametr *in-run stability* [16], neboli stabilita výstupu gyroskopu v jednom daném zapnutí je obtížněji zjištělná, poněvadž se do výstupu projevuje více faktorů, nicméně se vyhodnocuje jako rozptyl jednotlivých hodnot výstupu gyroskopu (od prům. hodnoty) v každé sérii dat. Takto zjištěné hodnoty se mohou dále zprůměrovat přes všechny naměřené série, je však potřeba dbát na to, aby zahrnovaná data nebyla zatížena neznámými anomáliemi.

Tabulka 5.1 Nastavení os gyroskopu pro testy stability [3]

Pozice	Orientace os		Působení g		Působení zemské rotace	
	1. osa	2. osa	1. osa	2. osa	1. osa	2. osa
1	S	Z	0	0	$\Omega \cdot \cos L$	0
2	Z	J	0	0	0	$-\Omega \cdot \cos L$
3	J	V	0	0	$-\Omega \cdot \cos L$	0
4	V	S	0	0	0	$\Omega \cdot \cos L$
5	V	Dolů	0	-1	0	$-\Omega \cdot \sin L$
6	Nahoru	V	+1	0	$\Omega \cdot \sin L$	0
7	Z	Nahoru	0	+1	0	$\Omega \cdot \sin L$
8	Dolů	Z	-1	0	$-\Omega \cdot \sin L$	0

V tabulce jsou uvedeny tyto zkratky:

S.....sever

J.....jih

V.....východ

Z.....západ

ggravitační zrychlení ($1g = 9.81 \text{ ms}^{-2}$)

Ωrychlost rotace Země ($15,041 \text{ }^\circ/\text{h}$)

$\Omega \cdot \cos L$horizontální složka zemské rotace

$\Omega \cdot \sin L$vertikální složka zemské rotace

Na základě působení uvedených sil je možno s přihlédnutím na úroveň šumu gyroskopu zjistit ze série testů vliv gravitačního zrychlení na drift výstupu gyroskopu tzv. *g-dependent drift* a to poměrně jednoduše (rovnice 5.1 a 5.2) porovnáním středních hodnot výstupu gyroskopu pro případ, kdy je citlivá osa gyroskopu kolmo na vektor gravitačního zrychlení se stavem, kdy je rovnoběžně, poté lze za předpokladu odečtení, či zanedbání (podle přesnosti gyroskopu) vlivu zemské rotace psát [3]:

$$\omega_o = B_f + B_{gx}a_x + B_{gy}a_y + B_{gz}a_z \quad (5.1)$$

, kde výstup gyroskopu ω_o je vyjádřen jako součet driftu gyroskopu nezávislého na gravitačním zrychlení B_f (*g-independent drift*) a driftu závislého na gravitačním zrychlení, reprezentovaného koeficienty B_{gx}, B_{gy}, B_{gz} násobenými jednotlivými akceleracemi a_x, a_y, a_z v dané ose (složky vektoru gravitačního zrychlení).

Pokud se vezme v úvahu pouze jedna osa gyroskopu (x), a jsou provedena dvě měření (m_1 a m_2) s osou gyroskopu rovnoběžně směřující ve směru a proti směru gravitačního zrychlení, lze psát:

$$\begin{array}{ll} \text{osa nahoru} & m_1 = B_f + B_{gx}g \\ \text{osa dolu} & m_2 = B_f - B_{gx}g \end{array} \quad (5.2)$$

Z rovnice 5.2 jde poté jednoduše vypočítat jak koeficient B_f , tak B_{gx} :

$$\begin{aligned} B_f &= \frac{m_1 + m_2}{2} \\ B_{gx} &= \frac{m_1 - m_2}{2g} \end{aligned} \quad (5.3)$$

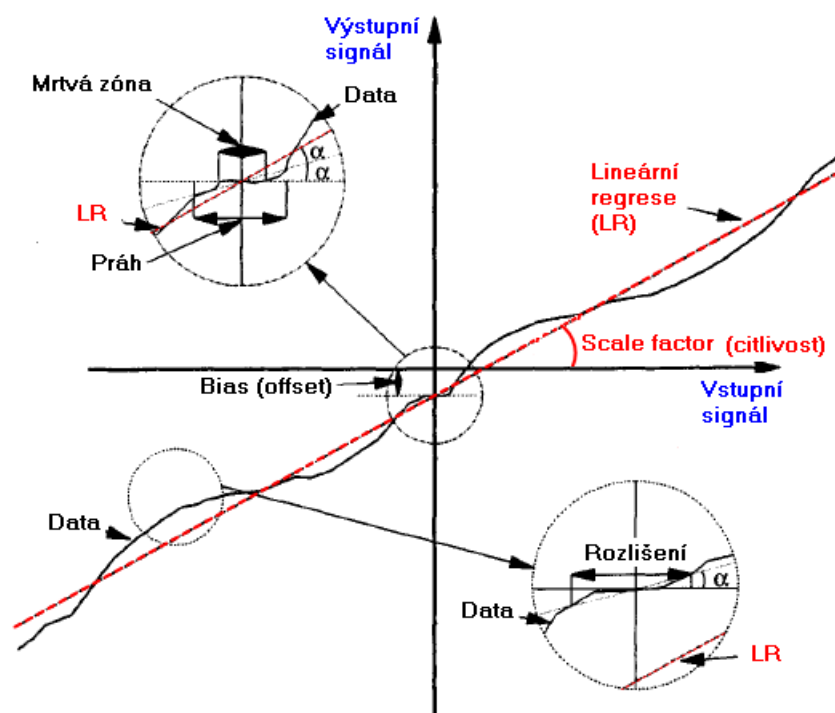
Obdobně lze postupovat pro zjištění parametrů i u dalších os gyroskopu, v případě víceosého senzoru.

5.1.2 Dynamické rotační testy

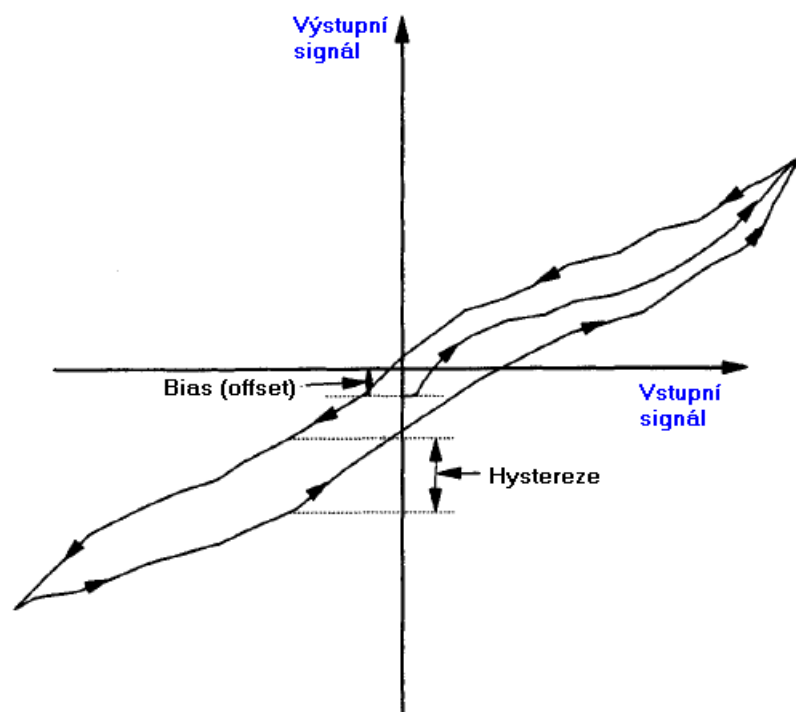
Význam těchto testů je především vyšetřit různé charakteristiky citlivosti (*scale factoru*) gyroskopu, která vyjadřuje vztah výstupního signálu ke vstupní rotaci a maximální a minimální úhlovou rychlost, kterou je gyroskop schopný měřit. Grafické znázornění citlivosti reprezentují obrázky Obr. 5.1 a Obr. 5.2, tyto diagramy také znázorňují, jak jsou definovány pojmy *mrtvá zóna*, *práh*, *rozlišení* a citlivost (*scale factor*).

V testech tohoto typu jsou vyhodnocovány tyto charakteristiky citlivosti:

- Střední hodnota a rozptyl
- Nelinearita neboli změna střední hodnoty se změnou rychlosti rotace
- Změny střední hodnoty se změnou okolní teploty
- Hystereze výstupu gyroskopu



Obr. 5.1 Graf citlivosti gyroskopu bez hystereze [3]



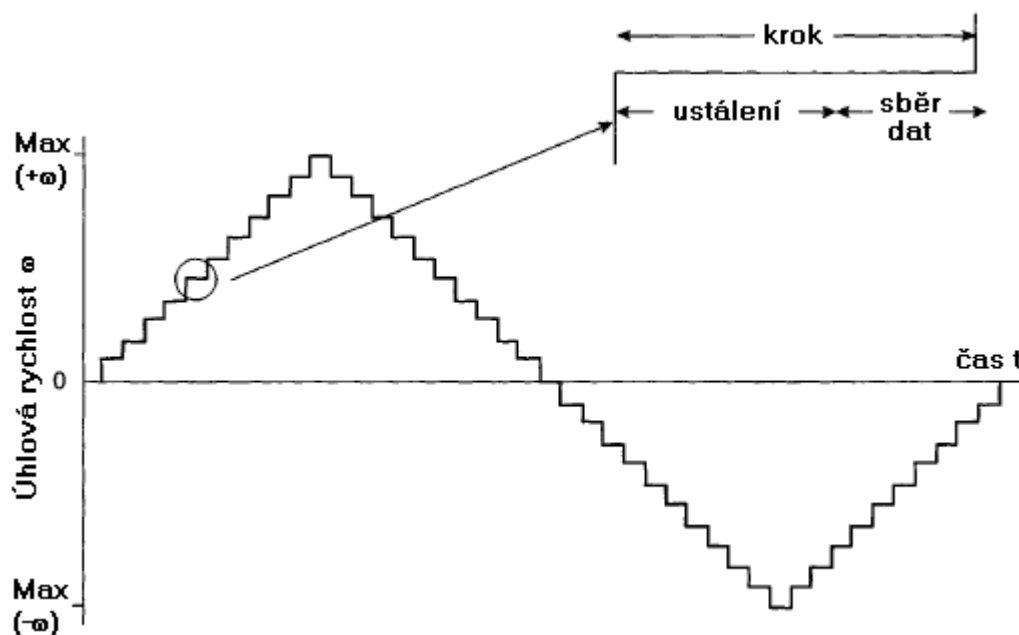
Obr. 5.2 Graf citlivosti gyroskopu s efektem hystereze [3]

V případě dvouosého gyroskopu lze do těchto testů zahrnout i stanovení ortogonality citlivých os gyroskopu, kdy je při měření jedna z os vždy paralelně a druhá svírá s osou rotace pravý úhel.

Pro rotační testy je nutné mít potřebné vybavení v podobě přesného rotačního stolku (nejlépe s teplotní komorou pro udržení konstantní teploty), na kterém je možno nastavovat požadované úhlové rychlosti. Současní výrobci nabízí stolky s rychlostmi v rozsahu 0 až 3000 °/s. Pokud má rotační stolek i teplotní komoru, lze provést i testy závislosti výstupu gyroskopu na teplotě, tyto přibližuje podkapitola 5.3. Během testu je gyroskop pevně upevněn na talíři rotačního stolku s citlivou osou paralelně na osu rotace (nemusí být nutně umístěn koaxiálně). Rotační stolek je použitelný více způsoby, ale základní princip spočívá v porovnání působící úhlové rychlosti dané rotačním stolem a změřené úhlové rychlosti z gyroskopu. Nejčastější příklady (metody) způsobu použití rotačního stolku jsou:

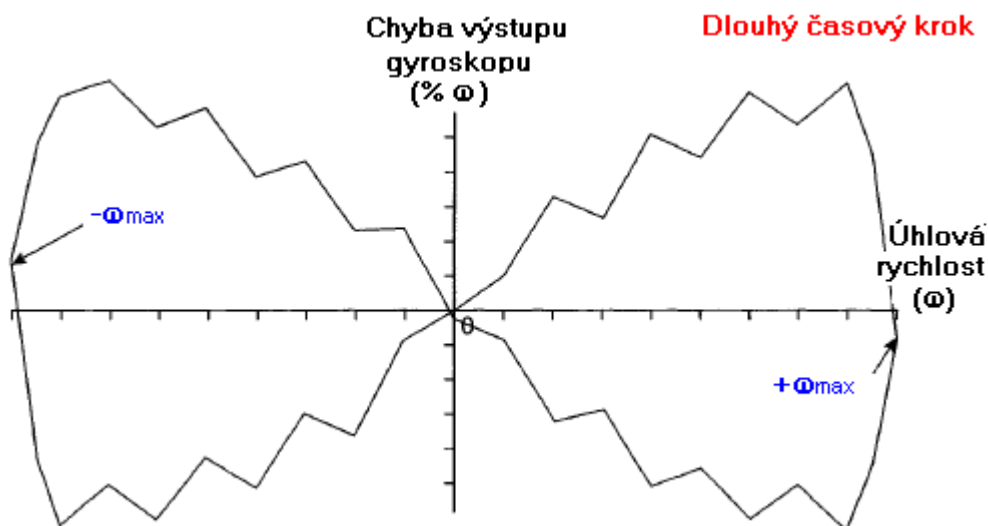
1. Rotační test

Během typického testového plánu je úhlová rychlost rotačního stolku postupně nastavována (od nuly) v sérii kroků, kdy jsou v každém kroku zaznamenána data. Před zaznamenáním výstupního signálu gyroskopu se v každém kroku nechává působit konstantní úhlová rychlost po daný počet period, aby se umožnilo ustálení výstupního signálu gyroskopu. Působící úhlová rychlost se inkrementálně nastavuje v jednotlivých krocích mezi požadovanými krajními hodnotami (viz. Obr. 5.3). V každém kroku je signál z gyroskopu zaznamenán, při působení konstantní úhlové rychlosti ω .



Obr. 5.3 Kroková sekvence měření na rotačním stolku [3]

Tato forma testu umožňuje cyklickou změnou působící úhlové rychlosti přes očekávaný rozsah senzoru sledovat efekty hystereze citlivosti senzoru, občas označované jako motýlkový efekt, díky tvaru grafu vynesené závislosti chyby výstupu gyroskopu na působící úhlové rychlosti, jak ukazuje obrázek Obr. 5.4



Obr. 5.4 Příklad výstupu rotačního testu [3]

2. Rychlý rotační test

Tato metoda je variací výše uvedeného postupu s rozdílem v tom, že sekvence kroků od minima do maxima pro oba směry úhlové rotace je provedena o poznání rychleji, kdy délka jednoho kroku je v řádu stovek milisekund (nejkratší možná doba pro stabilizaci výstupního signálu a následné zaznamenání). Časově přesný sběr dat je pro tento typ testu klíčový, proto je nutné jej koordinovat pomocí řídicího počítače. Typická výstupní data znázorňuje závislost na Obr. 5.5.



Obr. 5.5 Příklad výstupu rychlého rotačního testu [3]

Tento typ rotačního testu je často používán pro vyhodnocení gyroskopů naváděných raket, kdy doba trvání testu t odpovídá době letu zařízení. Za určitých podmínek může být kompletní test hotov v řádu desítek sekund [3].

3. Přesný rotační test

Jednoduchý test pro velmi přesné gyroskopy, které dosahují stejné, či vyšší přesnosti než samotný rotační stolek. Vylepšení spočívá pouze v tom, že otáčky jsou snímány přesným externím optickým snímačem, který má vyšší rozlišovací schopnost, než přesnost vlastního stolku. Samotný test probíhá při jedné konkrétní nastavené úhlové rychlosti.

Pomocí všech výše uvedených testů lze vyšetřit i ortogonalitu víceosého gyroskopu, postačí v průběhu testů ukládat i hodnoty s ostatních vstupních os gyroskopu, které svírají při měření s osou rotace pravý úhel. Po kalibraci systematických chyb takto získaných dat, bude zbytkový signál odpovídat náhodnému šumu a vlivu chyb ortogonality. Chyby ortogonality je možné vyšetřit pomocí metody uvedené v následující podkapitole.

Data získaná z rotačních testů jsou běžně analyzována porovnáním výstupního signálu gyroskopu s odpovídající úhlovou rychlostí rotačního stolku, měřenou například tachogenerátorem uvnitř rotačního stolku. Takovéto porovnání je provedeno pro všechna data testovací sekvence a výsledná závislost měřené rychlosti na skutečné je proložena přímkou, například metodou nejmenších čtverců. Gradient vzniklé přímky je označován jako *scale factor* neboli citlivost gyroskopu (viz. Obr. 5.1). Vzhledem ke skutečnosti, že závislost nemusí být vždy lineární v celém rozsahu, jsou data aproximována křivkou, která je matematicky reprezentována polynomicou rovnicí, jejíž koeficienty definují citlivost a nelinearitu gyroskopu [3]. Typické grafy závislosti zpracovaných dat (tzv. vstupně výstupní charakteristiky), které znázorňují odchylky od ideálně lineární závislosti, jsou uvedeny na obrázcích Obr. 5.4 a Obr. 5.5. Zjednodušeně řečeno, tyto grafy znázorňují závislost chyby výstupu gyroskopu na působící úhlové rychlosti. Při použití dlouhého časového kroku dosáhnou díky dostatečně dlouhému času některé procesy ustálení, obzvláště teplotní vlivy [1].

5.1.3 Dynamické multi poziční testy

Jedná se o kombinaci dvou výše uvedených postupů testování. Gyroskop je podle počtu citlivých os nastaven do odpovídajícího počtu poloh vzhledem k ose rotace (1osý – 2 polohy, 2osý – 4 polohy, 3osý 6 poloh) a poté je roztočením rotačního stolku vystaven působení nastavené úhlové rychlosti. U přesných gyroskopů se dá využít jen samotné zemské rotace a rotační stolek není potřeba.

Jednou z nejčastěji používaných metod je multi poziční test [3]. Na příkladu 3osého gyroskopu jde o 6polohový test, kdy jsou jednotlivé citlivé osy gyroskopu postupně nastaveny ve směru a proti směru působící rotace. Podobným způsobem jako uvádí kapitola 5.1, lze poté vyčíslit dle vztahu 5.4 *bias* (*offset*) gyroskopu, a také citlivost gyroskopu (*scale factor*), dle vztahu 5.5 [1]:

$$b = \frac{l_{\omega L} + l_{\omega R}}{2} \quad (5.4)$$

$$S = \frac{l_{\omega L} - l_{\omega R} - 2 \times K}{2 \times K} \quad (5.5)$$

kde b je *bias* gyroskopu, $l_{\omega L}$ je měření v levotočivém směru, $l_{\omega R}$ je měření v pravotočivém směru, S je citlivost, K představuje známý referenční signál, tj. rotace Země na dané zeměpisné šířce, nebo úhlová rychlost rotace stolku. Rotaci Země lze jako samostatný zdroj působící úhlové rychlosti použít pouze v případě, pokud samotná úroveň šumu senzoru nezakrývá vliv zemské rotace ve výstupním signálu. Tímto způsobem, ač jednoduchým a efektivním, nelze odhadnout vzájemné odchylky od ortogonality os gyroskopu.

Pro odhad chyb ortogonality se u 3osého senzoru používá tzv. vylepšený 6poziční test, který počítá se všemi třemi typy chyb (*bias*, *scale factor*, ortogonalita). Výstup 3osého senzoru může být reprezentován v maticové formě například takto[1]:

$$\begin{bmatrix} l_{\omega x} \\ l_{\omega y} \\ l_{\omega z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{xx} & m_{xy} & m_{xz} \\ m_{yx} & m_{yy} & m_{yz} \\ m_{zx} & m_{zy} & m_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{\omega x} \\ b_{\omega y} \\ b_{\omega z} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$\begin{bmatrix} l_{\omega x} \\ l_{\omega y} \\ l_{\omega z} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} m_{xx} & m_{xy} & m_{xz} \\ m_{yx} & m_{yy} & m_{yz} \\ m_{zx} & m_{zy} & m_{zz} \end{bmatrix}}_M \underbrace{\begin{bmatrix} b_{\omega x} \\ b_{\omega y} \\ b_{\omega z} \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \\ 1 \end{bmatrix}}_{\omega}$$

, kde elementy m reprezentují na hlavní diagonále matice M citlivosti a mimo hlavní diagonálu odchylky od ortogonality a b jsou jednotlivé offsety (*bias*) v daných osách. Nastavováním 3osého senzoru standardní 6poziční metodou lze ideálně jednotlivé výstupy gyroskopu popsat jako:

$$\omega_1 = \begin{bmatrix} \omega \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \omega_2 = \begin{bmatrix} -\omega \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \omega_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \omega_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \omega_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega \end{bmatrix}, \quad \omega_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\omega \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Poskládáním jednotlivých komponentů z rovnice 5.7 do matice regresních proměnných (W) pro metodu nejmenších čtverců, dostane tato matice formu:

$$W = \begin{pmatrix} \omega_1 & \omega_2 & \omega_3 & \omega_4 & \omega_5 & \omega_6 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

Výstup senzoru (matice známých parametrů) v jednotkách V, nebo LSB/°/s, představuje matice O :

$$O = [o_1 \quad o_2 \quad o_3 \quad o_4 \quad o_5 \quad o_6] \quad (5.9)$$

$$\text{, kde } o_1 = \begin{bmatrix} l_{\omega x} \\ l_{\omega y} \\ l_{\omega z} \end{bmatrix}_{\text{osa } X \text{ rotace } \omega L}, \quad o_2 = \begin{bmatrix} l_{\omega x} \\ l_{\omega y} \\ l_{\omega z} \end{bmatrix}_{\text{osa } X \text{ rotace } \omega R}, \quad o_3 = \begin{bmatrix} l_{\omega x} \\ l_{\omega y} \\ l_{\omega z} \end{bmatrix}_{\text{osa } Y \text{ rotace } \omega L} \quad \text{atd.}$$

Cílem je získat jednotlivé komponenty matice M (vztah 5.6), toho lze docílit, pomocí již zmíněné, metody nejmenších čtverců následovně:

$$M = O \times W^T \times (W W^T)^{-1} \quad (5.10)$$

Použitím výše uvedených postupů ve spojení s rotačními testy (kap. 5.1.2), lze postihnout téměř všechny základní podstatné chyby vyskytující se u inerciálních snímačů [1].

5.2 Metody testování akcelerometrů

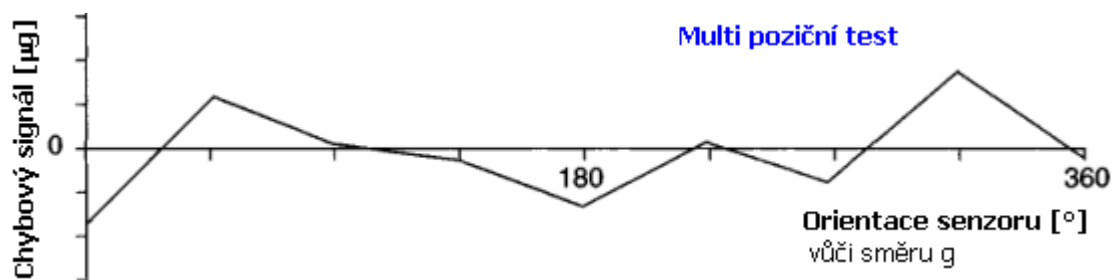
Ač akcelerometry snímají na rozdíl od gyroskopů lineární zrychlení, principy statických testů jsou stejné, jako platí pro gyroskopy, tudíž lze metody uvedené pro testování gyroskopů s malými úpravami aplikovat i na testování akcelerometrů. Pro dynamické testy je však nutné zvolit rozdílné prostředky (vibrační stolky). Pro testování akcelerometrů však existuje v našem prostředí nesporná výhoda v podobě působící gravitační síly, jejíž hodnota $1g$ může být využita jako reference při testování. Pro testování gyroskopů by šla obdobně využít působící rotace země, hodnota úhlové rychlosti je však velmi nízká a za hranici rozlišení, či šumu u většiny MEMS zařízení nižší a střední třídy, tudíž se nehodí jako reference.

5.2.1 Multi-poziční testy

Pro tyto testy je také účelná Tabulka 5.1, která znázorňuje mimo jiné působení gravitačního zrychlení g pro danou orientaci senzoru. Účelem těchto testů je určit následující parametry akcelerometru[3]:

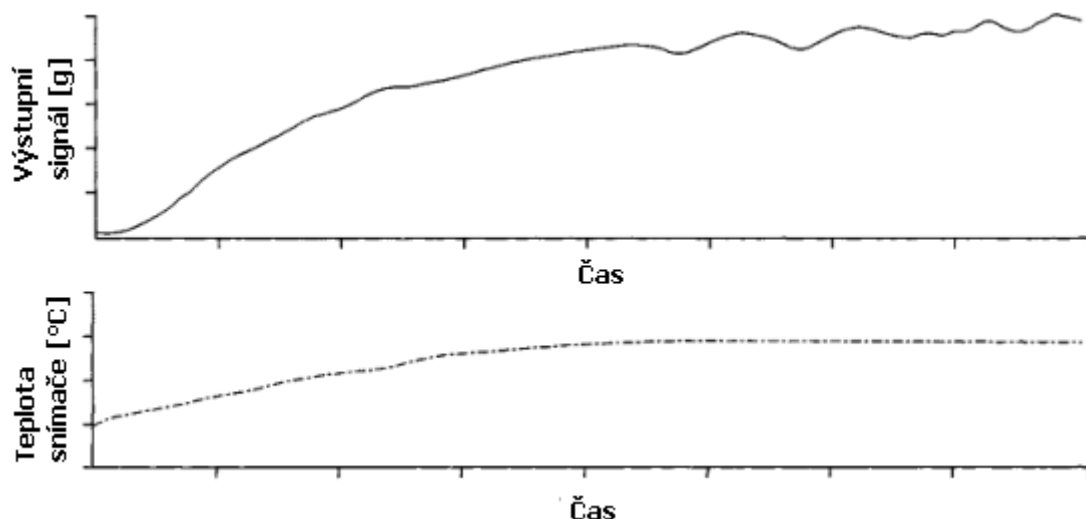
- citlivost
- nelinearitu citlivosti
- bias (nula)
- chybu ortogonalitu
- opakovatelnost nuly

Pro provedení multi pozičního testu je potřeba akcelerometr upevnit na polohovací mechanismus, kdy přesnost změřených výsledků je přímo úměrná přesnosti upevnění a přesností polohovacího mechanismu. Obecně jsou výstupní signály z takto upevněného akcelerometru zaznamenány pro čtyři rozdílná natočení citlivé osy snímače, tak aby na inkriminovanou osu postupně působilo gravitační zrychlení $0g$, $1g$, $0g$, $-1g$, je však možno zvolit i další natočení, například 45° , kdy na danou osu působí $0,5g$. Pro každé nastavení citlivé osy jsou data postupně zaznamenána a celý test se může opakovat pro zvýšení přesnosti. Z takto naměřených dat se poté vyhodnotí parametry uvedené ve výčtu výše. Typická data z tohoto testu znázorňuje Obr. 5.6, kde chybový signál představuje rozdíl mezi skutečnou a změřenou hodnotou působícího zrychlení.



Obr. 5.6 Příklad výstupu z osmi pozičního testu[3]

V případě vyhodnocení opakovatelnosti (*switch-on to switch-on, run to run*) je výstup akcelerometru zaznamenán pro danou pozici snímače alespoň dvanáctkrát, celá procedura se opakuje pro všechny pozice, které mají být v testu vyhodnoceny. Příklad dat z jednoho záznamu na dané pozici ukazuje Obr. 5.7, kde je vidět i změna teploty při náběhu snímače, kterou je vhodné také zaznamenat.



Obr. 5.7 Příklad výstupu z testu opakovatelnosti [3]

Pro vyhodnocení parametrů z pozičního testu lze použít vztahy uvedené v podkapitole 5.1.3 Dynamické multi poziční testy, pro názornost jsou zde přepsány pro akcelerometry:

$$b = \frac{l_{g+} + l_{g-}}{2} \quad (5.11)$$

$$S = \frac{l_{g+} - l_{g-} - 2 \times K}{2 \times K} \quad (5.12)$$

$$\begin{bmatrix} l_{ax} \\ l_{ay} \\ l_{az} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} m_{xx} & m_{xy} & m_{xz} & b_{ax} \\ m_{yx} & m_{yy} & m_{yz} & b_{ay} \\ m_{zx} & m_{zy} & m_{zz} & b_{az} \end{bmatrix}}_M \underbrace{\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \\ 1 \end{bmatrix}}_a \quad (5.13)$$

$$a_1 = \begin{bmatrix} g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad a_2 = \begin{bmatrix} -g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad a_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ g \\ 0 \end{bmatrix}, \quad a_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ -g \\ 0 \end{bmatrix}, \quad a_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}, \quad a_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

$$A = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.15)$$

$$O = [o_1 \quad o_2 \quad o_3 \quad o_4 \quad o_5 \quad o_6] \quad (5.16)$$

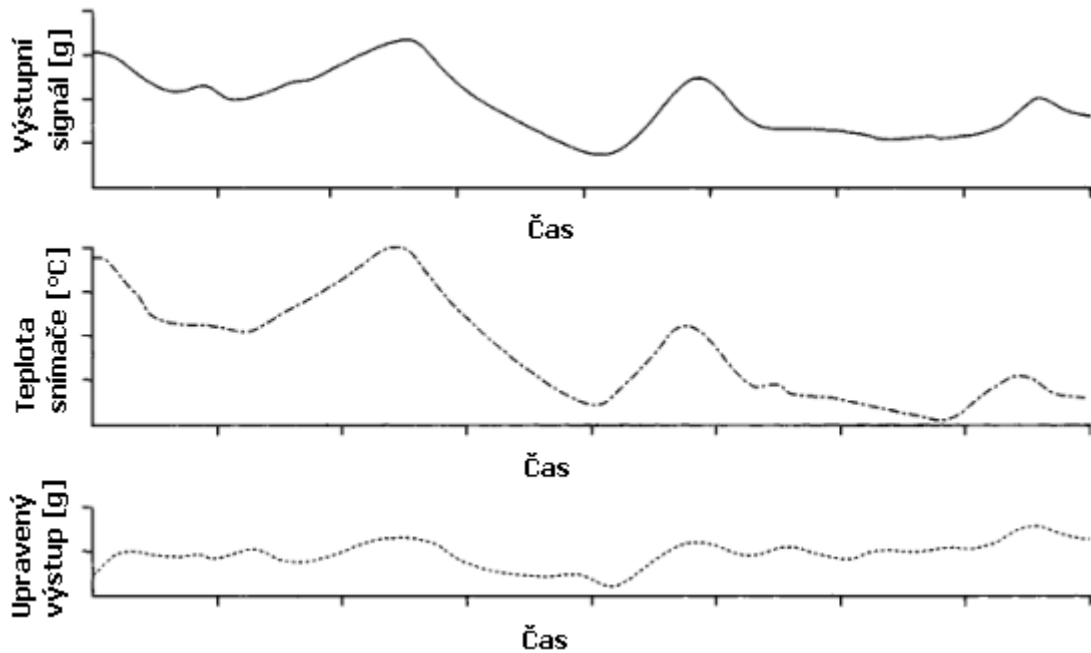
$$\text{, kde } o_1 = \begin{bmatrix} l_{ax} \\ l_{ay} \\ l_{az} \end{bmatrix}_{\text{osa X nahoru } g+}, \quad o_2 = \begin{bmatrix} l_{ax} \\ l_{ay} \\ l_{az} \end{bmatrix}_{\text{osa X dolu } g-}, \quad o_3 = \begin{bmatrix} l_{ax} \\ l_{ay} \\ l_{az} \end{bmatrix}_{\text{osa Y nahoru } g+} \quad \text{atd.}$$

$$M = O \times A^T \times (AA^T)^{-1} \quad (5.17)$$

Význam a popis symbolů v rovnicích je totožný s významem pro gyroskopy s tím rozdílem, že výstupní hodnoty senzoru nerepresentují úhlovou rychlost, ale působící lineární zrychlení a v daném směru x, y, z a také známý referenční signál K je v tomto případě působící zrychlení.

5.2.2 Testy dlouhodobé stability

Multi poziční test se provádí většinou za konstantní teploty okolí, díky krátkodobé povaze jednotlivých měření není zaznamenávání a následná korekce výstupu podle teploty tak podstatná jako u testu dlouhodobé stability, které mohou trvat v rozmezí od několika hodin do několika týdnů.



Obr. 5.8 Příklad výstupu z testu dlouhodobé stability [3]

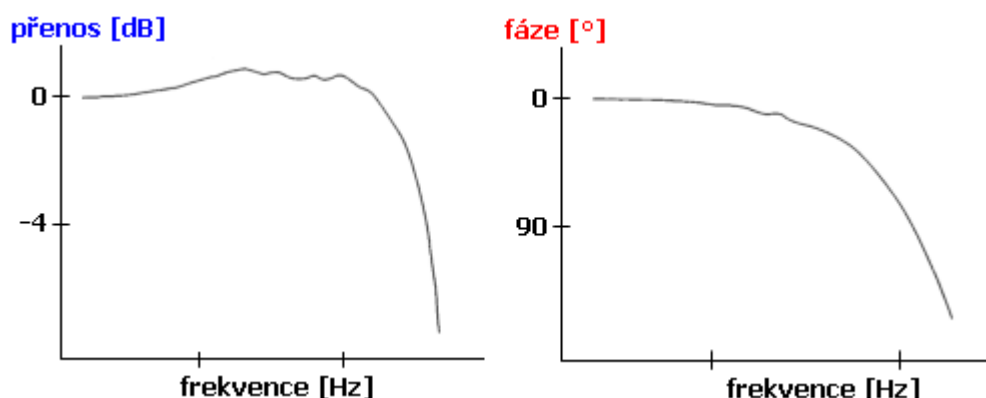
Tento test je velmi podobný testu opakovatelnosti s tím rozdílem že probíhá, jak již název napovídá, dlouhou dobu. Akcelerometr je vždy na určitou dobu vypnut, než se spustí měření pro další orientaci snímače. Pro každou pozici je zaznamenávána i teplota, pomocí které může být výstupní signál upraven (viz Obr. 5.8).

5.2.3 Vibrační testy

Tyto testy jsou díky své povaze prováděny až jako poslední v řadě z testů prováděných na inerciálních snímačích, jelikož zde hrozí nebezpečí permanentního poškození senzorů. Musí se počítat s výskytem rezonancí celé struktury, které mohou působící akceleraci zesilovat, proto je vhodné pečlivé prozkoumání rezonančních vlastností nosníku, či struktury, na které bude akcelerometr upevněn ještě před samotným měřením. Z vibračních testů je možno např. vyhodnotit [3]:

- výskyt rezonančních frekvencí
- frekvenční charakteristiku
- odolnost zařízení vůči vibračním prostředí
- odhad změny šumových charakteristik při působení vibrací

Pro provedení vibračních testů je za potřebí vibrační stůl, který bude simulovat různé vibrace prostředí, či zrychlení působící na akcelerometr. Stůl, jak je nazývána plocha pro upevnění akcelerometru, je rozmítán v přesně definované ose, za pomoci elektromagnetu napájeného proudem odpovídajícím požadované výstupní frekvenci a tvaru vlny. Vibrační stůl může oscilovat vertikálně, nebo může být upevněn pod pravým úhlem a oscilovat horizontálně. Zde je taky potřeba zdůraznit vliv přesnosti upevnění jednotlivých komponent na celkový výsledek měření. Pomocí testovacího stolku mohou být aplikovány dva typy pohybu, a to buď sinusové vibrace, nebo náhodné vibrace. V prvním případě je stůl sinusově rozmítán na různých frekvencích v daném frekvenčním pásmu bez překročení zadané mezní úrovně akcelerace, z čehož lze následně při znalosti skutečné působící akcelerace zjistit frekvenční odezvu snímače, kde přenos je spočítán jako podíl mezi skutečnou a změřenou akcelerací (viz Obr. 5.9). V případě druhém jde o aplikaci náhodných vibrací v zadaném frekvenčním pásmu a zadané výkonové spektrální hustotě, pomocí tohoto testu je možno následně vyhodnotit vliv vibrací prostředí na šumové charakteristiky snímače.



Obr. 5.9 Příklad frekvenční charakteristiky akcelerometru

Aby bylo možné daná měření patřičně vyhodnotit, je nutné mít informaci o skutečném působícím zrychlení, tuto informaci je možno získat za pomoci kalibrovaného akcelerometru na rozmítané ose, či pomocí interferometru. Při použití

vibračního stolu mohou být také potřeba stínící cívky, poněvadž elektromagnet vibračního stolku může generovat silné magnetické pole, které by mohlo ovlivnit výstup snímače. Záleží však na citlivosti snímače na působící magnetické pole. Testy na magnetickou citlivost lze provádět pomocí Helmholtzových cívek generujících magnetické pole působící na danou osu snímače (podrobněji kapitola 8. v [3]).

5.3 Teplotní testy

Změnu parametrů gyroskopu či akcelerometru při změně okolní teploty lze pozorovat za pomoci teplotní, či klimatické komory. Rozdíl mezi teplotní a klimatickou komorou je v možnosti klimatické komory regulovat kromě teploty i vlhkost, která výrazně ovlivňuje přenos tepelné energie. Díky definované změně teploty je možno zjistit závislost jednotlivých parametrů senzoru na teplotě. Rozsah teplot, které je možno v teplotní komoře nastavovat se většinou pohybuje v takovém rozmezí, aby pokryl i s rezervou teplotní rozsah senzorů pro průmyslové účely, např. -65 až 180 °C.

Metody testování uvedené výše, které to svou podstatou umožňují, je možno provádět opakovaně v teplotní komoře a tím dosáhnout zjištění závislosti daného parametru na teplotě. V zásadě existují dva základní typy teplotních testů, jeden čeká na ustálení teploty gyroskopu (a až následně se nastaví další teplota), druhý využívá kontrolovaný nárůst či sestup teploty za daný čas (teplotní skok přes daný rozsah). V anglické literatuře lze tyto testy nalézt pod označením *soak test* a *ramp test* [3].

5.4 Shrnutí

V kapitole jsou uvedeny základní metody testování gyroskopů a akcelerometrů, pro provedení uvedených testů je potřeba speciálního vybavení v podobě přesných polohovacích mechanismů, teplotních komor a rotačních resp. vibračních stolků, kde lze s určitou přesností nastavit požadovanou úhlovou rychlost resp. zrychlení. Další testy, které je možno provádět, jsou popsány blíže v [3] a ve standardu pro testování vibračních gyroskopů [18] a ve standardu pro testování lineárních akcelerometrů [19]. Jsou to např. oscilační rotační testy, testy na magnetickou citlivost, testy s centrifugou, rázové testy, modifikované vibrační testy, kombinace uvedených testů.

Snímače mohou být díky datům z těchto testů vhodně kalibrovány, či modelovány. Získané hodnoty parametrů a jejich závislosti na vnějších vlivech, je možno využít k online kalibraci snímače, např. teplotní kompenzace za předpokladu, že je k dispozici teplotní senzor, nebo k tvorbě modelu výstupu gyroskopu. V obou případech je nutno počítat s přítomností šumu a jeho vlivu na výstup snímače. Metodami analýzy působícího šumu a jeho modelování se dále zabývá kapitola 6.

6 MODELOVÁNÍ A KALIBRACE INERCIÁLNÍCH SNÍMAČŮ

Jak již bylo zmíněno dříve, na základě zjištěných parametrů z provedených testů lze vytvořit model snímače, který může sloužit pro simulaci chování senzoru, při různých vstupních hodnotách, nebo lze výstup senzoru díky zjištěným parametrům kalibrovat, pro přesnější hodnoty výstupu. Tyto úlohy je možno považovat za inverzní, kdy jednou jsou zjištěnými koeficienty upravovány skutečné působící síly (modelování) a podruhé výstup snímače (kalibrace). Zjištěné parametry či chyby lze rozdělit na systematické a stochastické, kdy však nelze označit jeden parametr za čistě systematický, jelikož obsahuje systematickou i stochastickou část, např. *bias* a *scale factor*. Model nemůže být nikdy dokonalý, ale může výstup snímače lépe či hůře aproximovat, takovýto model je uveden v podkapitole 6.1 (Model výstupu snímače). Je však potřeba analyzovat i náhodné procesy snímače či šum, který má majoritní vliv na přesnost snímače. Pro určení vyskytujícího se šumu je možno využít metod spektrální analýzy, nebo Allanovy odchylky, které jsou popsány v podkapitole 6.2.

6.1 Model výstupu snímače

Model výstupu snímače se odvíjí od počtu zjištěných nebo známých parametrů, které je možno do něj zahrnout, různé zdroje popisují různě rozsáhlé modely. Výstup snímače se skládá kromě měřené veličiny, také z nechtěných systematických i náhodných komponent, jak ukazuje následující vzorec [27]:

$$y = x + (b_{cons} + b_{rand}) + (S_{cons} + S_{rand}) \cdot x + N \cdot x + \varepsilon(x) \quad (6.1)$$

, kde

y	výstup snímače	[m/s ²], nebo [°/s]
x	vstupní veličina	[m/s ²], nebo [°/s]
b_{cons}, b_{rand}	bias - konstantní, náhodný	[m/s ²], nebo [°/s]
S_{cons}, S_{rand}	chyba citlivosti - konst., náhodná	[ppm, nebo %]
N	neortogonalita	[ppm, nebo %]
$\varepsilon(x)$	šum	[m/s ²], nebo [°/s]

Podle toho zda se jedná o gyroskop, nebo akcelerometr jsou jednotky jednotlivých parametrů buď $[m/s^2]$, nebo $[^\circ/s]$. Obdobně je výstup snímače popsán v [3], v tomto případě je však pro gyroskop přidána citlivost nuly na lineární akceleraci a rozepsána neortogonalita vzhledem k jednotlivým osám (pro případ 3osého snímače):

$$\varpi_x = \omega_x + (b_{cons} + b_{rand}) + (S_{cons} + S_{rand}) \cdot \omega_x + N_y \cdot \omega_y + N_z \cdot \omega_z + b_{gy} \cdot a_y + b_{gz} \cdot a_z + \varepsilon_x \quad (6.2)$$

Pro odlišení systematické a náhodné části lze náhodné parametry zahrnout do šumu, který může být eliminován vhodnými filtračními metodami v navigačním algoritmu a bude zkoumán pomocí metod uvedených v následující podkapitole. Systematický model lze poté pro gyroskop zjednodušit na:

$$\tilde{\omega}_x = (1 + S_x) \cdot \omega_x + b + N_y \cdot \omega_y + N_z \cdot \omega_z + b_{gy} \cdot a_y + b_{gz} \cdot a_z + \varepsilon_x \quad (6.3)$$

, kde $\tilde{\omega}_x$ je měřená úhlová rychlost, S_x vyjadřuje chybu citlivosti, která může být vyjádřena i jako polynom v případě výskytu nelinearity citlivosti, ω_x je skutečná úhlová rychlost působící na citlivou osu, b reprezentuje nulu (*bias*). Koeficienty N_y, N_z vyjadřují vazbu mezi osami a b_{gy}, b_{gz} citlivost nuly na akceleraci v daných osách, na které působí zrychlení a_y, a_z . Poslední proměnná ε_x reprezentuje šum.

A obdobně pro akcelerometr, kde se již neuvažuje citlivost nuly na lineární akceleraci jako u gyroskopu:

$$\tilde{a}_x = (1 + S_x) \cdot a_x + b + N_y \cdot a_y + N_z \cdot a_z + \varepsilon_x \quad (6.4)$$

, kde $\tilde{a}_x$ je měřená akcelerace, a_x skutečná akcelerace působící na citlivou osu, ostatní proměnné mají stejný význam a lze je tudíž popsat totožně jako pro vztah (6.3).

Většina výrobců MEMS snímačů výstup ze snímače kalibruje již z výroby, nejčastěji používaný je lineární model popisující tři základní parametry, a to citlivost, offset a chybu ortogonalitu [28] (v případě gyroskopu je uvedena i citlivost na lin. zrychlení). Kompletní zápis výstupu pro 3osý senzor je možno zapsat jako:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\omega}_x \\ \tilde{\omega}_y \\ \tilde{\omega}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & N_{xy} & N_{xz} \\ N_{yx} & 1 & N_{yz} \\ N_{zx} & N_{zy} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & S_z \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{yz} \\ B_{zx} & B_{zy} & B_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \right) \quad (6.5)$$

, pro gyroskop a:

$$\begin{bmatrix} \tilde{a}_x \\ \tilde{a}_y \\ \tilde{a}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & N_{xy} & N_{xz} \\ N_{yx} & 1 & N_{yz} \\ N_{zx} & N_{zy} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & S_z \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \right) \quad (6.6)$$

, pro akcelerometr.

Jednotlivé koeficienty mají následující význam:

S_X	citlivost senzoru v ose X na vstupy osy X
S_Y	citlivost senzoru v ose Y na vstupy osy Y
S_Z	citlivost senzoru v ose Z na vstupy osy Z
N_{XY}	citlivost senzoru v ose X na vstupy osy Y
N_{XZ}	citlivost senzoru v ose X na vstupy osy Z
N_{YX}	citlivost senzoru v ose Y na vstupy osy X
N_{YZ}	citlivost senzoru v ose Y na vstupy osy Z
N_{ZX}	citlivost senzoru v ose Z na vstupy osy X
N_{ZY}	citlivost senzoru v ose Z na vstupy osy Y
b_X	nula senzoru v ose X
b_Y	nula senzoru v ose Y
b_Z	nula senzoru v ose Z
B_{XX}	citlivost nuly v ose X na akceleraci v ose X
B_{XY}	citlivost nuly v ose X na akceleraci v ose Y
B_{XZ}	citlivost nuly v ose X na akceleraci v ose Z
B_{YY}	citlivost nuly v ose Y na akceleraci v ose Y
B_{YX}	citlivost nuly v ose Y na akceleraci v ose X
B_{YZ}	citlivost nuly v ose Y na akceleraci v ose Z
B_{ZZ}	citlivost nuly v ose Z na akceleraci v ose Z
B_{ZX}	citlivost nuly v ose Z na akceleraci v ose X
B_{ZY}	citlivost nuly v ose Z na akceleraci v ose Y

Pro podrobnější popis modelu, zahrnujícího co nejvíce zjistitelných parametrů, slouží kompletní modelové rovnice akcelerometrů a gyroskopů podle standardu IEEE, které jsou uvedeny v příloze C, jelikož jsou velmi rozsáhlé. Uvedené rovnice je možno rozšířit či zkrátit, podle složitosti modelu.

6.2 Allanova odchylka a spektrální analýza

Pro začátek bych nejprve ujasnil pojmy, jelikož se názvosloví může zdát zavádějící. Allanova odchylka je druhá odmocnina z Allanovy variance neboli rozptylu. V anglické literatuře je Allanova odchylka označována jako *Allan Deviation* (AD), nebo *square root of Allan variance* a Allanova variance jako *Allan variance* (AVAR). Allanova variance bude popsána ve vztahu ke spektrální analýze, a to konkrétně k dvoustranné výkonové spektrální hustotě, anglicky *power spectral density* (PSD).

Allanova variance je technika časové analýzy původně vyvinutá pro studium frekvenční stability oscilátorů [29]. Nese jméno po svém zakladateli, americkém vědci doktoru D. W. Allanovi. Využívá se pro určení charakteru skrytých náhodných procesů, které dávají vzniknout nežádoucímu šumu, a pomáhá identifikovat zdroj daného typu šumu v datech. Její použití není omezeno na typ zkoumaného objektu a může být využita pro rozbor šumu kterékoliv elektronické součástky. Její informační hodnota se však odvíjí i od toho, jaká je znalost fyzikálních procesů ve zkoumané součástce. Definice metody Allanovy variance a diskuze jejího použití v metrologii je popsáno detailně v [29] a [31].

Metoda AVAR je hojně využívána pro analýzu šumu inerciálních snímačů, byly jí analyzovány a popsány jednotlivé druhy šumových charakteristik vyskytujících se u optických a laserových gyroskopů ([4] a [30]) a stále více se začíná rozšiřovat i pro analýzu šumu MEMS inerciálních snímačů, u nichž je však leckdy obtížné nalézt všechny zdroje vyskytujícího se šumu.

V této podkapitole je definice Allanovi odchylky uvedena spolu se čtyřmi typy šumů (náhodných procesů), vyskytujících se u MEMS inerciálních snímačů, které se unikátně projevují ve výsledné charakteristice. Jsou to, *angle/velocity random walk* neboli bílý šum na výstupu gyroskopu/akcelerometru, *bias instability* neboli nestabilita nuly v čase (drift), *rate/acceleration random walk* neboli šum s dlouhým korelačním časem a kvantizační šum, vznikající při převodu ze spojitě do diskrétní časové domény.

6.2.1 Definice

Uvedené rovnice a definice jsou převzaty z [4, 16 a 33], v uvedených zdrojích si korespondují.

6.2.1.1 Allanova odchylka

Je dáno N vzorků naměřených dat ze senzoru o vzorkovacím čase τ_0 , AVAR je definována jako funkce časových úseků neboli klastrů. Data jsou postupně rozdělena do časových úseků o délce $T = \tau_0, 2\tau_0, \dots, n\tau_0$ ($n < N/2$) a jsou vypočteny průměry naměřených hodnot v jednotlivých úsecích pro danou délku úseku t , výsledná hodnota AVAR se pro daný úsek t poté vypočte jako rozptyl jednotlivých průměrů.

Mějme výstup inerciálního snímače, obecně definovaný jako $O(t)$, průměr v daném časovém úseku bude roven:

$$\bar{O}_k(T) = \frac{1}{T} \int_{t_k}^{t_k+T} O(t) dt \quad (6.7)$$

, kde $\bar{O}_k(T)$ představuje průměr výstupní veličiny v klastru, který začíná na k -tém prvku a obsahuje n prvků. Průměr následujícího klastru bude roven:

$$\bar{O}_{k+1}(T) = \frac{1}{T} \int_{t_{k+1}}^{t_{k+1}+T} O(t) dt \quad (6.8)$$

, kde $t_{k+1} = t_k + T$.

Rozdíl dvou sousedních průměrů pro danou délku klastru T je roven diferenci, jejíž rozptyl přes všechny zformované klustry (ze všech dat) je vyšetřován. AVAR o délce T je definována jako [4]:

$$\begin{aligned} \sigma^2(T) &= \frac{1}{2(N-2n)} \sum_{k=1}^{N-2n} (\bar{O}_{k+1}(T) - \bar{O}_k(T))^2 \\ &\cong \frac{1}{2(N-1)} \sum_{k=1}^{N-1} (\bar{O}_{k+1}(T) - \bar{O}_k(T))^2 \end{aligned} \quad (6.9)$$

Allanova odchylka získaná pomocí uvedených vztahů, je vztažena k výkonové spektrální hustotě šumů obsažených v naměřeném souboru dat. Vztah mezi AVAR $\sigma^2(T)$ a dvoustrannou PSD $S_o(f)$ je:

$$\sigma^2(T) = 4 \int_0^{\infty} S_o(f) \frac{\sin^4(\pi f T)}{(\pi f T)^2} df \quad (6.10)$$

Pro opačný přepočít neexistuje žádný inverzní vztah[4]. Rovnice 6.10 slouží výhradně pro výpočet AVAR z PSD, tento vztah znázorňuje, že Allanova odchylka je úměrná celkovému výkonu výstupního šumu snímače po projití filtrem s přenosovou funkcí typu $\frac{\sin^4(x)}{(x)^2}$, která odpovídá metodě použité pro operace nad daty. Tento filtr se chová jako pásmová propust nastavitelná pomocí délky T . Takto je možné pomocí Allanovy odchylky identifikovat a kvantifikovat rozdílné typy šumů (náhodných procesů) existujících v datech. Výsledek AVAR $\sigma^2(T)$ se běžně vykresluje jako odchylka $\sigma(T)$, v závislosti na zvoleném T v logaritmických souřadnicích (obou os).

Z konečného souboru dat lze získat konečné množství klastrů. AVAR vyskytujícího se šumu je odhadnuta pomocí co největšího počtu klastrů o dané délce, které mohou být

ze zdrojových dat vytvořeny. Přesnost výpočtu AVAR pro dané T , závisí na počtu nezávislých klastrů vytvořených ze zdrojových dat. Procentní chyba odhadu AVAR ε je úměrná poměru celkového počtu datových bodů K zdrojového souboru dat a počtu datových bodů v klastru n pro dané T :

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2\left(\frac{N}{n} - 1\right)}} \quad (6.11)$$

Ze vztahu (6.11) je zřejmé, že chyba odhadu v oblasti krátkých T je nízká, díky vysokému počtu nezávislých klastrů v dané oblasti a naopak v oblasti dlouhých T je vysoká, díky nízkému počtu nezávislých klastrů v dané oblasti. Pro vyjádření v procentech se výsledek vynásobí 100.

Uvedený vztah pro výpočet chyby odhadu je možno využít i inverzně, pro zjištění jak dlouho bude třeba měření provádět, pokud je potřeba vyšetřit šumy i pro dlouhé korelační časy s danou přesností. Například pro potvrzení existence náhodného procesu o charakteristickém čase 10h s přesností odhadu $\varepsilon = 25\%$, bude potřeba provést a zanalyzovat měření o délce:

$$0,25 = \frac{1}{\sqrt{2\left(\frac{N}{n} - 1\right)}} \Rightarrow \frac{N}{n} = \frac{4^2}{2} + 1 = 9 \quad (6.12)$$

$$N = 9.n$$

Celková délka měření pro určení odhadu s danou přesností ε by byla pro zjištění existence daného procesu 90h (9 x 10).

6.2.1.2 Spektrální analýza

Pro výpočet PSD jsou uvedeny jen základní vztahy, jelikož hlavním obsahem podkapitoly je metoda Allanovy odchylky, kterážto je však uváděna ve vztahu k PSD.

PSD je vhodná k analýze periodických a neperiodických signálů, základní vztah mezi PSD stacionárního procesu $S(\omega)$ a kovariancí $K(\tau)$, je vyjádřen pomocí Fourierovy transformace:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega\tau} K(\tau) d\tau \quad (6.13)$$

Ve stavovém prostoru je přenosová funkce stochastického modelu rovna přímo výstupní PSD, za předpokladu, že je vstupní PSD konstantní (např. N^2), tzn. z bílého šumu [33]. Pro lineární systém platí:

$$S_{OUT}(\omega) = H(j\omega) S_{IN}(\omega) H^{*T}(j\omega) \quad (6.14)$$

, kde S_{OUT} je výstupní PSD, S_{IN} je vstupní PSD, H je matice přenosových funkcí systému a H^{*T} její komplexně sdružená a transponovaná podoba.

6.2.2 Charakteristika náhodných procesů

Jak již bylo zmíněno, budou popsány čtyři charakteristické šумы, vyskytující se u inerciálních snímačů. U každého typu šumu je uvedeno, jak se projevuje ve spektru $S_O(f)$ a v Allanově odchylce $\sigma(T)$. Od toho o jaký typ senzoru se jedná, se odvíjí i název a jednotky daného šumu. Názvy jednotlivých procesů jsou uvedeny pro gyroskop a následně pro akcelerometr. Přepočet ze spektra $S_O(f)$ na reprezentaci v Allanově odchylce $\sigma(T)$ je proveden pomocí rovnice (6.10).

6.2.2.1 Angle random walk

Velocity random walk

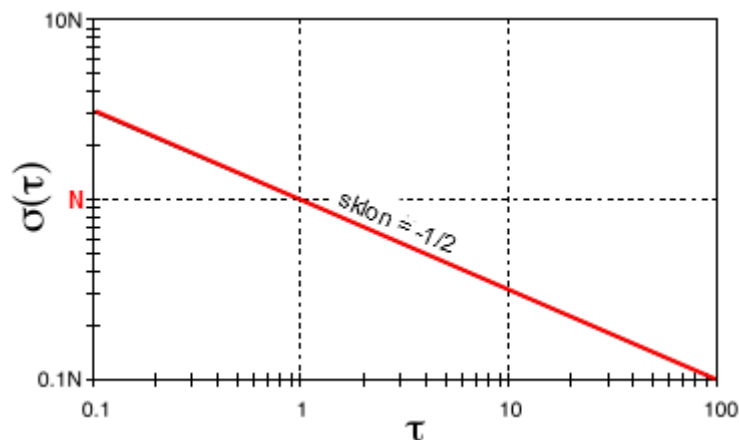
Vysokofrekvenční šумы, jež mají korelační čas mnohem kratší než vzorkovací čas, se mohou podílet na typu šumu označovanému jako *angle (velocity) random walk*, nicméně zdroje těchto šumů mohou být eliminovány vhodným návrhem snímače [33]. Šумы projevující se jako *angle random walk* jsou charakterizovány bílým šumem na výstupu gyroskopu (akcelerometru). Odpovídající PSD lze popsat jako:

$$S_N(f) = N^2 \quad (6.15)$$

, kde N je označení odpovídajícího koeficientu. Zápis pomocí AVAR je poté:

$$\sigma_N^2(T) = \frac{N^2}{T} \quad (6.16)$$

Reprezentaci tohoto typu šumu v logaritmických souřadnicích znázorňuje Obr. 6.1, kdy se tento šum projevuje jako přímka se sklonem $-1/2$. Hodnotu koeficientu N je možno získat přímým odečtením hodnoty této přímky pro $\tau = 1$.



Obr. 6.1 Angle random walk znázorněn pomocí AD

6.2.2.2 Bias instability

Nestabilita nuly

Původ tohoto šumu je možno hledat v elektronice či jiných komponentech, které jsou náchylné na náhodné kmitání výstupu (tzv. *flicker*). Díky své nízkofrekvenční povaze se v datech projevuje jako fluktuace neboli drift nuly[4]. PSD tohoto šumu je charakterizováno jako:

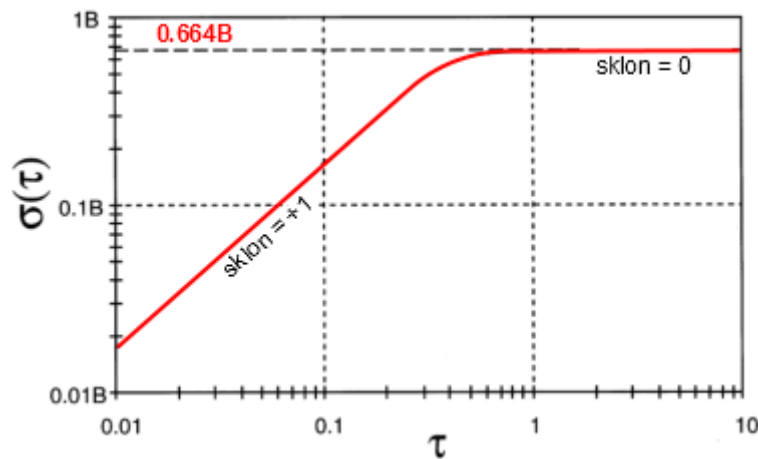
$$S_B(f) = \begin{cases} \left(\frac{B^2}{2\pi}\right) \frac{1}{f}, & f \leq f_0 \\ 0, & f > f_0 \end{cases} \quad (6.17)$$

, kde B je označení odpovídajícího koeficientu nestability nuly a f_0 je mezní frekvence. Odpovídající zápis pomocí AVAR je poté:

$$\sigma_B^2(T) = \frac{2B^2}{\pi} \left[\ln 2 - \frac{\sin^3 x}{2x^2} (\sin x + 4x \cos x) + C_i(2x) + C_i(4x) \right] \quad (6.18)$$

, kde x je $\pi f_0 T$ a C_i je kosinová integrální funkce.

Reprezentaci nestability nuly v logaritmických souřadnicích znázorňuje Obr. 6.2. Hodnotu koeficientu B je možno získat podělením minima AVAR hodnotou 0,664 (výsledek výrazu $\sqrt{2 \ln 2 / \pi}$).



Obr. 6.2 Nestabilita nuly znázorněna pomocí AD

6.2.2.3 Rate random walk

Acceleration random walk

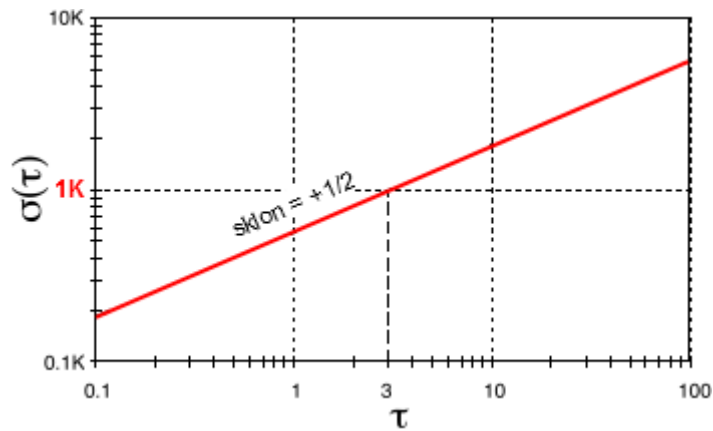
Tento náhodný proces nemá doposud jasně objasněný původ. Jedno z možných vysvětlení původu tohoto šumu je limitní případ exponenciálně korelovaného šumu s velmi dlouhým korelačním časem. Odpovídající PSD tohoto procesu je:

$$S_K(f) = \left(\frac{K}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{f^2} \quad (6.19)$$

, kde K je označení odpovídajícího koeficientu. Odpovídající zápis pomocí AVAR má poté tvar:

$$\sigma_K^2(T) = \frac{K^2 T}{3} \quad (6.20)$$

Reprezentaci tohoto typu šumu v logaritmických souřadnicích ukazuje Obr. 6.3, kdy se tento šum projeví jako přímka se sklonem $+1/2$. Hodnotu koeficientu K je možno získat přímým odečtením hodnoty této přímky pro $\tau = 3$.



Obr. 6.3 Rate random walk znázorněn pomocí AD

Pro ještě delší časové intervaly, než má tento proces, je definován další typ procesu, který se projevuje stoupajícím trendem v AVAR rovným jedné, označován jako *rate (acceleration) ramp*. Tento proces lze označit spíše za deterministický než náhodný, jeho přítomnost indikuje velmi pomalé monotónní změny. Projevuje se však spíše pro IFOG snímače než u MEMS zařízení[4].

6.2.2.4 Kvantizační šum

Vzniká při převodu spojitého signálu na digitální. Šum je způsoben malými odchylkami mezi aktuální amplitudou vzorkovaného signálu a bitovým rozlišením A/D převodníku[33].

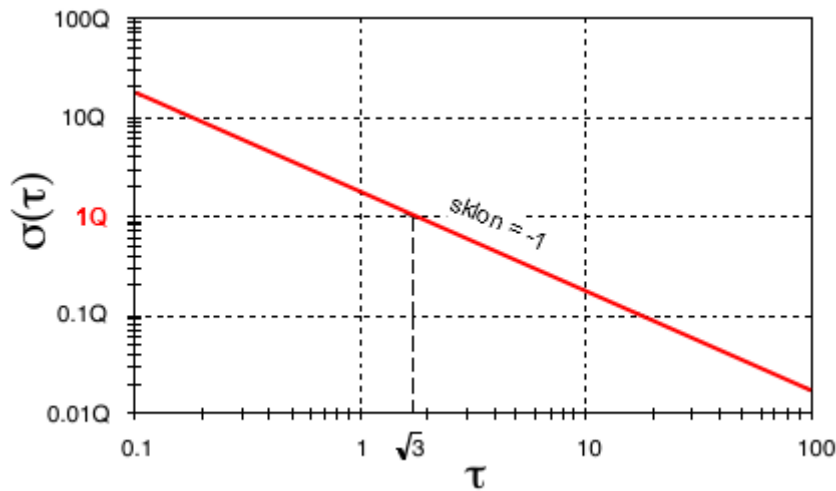
Výstupní PSD je pro tento typ šumu definováno jako:

$$S_Q(f) = \frac{4Q_z^2}{T_s} \sin^2(\pi f T_s) \approx (2\pi f)^2 T_s Q_z^2, \quad f < \frac{1}{2T_s} \quad (6.21)$$

, kde Q_z je koeficient kvantizačního šumu a T_s vzorkovací čas. AVAR je poté:

$$\sigma_Q^2(T) = \frac{3Q_z^2}{T^2} \quad (6.22)$$

Reprezentaci kvantizačního šumu v logaritmických souřadnicích znázorňuje Obr. 6.4, kdy se tento šum projeví jako přímka se sklonem -1. Hodnotu koeficientu Q je možno získat přímým odečtením hodnoty této přímky pro $\tau = \sqrt{3}$.

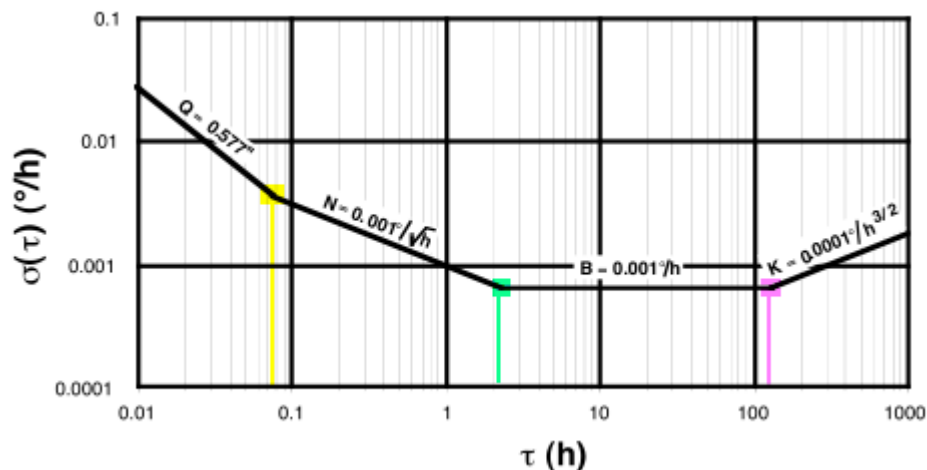


Obr. 6.4 Kvantizační šum znázorněn pomocí AD

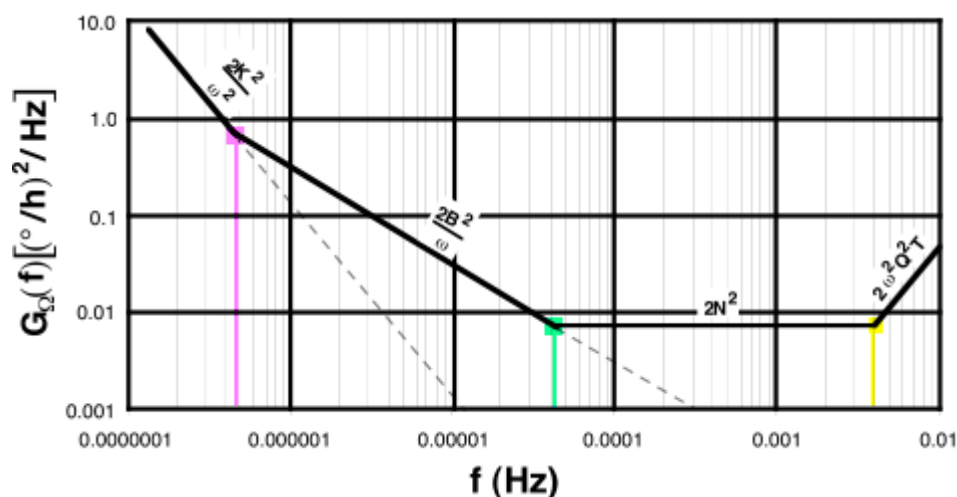
Se stejným sklonem se v Allanově odchylce můžou vykytovat i další šумы, které lze rozeznat jen pomocí spektrální analýzy (např. *flicker angle noise* a *white angle noise*)[33].

6.2.3 Kombinovaný efekt všech náhodných procesů

Součet uvedených náhodných procesů $\sigma^2(T) = \sigma_N^2(T) + \sigma_B^2(T) + \sigma_K^2(T) + \sigma_Q^2(T)$ je znázorněn pomocí AVAR (Obr. 6.5) a následně pomocí odpovídající PSD (Obr. 6.5).



Obr. 6.5 Výsledný graf Allanovy odchylky[4]



Obr. 6.6 Výsledný graf Spektrální šumové hustoty[4]

Jednotlivé šumové komponenty Allanovy odchylky jsou spolu s typickým zdrojem a typem spektra [32], uvedeny v tabulce 6.1.

Tabulka 6.1 Shrnutí uvedených typů šumu

Šum	Možný zdroj / označení	Sklon		Filtrace průměrováním	Parametr snímače
		PSD	AD		
Q	A/D převodník kvantizační	+2	-1	výborná	Bitové rozlišení
N	teplotní šum bílý	0	-1/2	dobrá	Angle random walk Velocity random walk
B	elektronický šum růžový	-1	0	neutrální	Bias instability Flicker noise
K	akumulace b. šumu červený	-2	+1/2	špatná	Rate random walk Accel. random walk

6.3 Shrnutí

Kapitola navrhuje systematický model výstupu snímače na základě zjištěných koeficientů, je však třeba připomenout, že jednotlivé zjištěné koeficienty se mohou měnit s časem, teplotou, vibracemi, působícím pohybem a od zapnutí k zapnutí (*switch on to switch on*), jsou to právě tyto odchylky, které při kalibraci určují celkovou přesnost snímače. Zatímco většinu z těchto efektů nelze vhodně kompenzovat, teplotní kompenzace je často možná a přispívá k dosažení lepší přesnosti [3]. Koeficienty modelu pro teplotní kompenzaci je možno získat měřením teplotních závislostí, kdy se podle složitosti dané závislosti může jednat o koeficienty lineární regrese, či vyšších řádů polynomů.

Dále jsou uvedeny metody pro analýzu vyskytujícího se šumu snímače, a to Allanova odchylka v korespondenci se spektrální analýzou. Pomocí těchto metod lze získat informaci o charakteru vyskytujícího se šumu. Kromě popsanych procesů, které lze považovat za majoritní, existují i další známé procesy, jejichž výčet je možno nalézt v [4, 30 a 31]. V této kapitole je jim věnován poměrně velký prostor, poněvadž velikost a charakter výstupního šumu snímače je klíčový pro určení jeho přesnosti, či použití v INS. Při správné analýze a rozpoznání působícího šumu je možné jej vhodně modelovat, či filtrovat. Proto jsem se také při praktických měřeních zaměřil spíše na tuto metodu. Výsledky provedených měření prezentuje následující kapitola 7.

7 PRAKTICKÁ MĚŘENÍ

Kapitola prezentuje výsledky provedených experimentů, které byly realizovány v laboratoři, nebo doma. Nejprve jsou představeny použité senzory a poté jednotlivá měření. Byly naměřeny teplotní závislosti nuly akcelerometrů i gyroskopů a teplotní závislost citlivosti gyroskopu. Nejrozsáhlejší měření bylo však statické měření pro analýzu pomocí Allanovy odchylky. V poslední části kapitoly je uveden vlastní experiment měření Zemské rotace pomocí MEMS senzoru.

Veškeré zpracování naměřených dat bylo provedeno pomocí vlastních skriptů v Matlabu, kdy byl postup zpracování obdobný pro všechna měření. Z výstupního textového souboru obsahujícího naměřená data, byla užitečná data nejprve po řádcích načtena a uložena jako *.mat* soubor, který má menší velikost. Takto vytvořený soubor byl poté načten skriptem pro analýzu či vykreslení dat, jehož výsledkem jsou jednotlivé grafy.

Kromě programů na zpracování a analýzu dat, bylo pro měření teplotních závislostí nuly a citlivosti potřeba vytvořit obslužné programy v LabView, pro automatické ovládání rotačního stolku a teplotní komory. Všechny vytvořené programy pro měření a zpracování dat z jednotlivých měření jsou uloženy v příloze na CD.

7.1 Použité senzory

Pro praktická měření byly k dispozici tři senzory uvedené v následujících podkapitolách 7.1.1-7.1.3, které byly zapůjčeny firmou Honeywell. Ne všechna měření byla realizována se všemi senzory. Při měření nuly byly použity snímače Scc1300 a MPU6050, při měření citlivosti Scc1300 a při měření Allanovy odchylky byly otestovány všechny snímače.

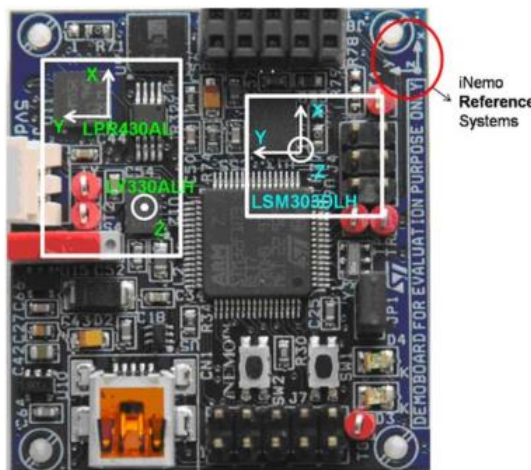
Výstupy všech snímačů byly sbírány s frekvencí 50 Hz pro nejnižší rozsah.

7.1.1 STmicroelectronics iNemo [25]

Demonstrační deska MEMS inerciálních snímačů (viz Obr. 7.1), skládající se z tříosého akcelerometru a magnetometru LSM303DLH (6\$), dvouosého gyroskopu LPR430AL(10\$) a jednoosého gyroskopu LY330ALH(5\$). Všechny snímače řídí mikroprocesor, který zařizuje i komunikaci s PC, kdy po nainstalování potřebných ovladačů lze pomocí aplikace od výrobce zaznamenávat výstupy jednotlivých senzorů. Deska obsahuje kromě inerciálních snímačů i magnetometr, tlakový a teplotní senzor,

tyto součásti však nebyly využity, data z nich jsou však uložena a mohou být užitečná například při analýze Allanovy odchylky, pro zjištění podmínek prostředí v daný čas, pokud by se vyskytla v datech nějaká anomálie. Výstupní jednotky gyroskopů jsou $^{\circ}/s$ a akcelerometrů $[mg]$ a jsou také uvedeny v souboru s daty. Příklad zpracovávaného výstupu:

```
#<!-- ID; timeMark; System TimeCout; AccX; AccY; AccZ; GyrX; GyrY; GyrZ; MagX; MagY; MagZ; Press; Temp;-->
0; 0000000000; 0000551968; -0007; 00005; 01003; -0004; 00003; 00004; -0031; -0072; -0352; 10286; 00330;
```



Obr. 7.1 STmicroelectronics iNemo [25]

Základní parametry jednotlivých snímačů na desce jsou:

	Akcelerometr	Gyro X,Y	Gyro Z
Rozsah	$\pm 2g$	$\pm 300^{\circ}/s$	$\pm 300^{\circ}/s$
Citlivost	1 mg/LSB	3,33 mV/ $^{\circ}/s$	3,75 mV/ $^{\circ}/s$
Citlivost v závislosti na teplotě	$\pm 0.01\%/^{\circ}C$	0.07 $\%/^{\circ}C$	0.01 $\%/^{\circ}C$
Chyba nuly	$\pm 20\text{ mg}$		
Nula v závislosti na teplotě	$\pm 0.1\text{ mg}/^{\circ}C$	0.05 $^{\circ}/s/^{\circ}C$	0.02 $^{\circ}/s/^{\circ}C$
Rozsah pracovních teplot	-30 až 85 $^{\circ}C$	-40 až 85 $^{\circ}C$	-40 až 85 $^{\circ}C$

7.1.2 Murata Scc1300-D02 [20]

Parametry tohoto senzoru jsou uvedeny ve srovnávací tabulce na str. 33.

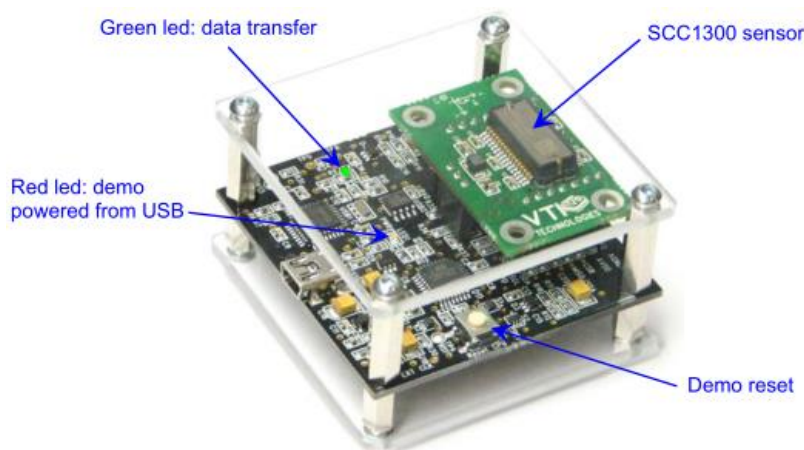
Snímač se skládá z tříosého akcelerometru a jednoosého gyroskopu. Byl vybrán díky uváděným šumovým parametrům slibujícím vysokou stabilitu nuly. Uváděná maloobchodní cena za kus se pohybuje okolo 120\$. Tento senzor byl zapůjčen i s ukázkovou demo deskou [21] posílající data přes USB emulující COM port sériové linky (viz Obr. 7.2), bohužel dodávaná obslužná aplikace neumožňuje z neznámého

důvodu ukládání dat. Pro ovládání senzoru byl tedy použit jednoduchý textový makro jazyk [22], pomocí kterého lze díky demo desce komunikovat se senzorem. Posílání maker do senzoru a sběr dat byl proveden pomocí programu Hyperterminal, který lze použít pro posílání a sběr dat ze sériového rozhraní. Pokud jsou nainstalovány příslušné ovladače, demo deska senzoru se po připojení k počítači zahlásí jako COM port, na který je možno se komunikačním programem Hyperterminal připojit.

Po vybrání příslušného čísla portu je potřeba zadat tyto parametry sériové komunikace:

Bits per second	Data bits	Parity	Stop bits	Flow control
230400	8	None	1	None

Po vytvoření spojení je potřeba ještě zmáčknout tlačítko reset na demo desce (Obr. 7.2) a poté je možno již poslat textové makro pro nastavení výstupu senzoru.



Obr. 7.2 Scc1300 – D02 Demo kit [21]

Pro všechna měření byl výstup senzoru nastaven pomocí stejného makra (uvedeného u zdrojových souborů na CD). Na sériovou linku byly posílány v uvedeném pořadí výstupy z gyroskopu, teplotního snímače gyroskopu, akcelerometru a teplotního snímače akcelerometru odděleny čárkami. Příklad výstupu se zvýrazněnými hodnotami ve dvojkovém doplňku, které byly zpracovávány:

0x**ff91**, 0x**f661**, 0x**0076**, 0x**ff54**, 0x**0dde**, 0x**21**, 0x**d6**, Gr-t, Aa-t

Výstup gyroskopu osa X

Teplota gyroskopu

Výstup akcelerometru osa X

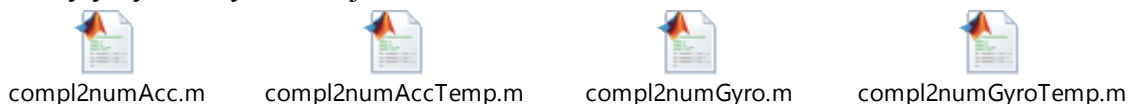
Výstup akcelerometru osa Y

Výstup akcelerometru osa Z

Teplota akcelerometru msb

Teplota akcelerometr lsb

Pro převod na požadované jednotky, dle vzorců pro přepočet z produktového listu [20], byly vytvořeny následující funkce:

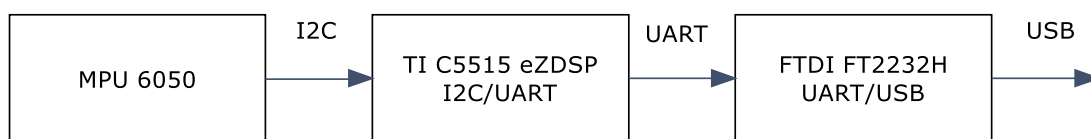


Jednotlivé signály ze senzorů jsou již vnitřně kalibrovány a filtrovány, tato kalibrace nelze vypnout, tudíž se dostávají vždy již kalibrovaná (z výroby) data.

7.1.3 Invensense MPU 6050 [23]

Parametry tohoto senzoru jsou uvedeny ve srovnávací tabulce na str. 33.

Třiosý akcelerometr a gyroskop s velmi dobrými uváděnými parametry na velmi nízkou maloobchodní cenu (15\$). Hardware i software pro ukládání dat do PC byly k dispozici již jako hotové řešení. Snímač byl taktéž k dispozici na demonstrační desce [24], ke které bylo třeba připojit převodníky emulující COM port sériové linky, blokové schéma propojení je znázorněno na obrázku níže.



Obr. 7.3 Blokové schéma signálové cesty MPU 6050

Šířka pásma senzorů je pevně nastavena na 98Hz. Výstup z demonstrační desky je přes sběrnici I²C propojen s vývojovou deskou signálového procesoru (TI C5515 eZDSP), která plní funkci převodníku na sběrnici UART. Poslední částí řetězce je převodník UART na USB (FTDI FT232RL). V PC jsou data zaznamenány pomocí jednoduché aplikace, která výstupní data ukládá do souborů .xls, vždy po 50 MB. Příklad zpracovávaného výstupu:

```

Time [s]    |T[°C] |GyroX [°/s]|GyroY [°/s]|GyroZ [°/s]|AccX [g]|AccY [g]|AccZ [g]|
000000051.12, 24.71, 000.709924,-002.038168, 000.442748, 0.02832, 0.23865, 0.97388
  
```

Výstupní jednotky gyroskopů jsou [°/s] a akcelerometrů [g]. Data z tohoto senzoru nejsou žádným způsobem kalibrovány, či kompenzovány.

7.2 Měření nuly inerciálních snímačů

Měření nuly bylo provedeno pro snímače Scc1300 a MPU6050. Samotný offset výstupu se skládá se systematické a náhodné části. Náhodná část je charakterizována v další podkapitole pomocí metody Allanovy odchylky a systematická část lze zjistit statickým měřením. Statické měření bylo provedeno v teplotní komoře, aby bylo možné sledovat závislost nuly na teplotě, jelikož se vliv teploty na výstup snímače považuje za jeden s nejmarkantnějšími.

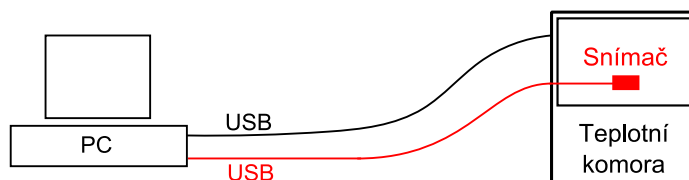
7.2.1 Závislost nuly na teplotě

Znázornění experimentu je na obrázku 7.4. Snímač je umístěn v teplotní komoře CTS T-65, která je ovládána pomocí obslužné aplikace vytvořené v LabView.

Parametry teplotní komory CTS T-65 [34] jsou:

Teplotní rozsah	Max. rychlost chlazení	Max. rychlost ohřevu	Přesnost
-65 / +180 °C	4 °C /min	6 °C /min	± 0,3 °C

Komora je připojena do PC přes USB, po připojení je však vidět jako zařízení na sériové lince. Bloky pro LabView, sloužící pro ovládání teplotní komory po sériové lince, byly již k dispozici, v řídicí aplikaci je proto stačilo jen vhodně poskládat do diagramu a nastavovat požadované teploty.



Obr. 7.4 Měření závislosti nuly na teplotě

7.2.1.1 Murata Scc1300-D02

Tento snímač má, jak již bylo zmíněno, vnitřní kalibraci. Pomocí této kalibrace se kompenzuje i vliv teploty na nulu snímače pomocí zpětné vazby od teplotních senzorů na čipu akcelerometru a gyroskopu. Byly provedeny dva typy testů, kdy jednou byla teplota skokově nastavována od zadané minimální do zadané maximální hodnoty (tzv. ramp test) a podruhé se na dané teplotě vždy počkalo 10 minut a poté se teprve nastavila další teplota (tzv. soak test). Díky kompenzaci senzoru však z testu druhého typu není patrná žádná teplotní závislost, proto zde ani výstupy z tohoto testu nejsou uvedeny. Lze však konstatovat, že pro pomalé změny okolní teploty se výstup snímače nemění a kompenzace funguje správně.

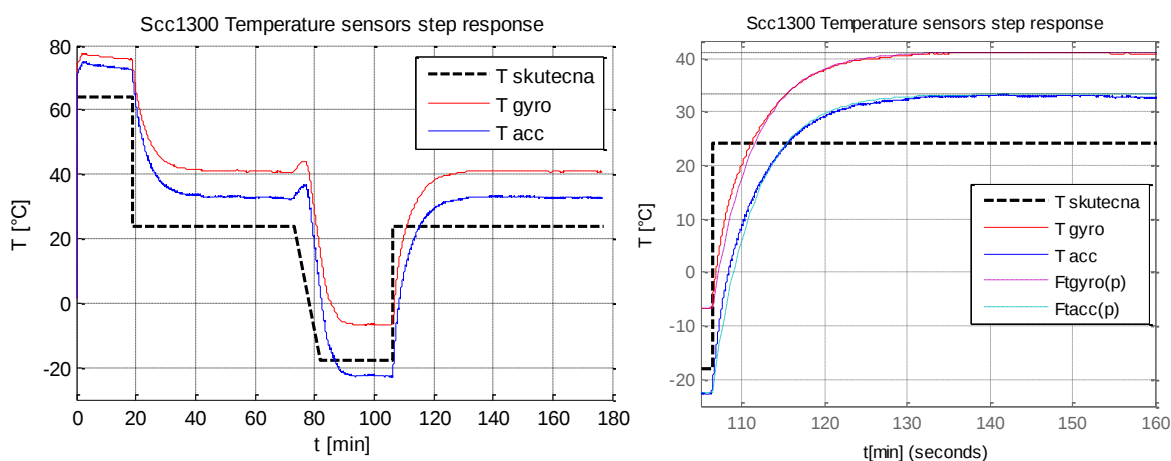
Testování přechodové charakteristiky

Jako jeden z prvních testů bylo provedeno otestování přechodové charakteristiky teplotních snímačů. Bylo potřeba docílit co nejrychlejšího teplotního skoku, aby bylo možno sledovat přechodový děj. Byly provedeny dva teplotní skoky, z 62°C na 22°C, a z -18°C na 22°C. Jednalo se tedy vždy o skokovou změnu teploty o 40°C. Postup experimentu byl následující: Snímač byl nahřán v teplotní komoře nastavené na 62°C, po ustálení na této teplotě, byl snímač co nejrychleji vyndán a nechal se vychladat v laboratoři o teplotě okolí 22°C. Po odeznění přechodového děje byl snímač vrácen do teplotní komory nastavené na -18°C, po ustálení na této teplotě byl opět rychle přemístěn ven z komory do 22°C a ohříván se na danou teplotu okolí.

Výsledky tohoto testu znázorňuje Graf 7.1, na kterém je vlevo patrný průběh celého testu a vpravo detail na přechodovou charakteristiku s proloženým přenosem setrvačného članku prvního řádu (vztah (7.1)) o časové konstantě $\tau = 5$ minut pro oba snímače ($F_{tgyro}(p)$, $F_{tacc}(p)$), kdy zesílení K je zvoleno tak, aby kopírovalo zjištěný průběh

$$F_t(p) = \frac{K}{1 + 5p} \quad (7.1)$$

Časová konstanta byla zjištěna jako čas od počátku skoku do 63,2% z ustálené hodnoty. Při daných podmínkách by tedy bylo potřeba čekat po dobu 25 minut (5τ) na ustálení přechodového děje. Je však nutné zdůraznit, že zjištěná přechodová charakteristika platí v případě minimálního proudění vzduchu, kdy snímač stál na stole v laboratoři s vypnutou klimatizací.

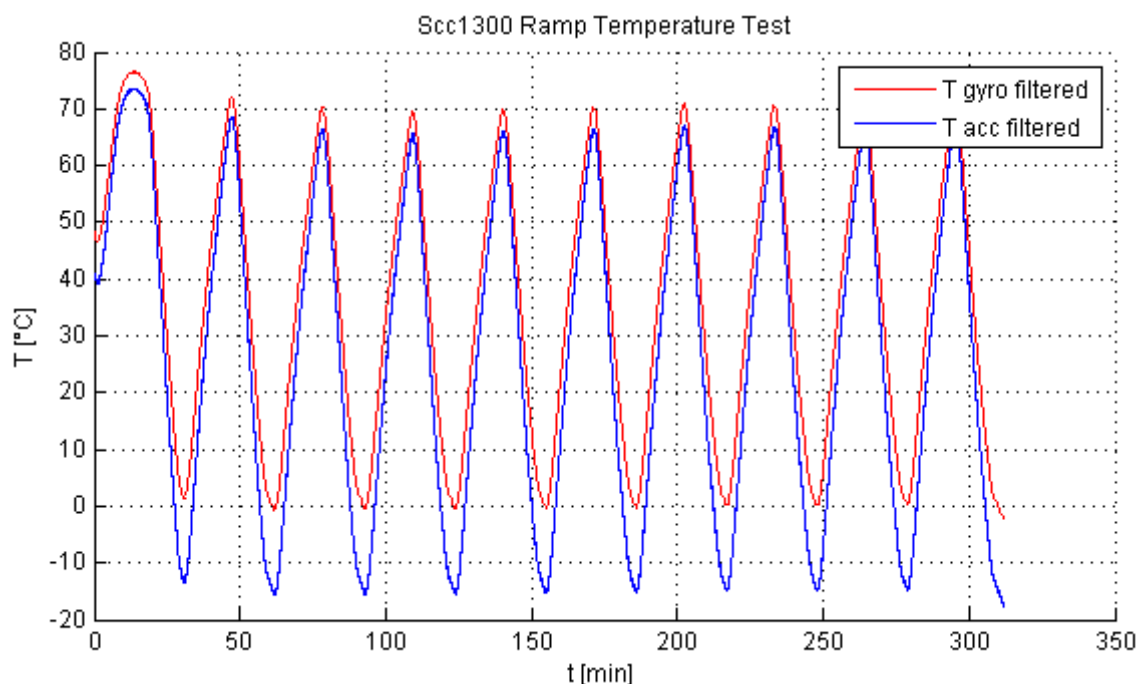


Graf 7.1 Přechodová charakteristika teplotních snímačů

Zjištěná přechodová charakteristika se dá využít i pro kalibraci teplotních snímačů pro měření teploty okolí, pokud by to bylo potřeba.

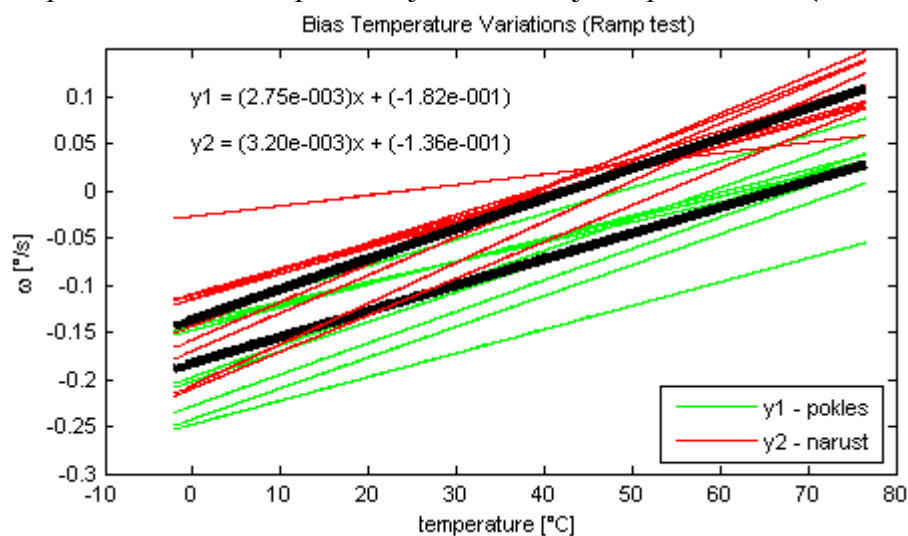
Testování teplotní závislosti nuly

Maximální nastavované teploty zvolené při testování byly zvoleny s ohledem na elektroniku vývojového kitu snímače -10°C až $+60^{\circ}\text{C}$, kdy samotný snímač má uváděný rozsah pracovních teplot od -40°C do $+125^{\circ}\text{C}$. Pro otestování závislosti nuly na teplotě byl zvolen skokový test, kdy se teplota měnila v zadaných mezích co nejrychleji, průběh teploty na snímačích ukazuje Graf 7.2. Teplota byla nejprve nastavena na 60°C a po dosažení této hodnoty na -10°C , celý proces se opakoval desetkrát.



Graf 7.2 Průběh skokového testu teplotní závislosti na Scc1300

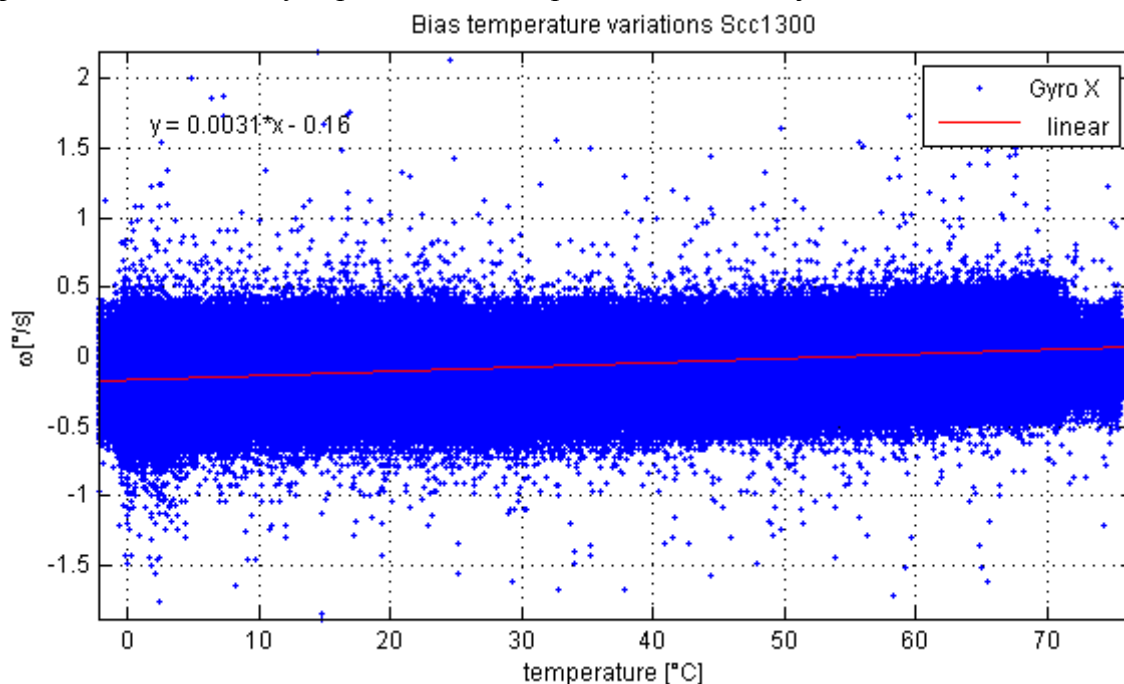
Ze zjištěných dat byly vyzkoušeny dva způsoby zpracování. První způsob spočíval ve vybrání a zpracování částí dat pro klesající a narůstající teplotu zvlášť (Graf 7.3).



Graf 7.3 Teplotní závislost výstupu gyroskopu Scc1300 (1. způsob zpracování)

Druhý způsob spočíval ve vybrání a zpracování všech dat zároveň (Graf 7.4). V prvním případě bylo data potřeba rozdělit do deseti samostatných částí pro nárůst a pokles teploty. Z takto rozdělených dat bylo zjištěno deset závislostí pro nárůst i pokles teploty, lineární aproximací závislosti výstupu gyroskopu na teplotě. Výsledky tohoto zpracování zobrazuje Graf 7.3, kdy červené a zelené přímky jsou jednotlivé lineární aproximace teplotní závislosti a černé přímky jsou průměrnou hodnotou ukazující výslednou závislost (y_1 -nárůst, y_2 -pokles). Pomocí tohoto způsobu zpracování je přímo vidět vyskytující se hystereze, jejíž hodnota odpovídá přibližně vzdálenosti výsledných přímek.

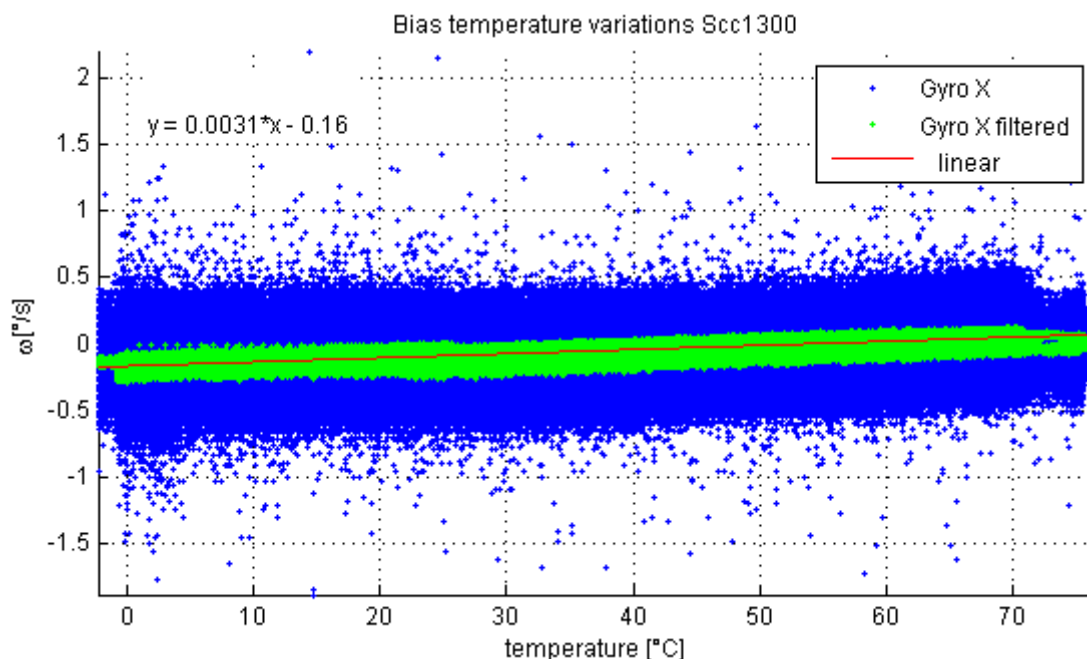
V druhém případě zpracování byly všechna naměřená data rovnou vykresleny do závislosti, kdy na ose x jsou naměřené teploty ze snímačů a na ose y výstup snímače. Proložená přímka poté reprezentuje lineární závislost výstupu snímače na teplotě. Zjištěná lineární regrese (y , Graf 7.4) odpovídá průměru ze dvou zjištěných závislostí (y_1 , y_2) v prvním případě. Data zpracovávají tímto způsobem tedy poskytují průměrnou závislost výstupu snímače na teplotě vzhledem k hysterezi.



Graf 7.4 Teplotní závislost výstupu gyroskopu Scc1300 (2. způsob zpracování)

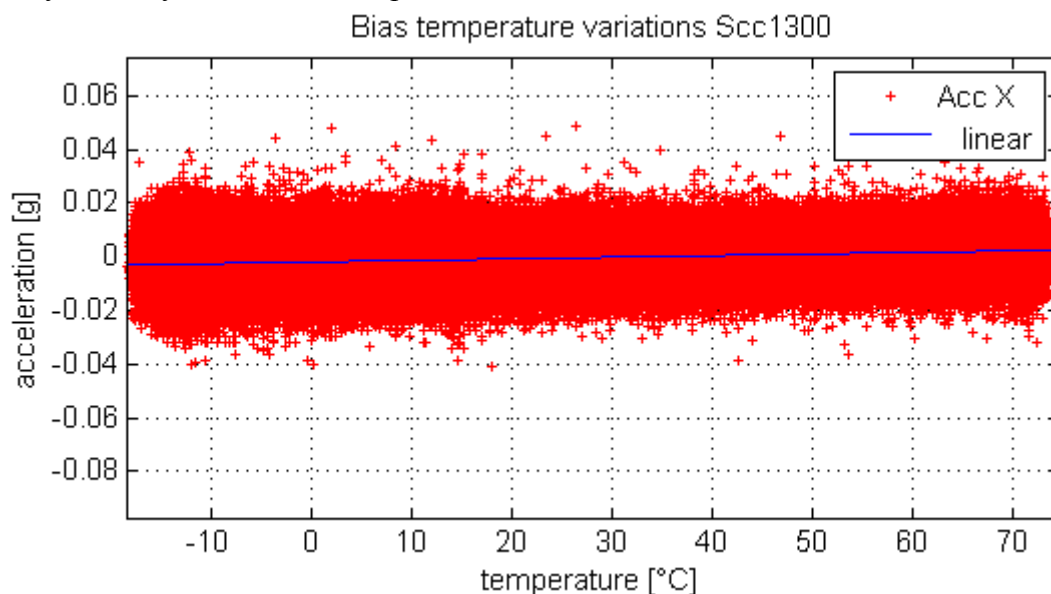
Pro ověření, zdali vyjde stejná teplotní závislost i při průměrování výstupních dat gyroskopu plovoucím průměrem o délce 50 vzorků, byla vykreslena teplotní závislost i pro takto průměrovaná data (viz Graf 7.5). Výsledná hodnota lineární regrese y vyšla totožná s hodnotou i bez filtrování:

$$y = \omega_x(t) = 3,1 \cdot 10^{-3} \cdot t - 0,16 \quad (7.1)$$



Graf 7.5 Teplotní závislost průměrovaného výstupu gyroskopu Scc1300 (2. způsob zpracování)

Uvedené pokusy zpracování dat byly provedeny pouze pro gyroskop. Na základě závěru z těchto pokusů, že průměrná hodnota závislosti výstupu snímače na teplotě vyjde stejná pro všechny uvedené způsoby, byl pro zpracování teplotních závislostí z akcelerometrů zvolen nejjednodušší způsob a to přímé vynesení závislosti z naměřených dat. Takto vnesená data byla proložena lineární závislostí a polynomem 5. řádu, pro zachycení případných nelinearit. Pod grafem jednotlivých závislostí jsou vždy uvedeny rovnice těchto aproximací.



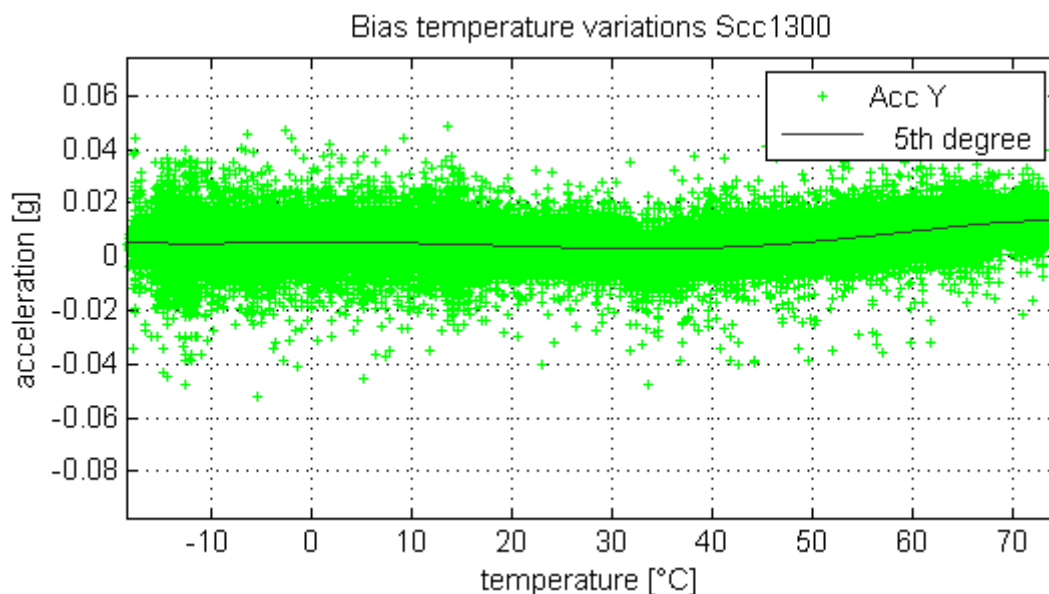
Graf 7.6 Teplotní závislost výstupu akcelerometru Scc1300 - osa X

Lineární aproximace teplotní závislosti osy x akcelerometru:

$$a_x(t) = 5,96 \cdot 10^{-5} \cdot t - 1,91 \cdot 10^{-3} \quad (7.2)$$

Polynomická aproximace teplotní závislosti osy x akcelerometru:

$$a_x(t) = -2,23 \cdot 10^{-11} \cdot t^5 + 2,68 \cdot 10^{-9} \cdot t^4 - 7,93 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 + 2,37 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 - 5,07 \cdot 10^{-5} \cdot t - 1,93 \cdot 10^{-3} \quad (7.3)$$



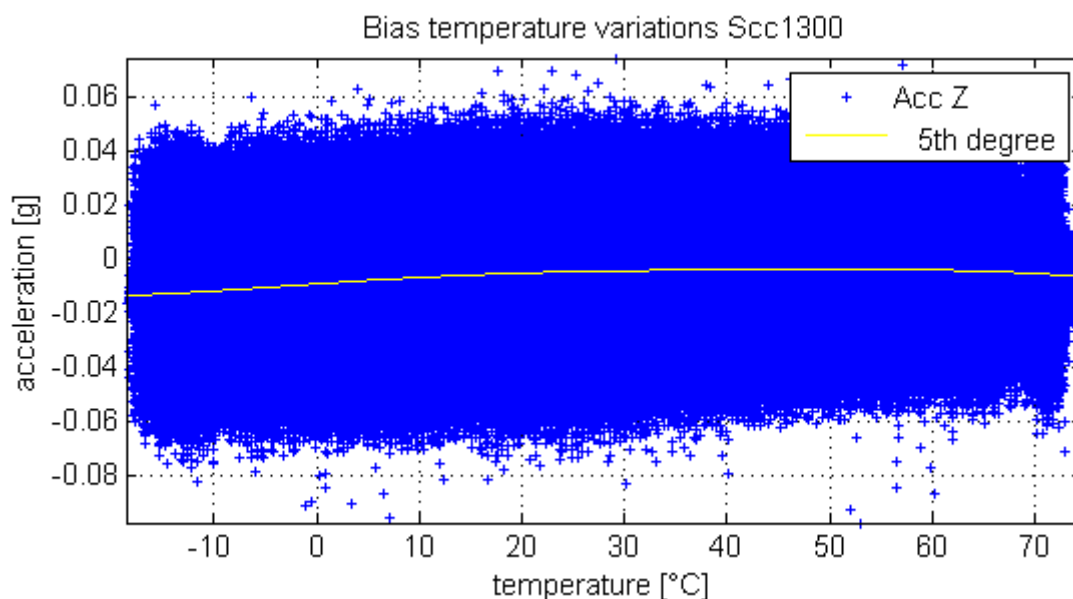
Graf 7.7 Teplotní závislost výstupu akcelerometru Scc1300 - osa Y

Lineární aproximace teplotní závislosti osy y akcelerometru:

$$a_y(t) = 5,99 \cdot 10^{-5} \cdot t - 4,34 \cdot 10^{-3} \quad (7.4)$$

Polynomická aproximace teplotní závislosti osy y akcelerometru:

$$a_y(t) = -5,77 \cdot 10^{-11} \cdot t^5 + 6,80 \cdot 10^{-9} \cdot t^4 - 1,31 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 - 3,70 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 1,77 \cdot 10^{-5} \cdot t + 5,33 \cdot 10^{-3} \quad (7.5)$$



Graf 7.8 Teplotní závislost výstupu akcelerometru Scc1300 - osa Z

Lineární aproximace teplotní závislosti osy z akcelerometru:

$$a_z(t) = 9,90 \cdot 10^{-5} \cdot t - 9,03 \cdot 10^{-3} \quad (7.6)$$

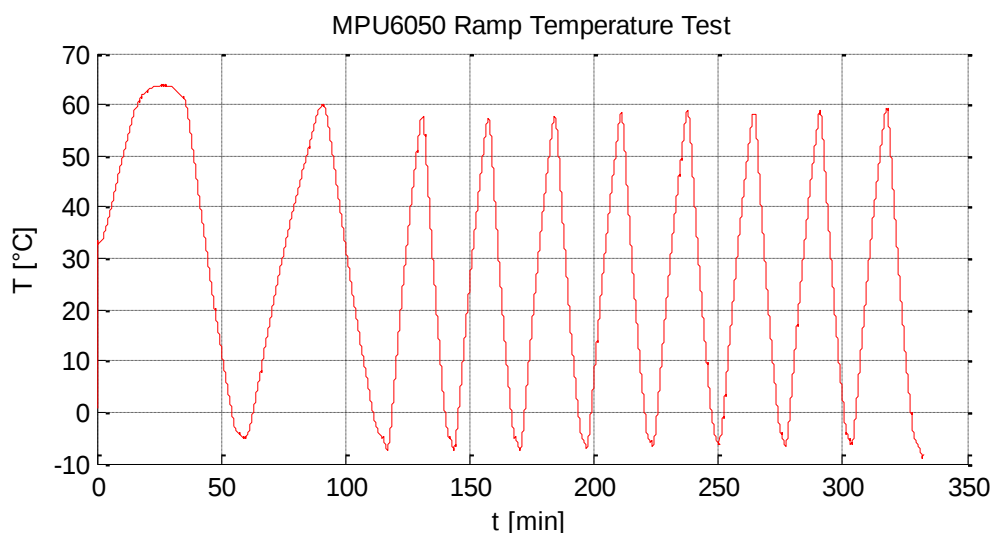
Polynomická aproximace teplotní závislosti osy z akcelerometru:

$$a_z(t) = -2,67 \cdot 10^{-11} \cdot t^5 + 3,25 \cdot 10^{-9} \cdot t^4 - 1,35 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 - 1,68 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 2,65 \cdot 10^{-4} \cdot t - 8,97 \cdot 10^{-3} \quad (7.7)$$

Výrobce udává chybu nuly gyroskopu v závislosti na teplotě $\pm 0,3^\circ/\text{s}$ pro rozsah teplot -10 až $+60^\circ\text{C}$ a chybu nuly akcelerometru $\pm 18 \text{ mg}$ pro rozsah teplot -40 až $+125^\circ\text{C}$. Těmto údajům odpovídají i naměřené závislosti, kdy posun nuly v závislosti na teplotě nepřekročil v daném teplotním rozsahu limitní hodnoty udávané výrobcem.

7.2.1.2 Invensense MPU 6050

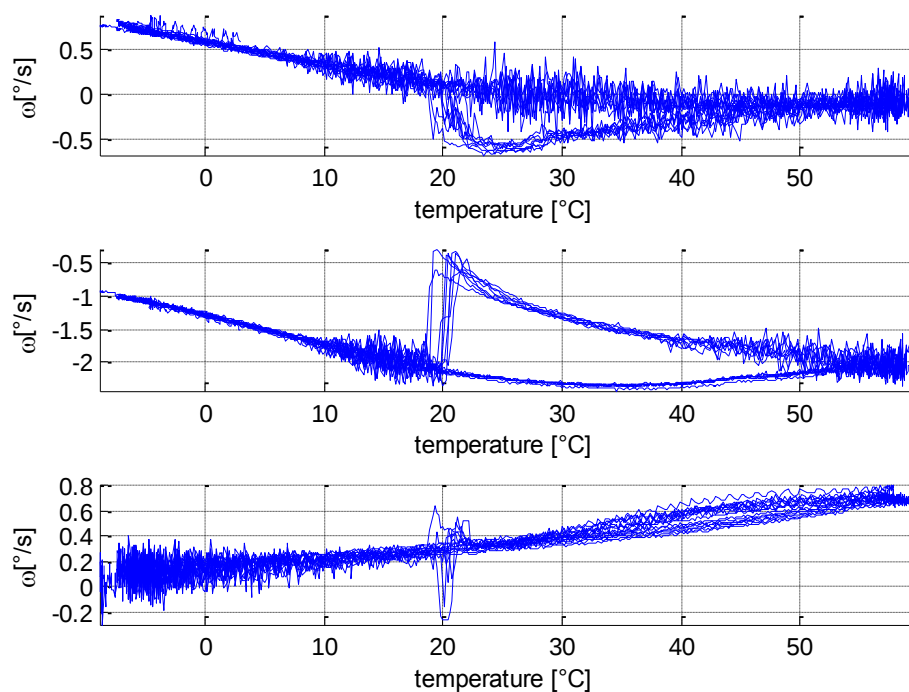
Rozsah testovaných teplot byl a podmínky měření byly stejné jako v předchozím případě, jelikož měření probíhala současně. Výstup teplotního snímače na vývojové desce ukazuje Graf 7.9.



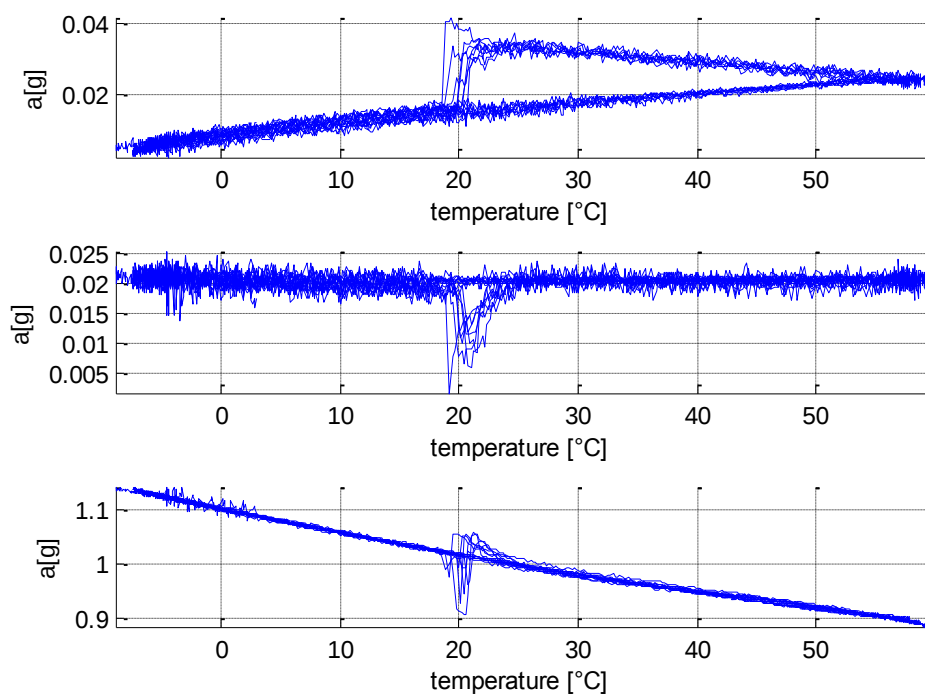
Graf 7.9 Průběh skokového testu teplotní závislosti na MPU 6050

Naměřená data výstupů ze snímačů byla vynesena do závislosti na naměřené teplotě. Výsledné závislosti jsou zobrazeny na následující straně (viz Graf 7.10 a Graf 7.11). Získané závislosti vykazují velkou hysterezi, a tudíž nebyla popisována závislost výstupu na teplotě. Zjištěné odchylky nuly v závislosti na teplotě však spadají do mezí udávanými výrobcem, kromě osy z akcelerometru (cca $\pm 100 \text{ mg}$).

Výrobce udává chybu nuly gyroskopu v závislosti na teplotě $\pm 20^\circ/\text{s}$ pro rozsah teplot -40 až $+85^\circ\text{C}$ a chybu nuly akcelerometru $\pm 35 \text{ mg}$ (osa x, y) a $\pm 60 \text{ mg}$ (osa z) pro rozsah teplot 0 až $+70^\circ\text{C}$.



Graf 7.10 Teplotní závislost gyroskopu MPU6050 (osy X,Y,Z shora dolu)



Graf 7.11 Teplotní závislost akcelerometru MPU6050 (osy X,Y,Z shora dolu)

7.3 Měření citlivosti gyroskopu

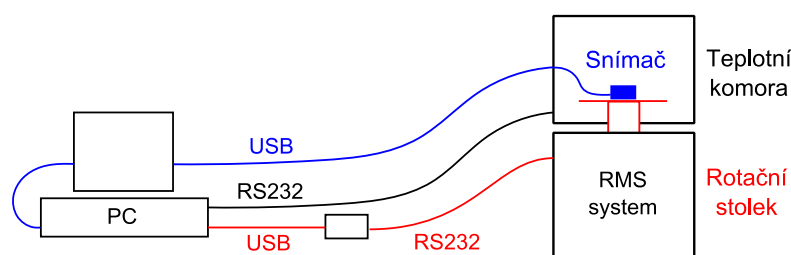
Pro měření citlivosti gyroskopu byl použit systém RMS SDL 05 [26], což je přesný rotační stůl s teplotní komorou. Obě zařízení lze ovládat po sériové lince standardu RS 232, základní parametry tohoto systému jsou:

Teplotní komora

Teplotní rozsah	Max. rychlost chlazení	Max. rychlost ohřevu	Přesnost
-65 / +180 °C	3 °C /min	2,5°C /min	± 1 °C

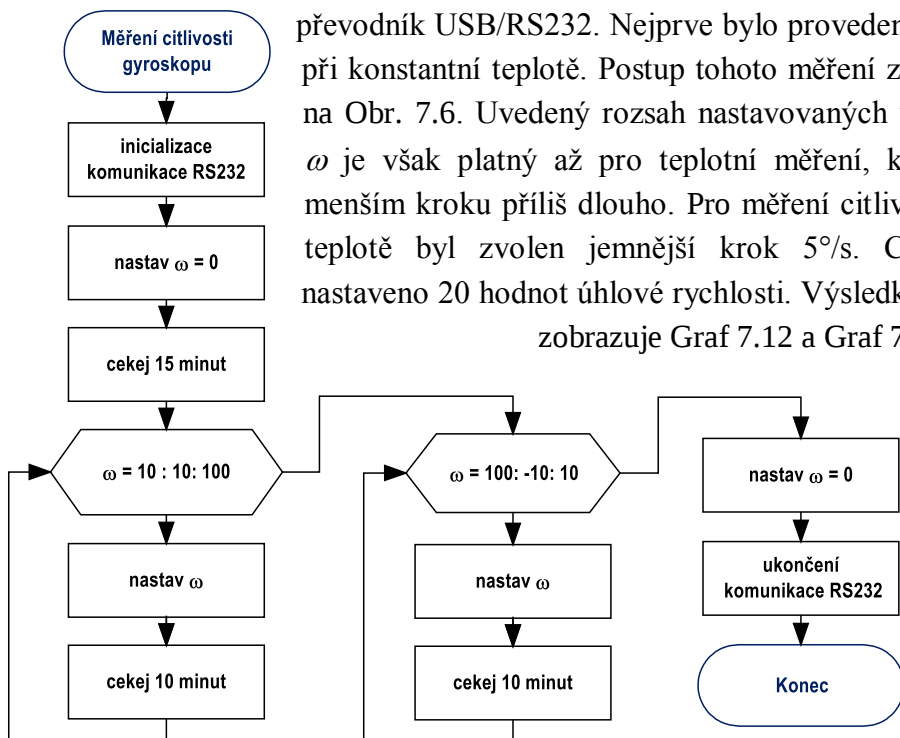
Rotační stůl

Rychlostní rozsah	Max. zátěž	Přesnost nast. rychlosti	Rychlostní rozlišení
0 / 1000 °/s	25 kg	< ±0.0001%	0,00001 °/s



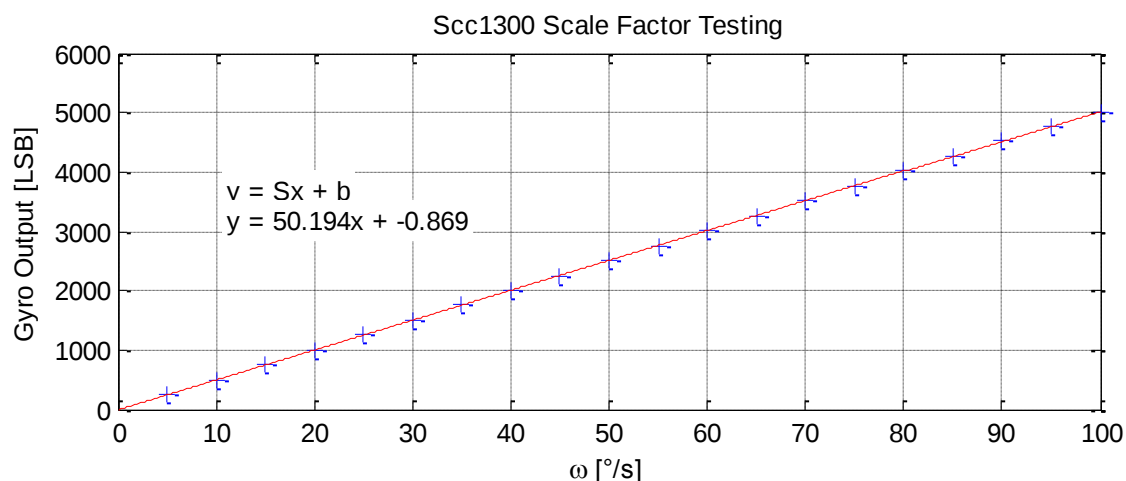
Obr. 7.5 Měření citlivosti gyroskopu

Měření citlivosti gyroskopu bylo provedeno pro snímač Sccl300. Rozsah nastavovaných úhlových rychlostí byl zvolen přes celý udávaný rozsah snímače, a to od 0 do 100 °/s. Znázornění experimentu je na Obr. 7.5. Jelikož byl na PC k dispozici pouze jeden výstupní konektor sériového rozhraní, byl rotační stůl připojen přes převodník USB/RS232. Nejprve bylo provedeno měření citlivosti při konstantní teplotě. Postup tohoto měření znázorňuje diagram na Obr. 7.6. Uvedený rozsah nastavovaných úhlových rychlostí ω je však platný až pro teplotní měření, které by trvalo při menším kroku příliš dlouho. Pro měření citlivosti při konstantní teplotě byl zvolen jemnější krok 5°/s. Celkem tedy bylo nastaveno 20 hodnot úhlové rychlosti. Výsledky měření citlivosti



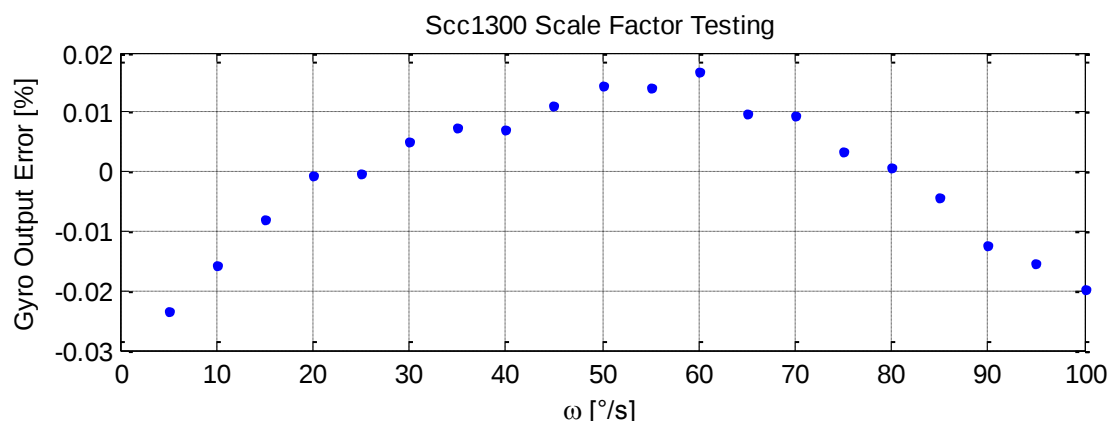
Obr. 7.6 Diagram postupu měření citlivosti gyroskopu

Zpracování naměřených dat probíhalo tak, že z naměřených hodnot byly postupně vybrány časové úseky odpovídající jednotlivým rychlostem, tj. deset minut na každé rychlosti. Pro každou rychlost se poté vypočítala střední hodnota a vynesla do grafu, kdy na ose x byla vždy působící úhlová rychlost a na ose y průměrná hodnota výstupu gyroskopu jako výstupní číslo [LSB]. Po vynesení všech středních hodnot se danou závislostí proložila přímka lineární regrese, jejíž koeficient odpovídá zjištěné citlivosti (viz Graf 7.12).



Graf 7.12 Výsledná závislost měření citlivosti gyroskopu

Naměřená citlivost je tedy 50,194 LSB/ $^{\circ}/s$, což lze interpretovat jako přesně 50 LSB/ $^{\circ}/s$, poněvadž rozlišení výstupu gyroskopu je 1 LSB. Tato hodnota přesně odpovídá údajům od výrobce, který uvádí 50 LSB/ $^{\circ}/s$.



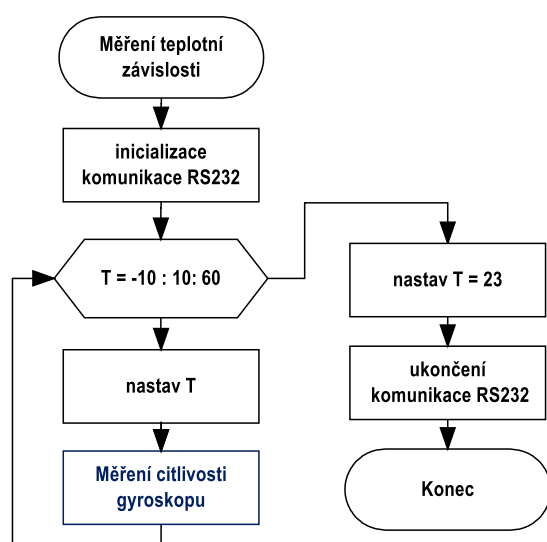
Graf 7.13 Vykreslené odchylky od linearity pro měření citlivosti gyroskopu

Pro přesnější popis chování citlivosti na jednotlivých rychlostech slouží výpočet odchylky od linearity na jednotlivých rychlostech. Odchylka byla počítána jako rozdíl průměrné rychlosti od hodnoty lineární regrese, dělený rozsahem měřených rychlostí, čili 100. Jednotlivé odchylky od linearity znázorňuje Graf 7.13.

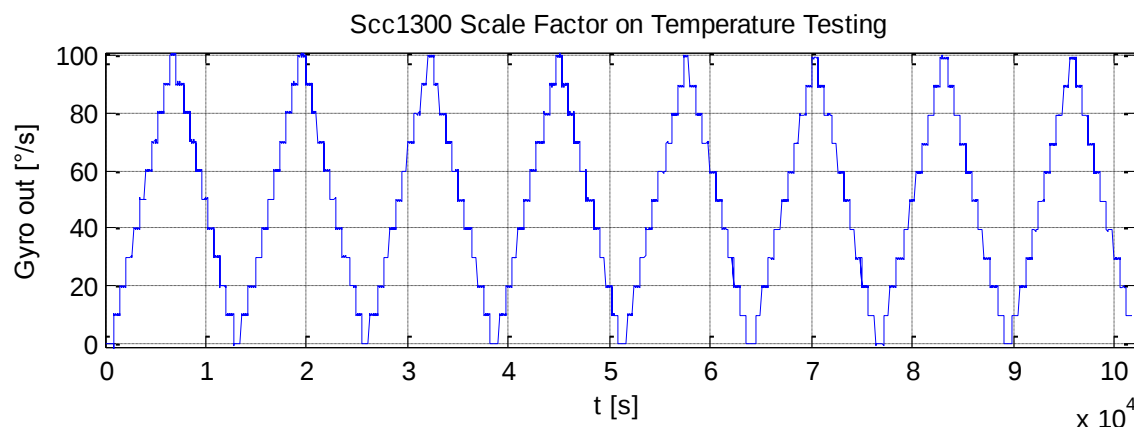
Z tohoto grafu lze také vyčíst maximální hodnotu odchylky od linearity (nelinearity), která je -0.024% pro rychlost $5^\circ/\text{s}$, zjištěná hodnota je na minimu vzhledem k udávanému rozlišení snímače $0,02^\circ/\text{s} \sim 0,02\%$ (poněvadž při dělení rozsahem se dělí 100 a následně se jím násobí při výpočtu $\%$). Nelinearita udávaná výrobcem je $\pm 0,5\%$ (z rozsahu 0 až $100^\circ/\text{s}$).

7.3.1 Závislost citlivosti na teplotě

Toto měření se lišilo od předchozího tím, že měření citlivosti již nebylo při konstantní teplotě, ale bylo provedeno pro každou s nastavovaných teplot. Snímač byl umístěn v teplotní komoře, ve které byly teploty jednotlivých měření nastavovány od -10 do $+60^\circ\text{C}$ s krokem $+10^\circ\text{C}$. Pro každou teplotu bylo provedeno měření citlivosti pro rozsah nastavovaných úhlových rychlostí od 10 do $100^\circ/\text{s}$, s krokem $10^\circ/\text{s}$ (směrem

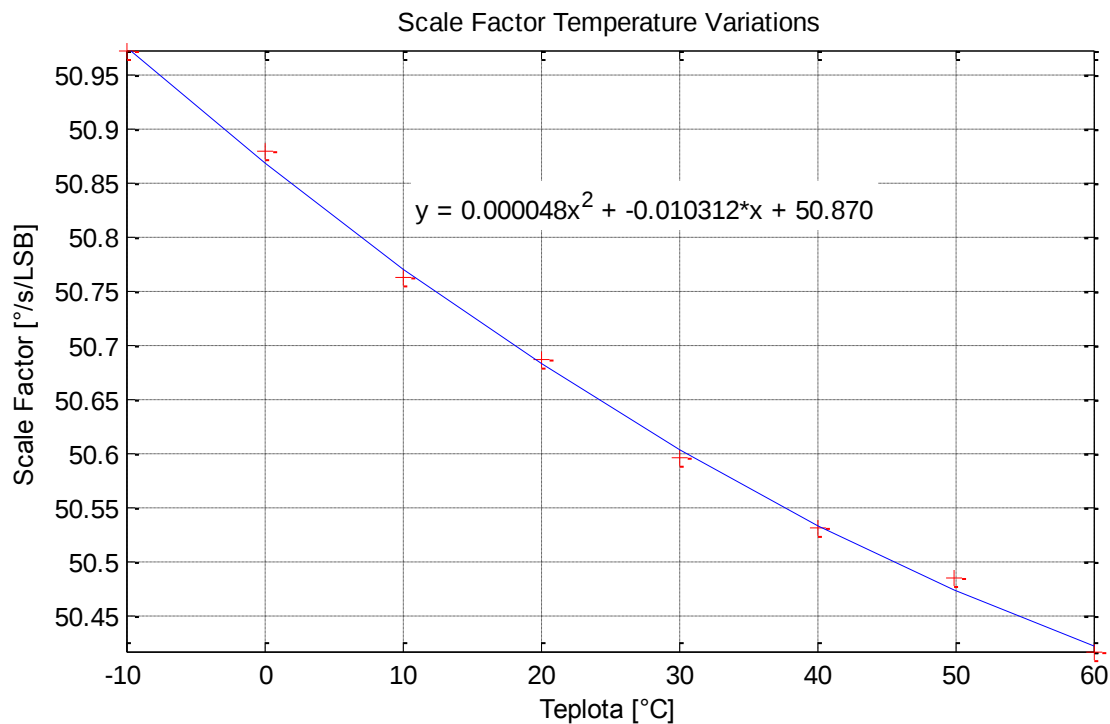


nahoru i dolů) jak znázorňuje diagram na Obr. 7.6. Diagram postupu měření teplotní závislosti pomocí vytvořeného programu v LabView, poté znázorňuje Obr. 7.7. Rotační stolek i teplotní komora byly ovládány s řídicí aplikace přes sériové rozhraní. Postup programu byl následující. Nejprve byla teplotní komoře nastavena požadovaná teplota, následně se čekalo 15 minut na ustálení a poté se teprve spustil rotační stolek. Na každé rychlosti ze sekvence se čekalo 10 minut, po projití celé sekvence se nastavila další teplota a celý proces se opakoval. Naměřená výstupní data z gyroskopu zobrazuje Graf 7.14.



Graf 7.14 Výstup gyroskopu z měření teplotní závislosti citlivosti

Naměřená data byla zpracována obdobně jako v případě měření citlivosti pro konstantní teplotu, kdy totožné vyhodnocení proběhlo osmkrát, pro každou z teplot. Jednotlivé zjištěné citlivosti (*scale factor*) pro jednotlivé teploty, byly vyneseny do grafu a proloženy polynomem 2. řádu, jelikož je patrná spíše exponenciální závislost (viz Graf 7.15).

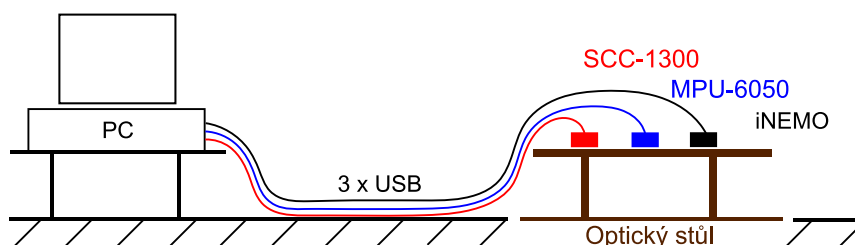


Graf 7.15 Výsledná teplotní závislost gyroskopu

Naměřená závislost citlivosti gyroskopu na teplotě se neliší o více než 1 LSB, tudíž lze konstatovat velkou stabilitu citlivosti na rozsahu měřených teplot, která spadá do rozsahu udávaného výrobcem. Chyba citlivosti v závislosti na teplotě udávaná výrobcem je $\pm 1\%$, pro teplotní rozsah -40 až +125 °C.

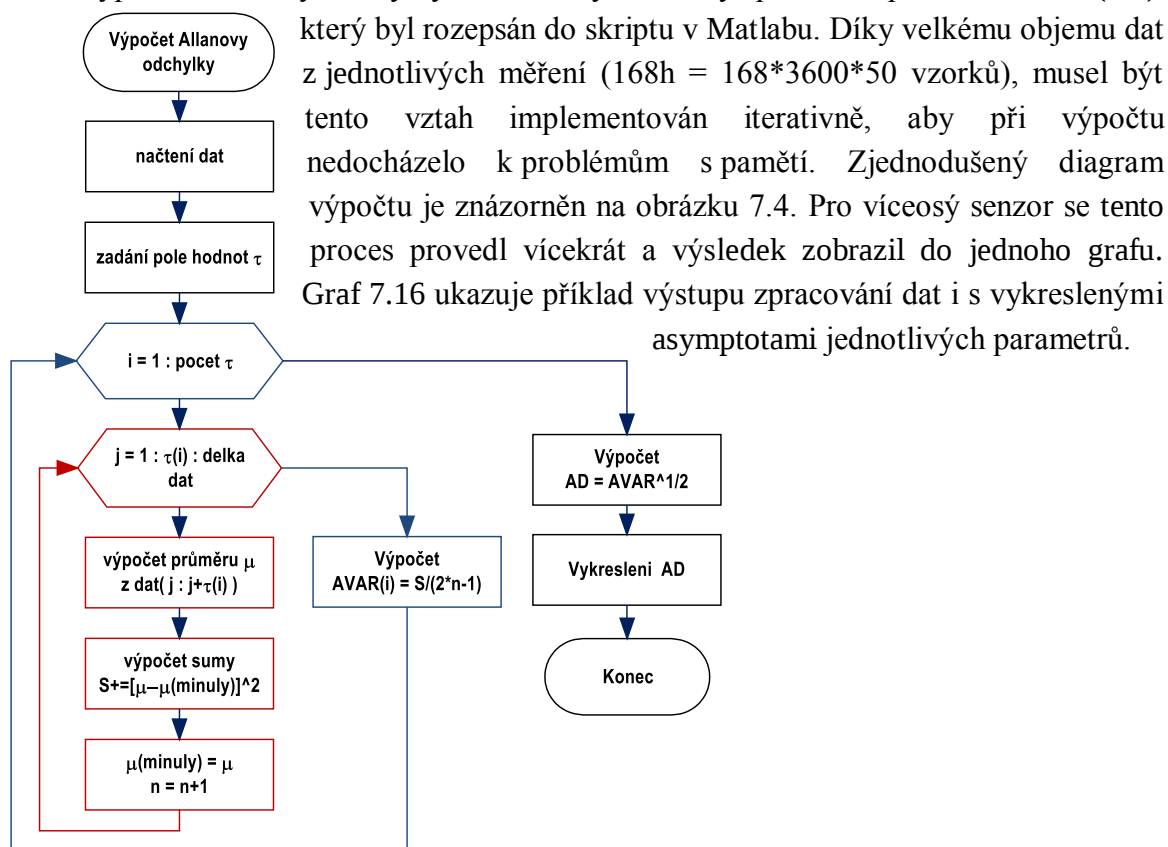
7.4 Alanova odchylka

Jako stěžejní část práce bylo zvoleno změření šumových parametrů inerciálních snímačů pomocí této metody. Měření Allanovy odchylky bylo provedeno na všech třech senzorech, které byly k dispozici. Pro dosažení vyšší přesnosti byla zvolena doba měření 7 dní (168h). Pro každý senzor bylo měření provedeno dvakrát, jednou doma při pokojové teplotě a jednou v klimatizované laboratoři na optickém stole, vibračně odděleném od okolí (viz Obr. 7.8). Asymptotické parametry (N, B, K) byly získány z přesnějšího měření v laboratoři a jsou uvedeny v tabulkách pod jednotlivými grafy Allanových odchylek (viz jednotlivé podkapitoly). Jediný senzor, u kterého jsou uvedeny parametry zjistitelné pomocí Allanovy odchylky je SCC1300, jehož katalogový list uvádí *angle random walk* (ARW) a *bias instability* (BI).

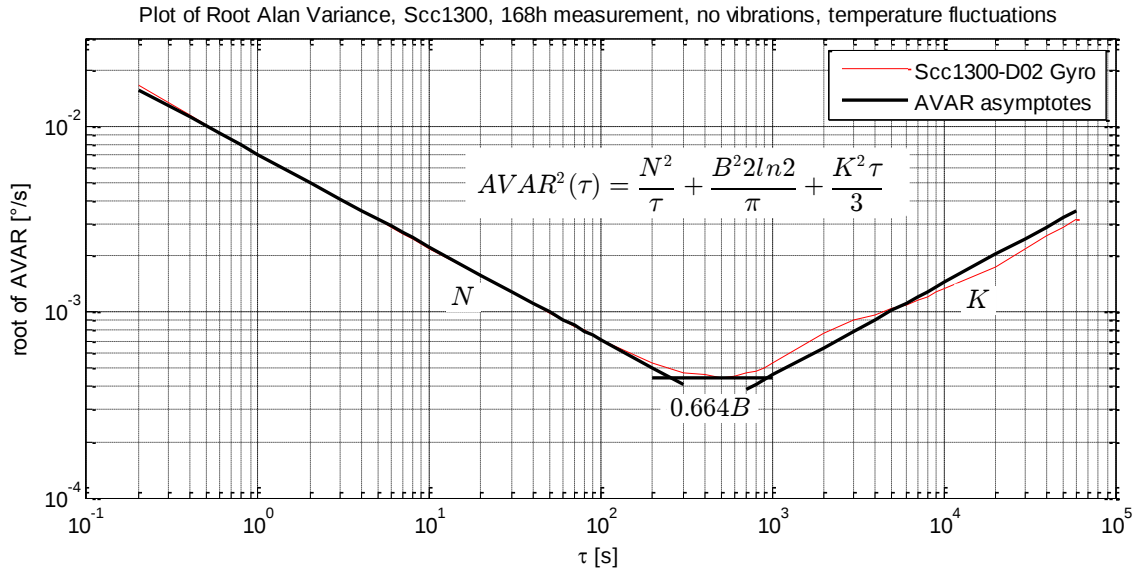


Obr. 7.8 Měření Allanovy odchylky

Výpočet Allanovy odchylky z naměřených dat byl proveden pomocí vzorce (6.9),



Obr. 7.9 Diagram výpočtu Allanovy odchylky



Graf 7.16 Alanova odchylka se zjištěnými asymptotickými parametry

Využitím vztahu (6.11) lze určit přesnost metody pro odhad jednotlivých koeficientů. Šumové parametry jsou získány pomocí AVAR provedené nad daty o délce měření 168h při vzorkovací frekvenci 50 Hz (u všech senzorů). Přesnost metody pro jednotlivé koeficienty je určena jako:

Koeficient N je odečten u grafu pro $\tau = 1s$, tomu odpovídá $n = 50$, chyba odhadu ε_N je poté rovna:

$$\varepsilon_N = \frac{1}{\sqrt{2 \left(\frac{168 \cdot 3600 \cdot 50}{50} - 1 \right)}} = 9,092 \cdot 10^{-4} \cong 0,1 \% \quad (7.8)$$

Koeficient N je odečten u všech měření senzorů pro stejný čas τ , proto i přesnost odhadu ε_n bude u všech snímačů stejná, tudíž přesnost u těchto parametrů není již uvedena v tabulkách pod grafy jednotlivých závislostí Allanovy odchylky.

Parametry *angle random walk* a *velocity random walk* jsou tedy určeny s přesností metody 0,1%.

Výstupní jednotky jsou pro gyroskopy $60.[^\circ/\sqrt{s}] = [^\circ/\sqrt{h}]$ a pro akcelerometry $60.[m/s/\sqrt{s} = g.\sqrt{s}] = [m/s/\sqrt{h} = g.s/\sqrt{h}]$.

Koeficient B je určen z minima zjištěné závislosti, jelikož nalezené minimum může být pro různé τ , bude se i přesnost lišit podle τ , například pro $\tau = 500$ s bude přesnost ε_B , rovna:

$$\varepsilon_B = \frac{1}{\sqrt{2\left(\frac{168 \cdot 3600}{500} - 1\right)}} = 0,0203 \cong 2 \% \quad (7.9)$$

Přesnost metody určení koeficientu B je uvedena v tabulkách pod jednotlivými grafy Allanových odchylek.

Odhad přesnosti pro **koeficient K** je již obtížnější, jelikož pro delší časy se přesnost snižuje a koeficient byl zjišťován proložením stoupající části odpovídající asymptotou a postupným doladěním koeficientu tak, aby vkládaná asymptota odpovídala získané závislosti, tato metoda byla však pracná a zdoluhavá, proto jsem přistoupil k odhadu koeficientu jednodušším způsobem. Koeficient K byl zjišťován pouze pro Scc1300 a MPU6050. Všechny závislosti AVAR těchto snímačů mají polovinu přímky o sklonu +1/2 před časem nebo pro čas $\tau = 1 \cdot 10^4$ s, u některých však koncová část AVAR neodpovídá přesně požadovanému sklonu, proto jsem pro odečet K zvolil $\tau = 1 \cdot 10^4$ s, kdy je přesnost odhadu nižší a tudíž více odpovídající. Parametr K se pro $\tau = 1 \cdot 10^4$ s zjistí podle vztahu:

$$\sigma_K^2(\tau) = \frac{K^2 \tau}{3} \Rightarrow K = \sqrt{\frac{3\sigma_K^2(\tau)}{\tau}} \quad (7.10)$$

Jelikož vyjde přesnost odhadu pro všechny snímače stejná, není taktéž zobrazena u hodnot v tabulkách pod grafy jednotlivých závislostí.

Chyba odhadu ε_K pro toto $\tau = 1 \cdot 10^4$ s je rovna:

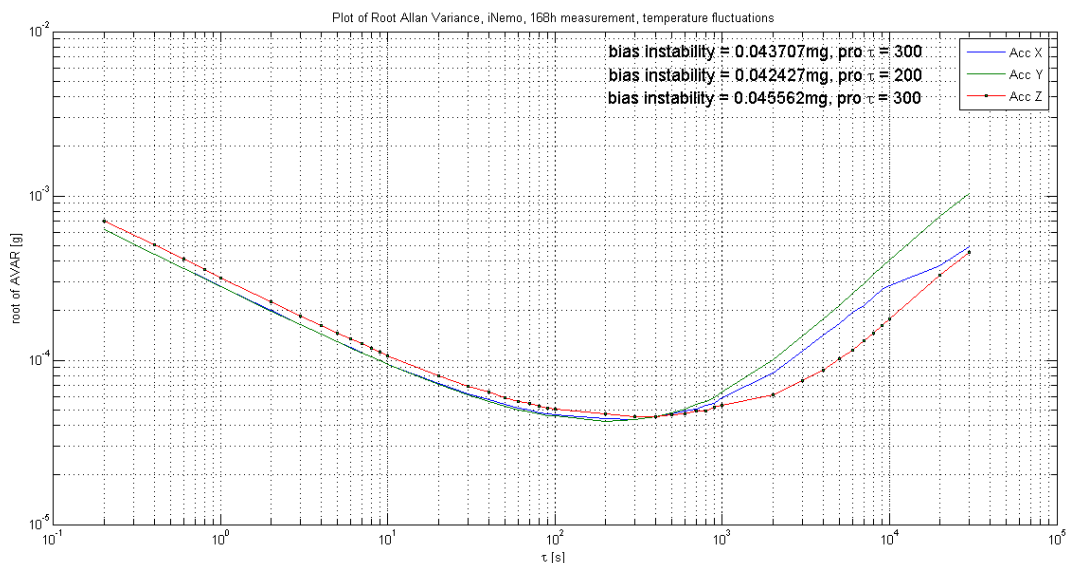
$$\varepsilon_K = \frac{1}{\sqrt{2\left(\frac{168 \cdot 3600}{10000} - 1\right)}} = 0,0917 \cong 9 \% \quad (7.11)$$

Parametry *rate random walk* a *acceleration random walk* byly tedy zjištěny s přesností metody 9%.

Výstupní jednotky jsou pro gyroskopy $60.[^\circ/\sqrt{s}] = [^\circ/\sqrt{h}]$ a pro akcelerometry $60.[g/\sqrt{s}] = [g/\sqrt{h}]$.

7.4.1 STmicroelectronics iNemo

7.4.1.1 Akcelerometr

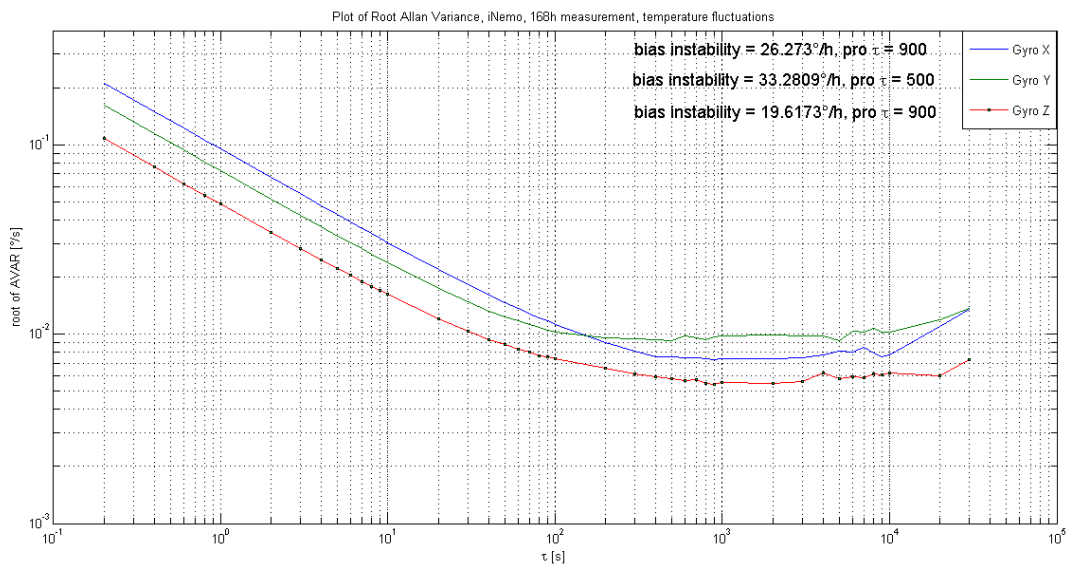


Graf 7.17 Allanova odchylka akcelerometru iNemo

Tabulka 7.1 Zjištěné parametry z AD akcelerometru iNemo

Osa	Velocity Random Walk	Bias Instability
X	$2,8 \cdot 10^{-4} \text{ g} \cdot \sqrt{\text{s}} = 0,0168 \text{ g} \cdot \text{s} \cdot \sqrt{\text{h}}$	$4,37 \pm 0,069 \cdot 10^{-5} \text{ g} (\tau=300\text{s})$
Y	$2,8 \cdot 10^{-4} \text{ g} \cdot \sqrt{\text{s}} = 0,0168 \text{ g} \cdot \text{s} \cdot \sqrt{\text{h}}$	$4,24 \pm 0,054 \cdot 10^{-5} \text{ g} (\tau=200\text{s})$
Z	$3,1 \cdot 10^{-4} \text{ g} \cdot \sqrt{\text{s}} = 0,0186 \text{ g} \cdot \text{s} \cdot \sqrt{\text{h}}$	$4,55 \pm 0,072 \cdot 10^{-5} \text{ g} (\tau=300\text{s})$

7.4.1.2 Gyroskop



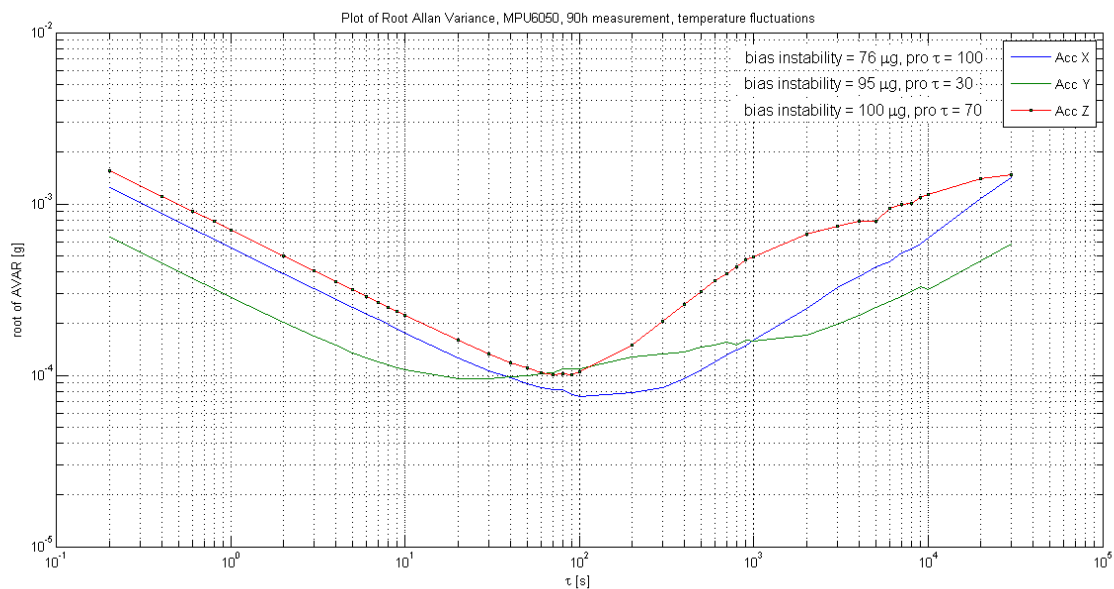
Graf 7.18 Allanova odchylka gyroskopu iNemo

Tabulka 7.2 Zjištěné parametry z AD gyroskopu iNemo

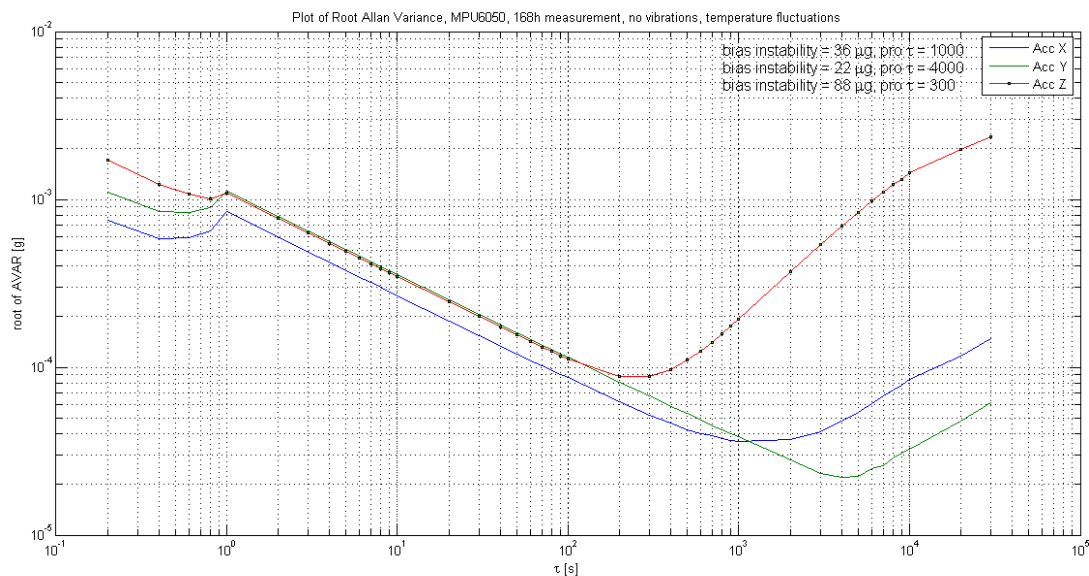
Osa	Angle Random Walk	Bias Instability
X	$9,5 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ/\sqrt{\text{s}} = 5,70 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{h}}$	$26,27 \pm 0,72 \text{ }^\circ/\text{h} (\tau=900\text{s})$
Y	$7,1 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ/\sqrt{\text{s}} = 4,26 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{h}}$	$33,28 \pm 0,67 \text{ }^\circ/\text{h} (\tau=500\text{s})$
Z	$4,9 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ/\sqrt{\text{s}} = 2,94 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{h}}$	$19,61 \pm 0,53 \text{ }^\circ/\text{h} (\tau=900\text{s})$

7.4.2 Invensense MPU 6050

7.4.2.1 Akcelerometr



Graf 7.19 Allanova odchylka akcelerometru MPU6050 (doma)

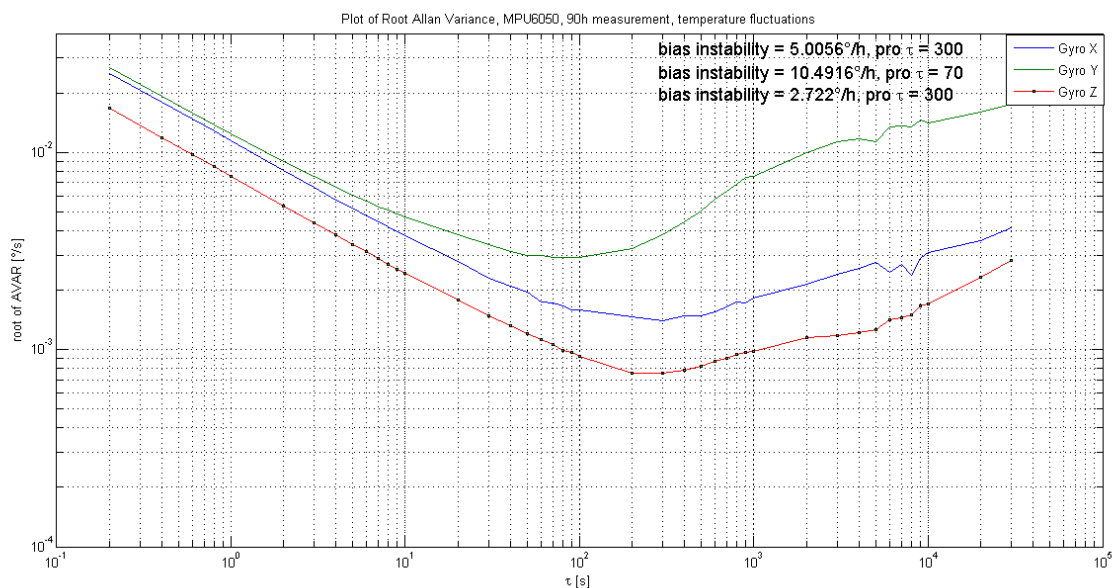


Graf 7.20 Allanova odchylka akcelerometru MPU6050 (lab)

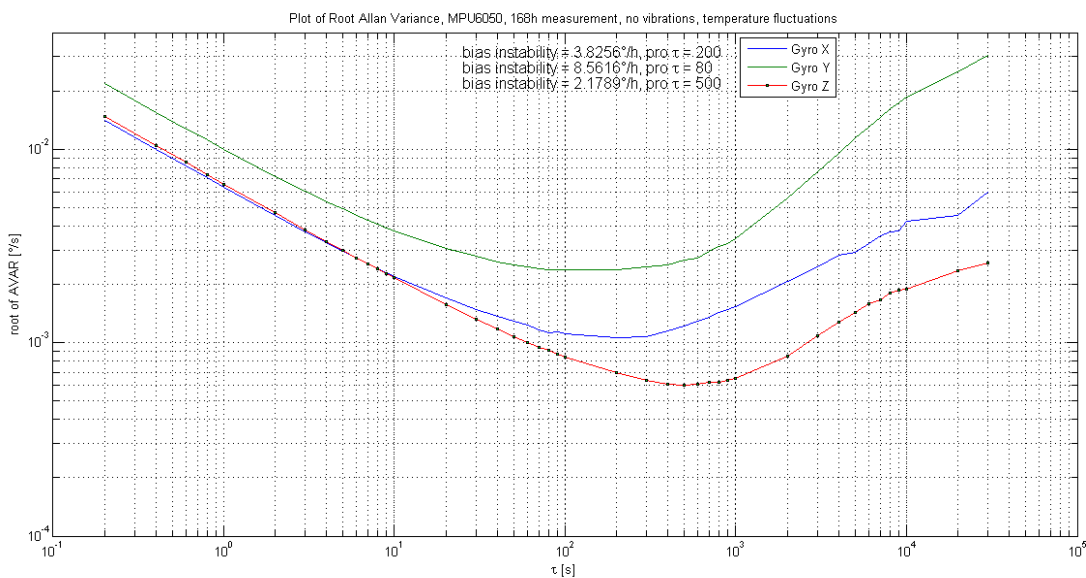
Tabulka 7.3 Zjištění parametry z AD akcelerometru MPU6050

Osa	Velocity Random Walk	Bias Instability	Accel. Random Walk
X	$8,42 \cdot 10^{-4} \text{ g} \cdot \sqrt{\text{s}} = 0,05 \text{ g} \cdot \text{s} \cdot \sqrt{\text{h}}$	$3.6 \pm 0.10 \cdot 10^{-5} \text{ g} (\tau = 1000\text{s})$	$1,46 \mu\text{g} / \sqrt{\text{s}} = 87,6 \mu\text{g} / \sqrt{\text{h}}$
Y	$1,1 \cdot 10^{-3} \text{ g} \cdot \sqrt{\text{s}} = 0,067 \text{ g} \cdot \text{s} \cdot \sqrt{\text{h}}$	$2.2 \pm 0.12 \cdot 10^{-5} \text{ g} (\tau = 4000\text{s})$	$0,56 \mu\text{g} / \sqrt{\text{s}} = 33,6 \mu\text{g} / \sqrt{\text{h}}$
Z	$1,12 \cdot 10^{-3} \text{ g} \cdot \sqrt{\text{s}} = 0,066 \text{ g} \cdot \text{s} \cdot \sqrt{\text{h}}$	$8.8 \pm 0.14 \cdot 10^{-5} \text{ g} (\tau = 300\text{s})$	$24,84 \mu\text{g} / \sqrt{\text{s}} = 149 \mu\text{g} / \sqrt{\text{h}}$

7.4.2.2 Gyroskop



Graf 7.21 Allanova odchylka gyroskopu MPU600 (doma)



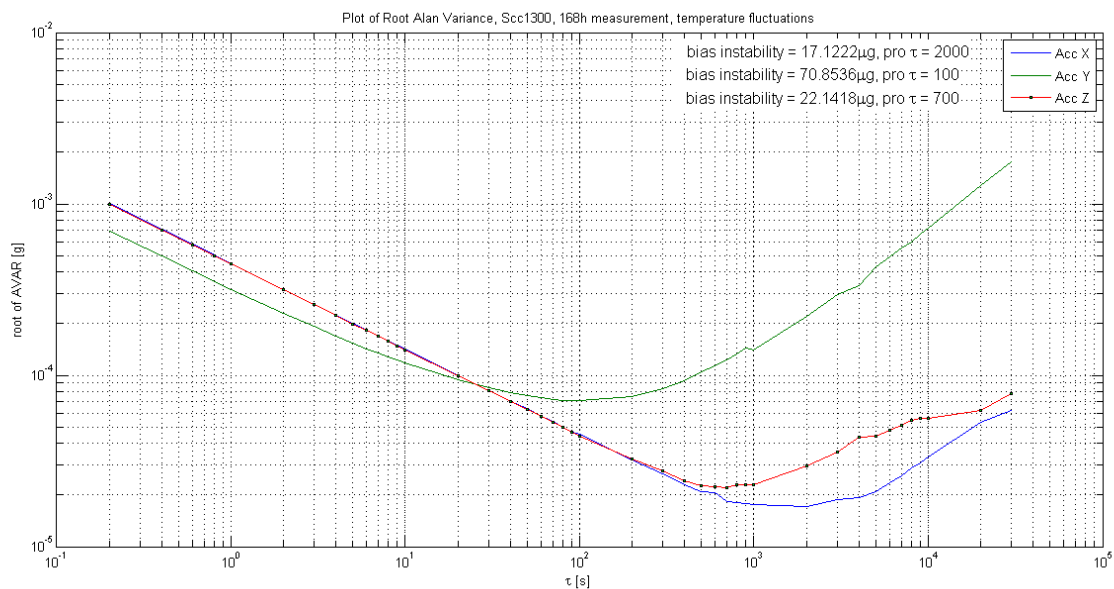
Graf 7.22 Allanova odchylka gyroskopu MPU6050 (lab)

Tabulka 7.4 Zjištěné parametry z AD gyroskopu MPU6050

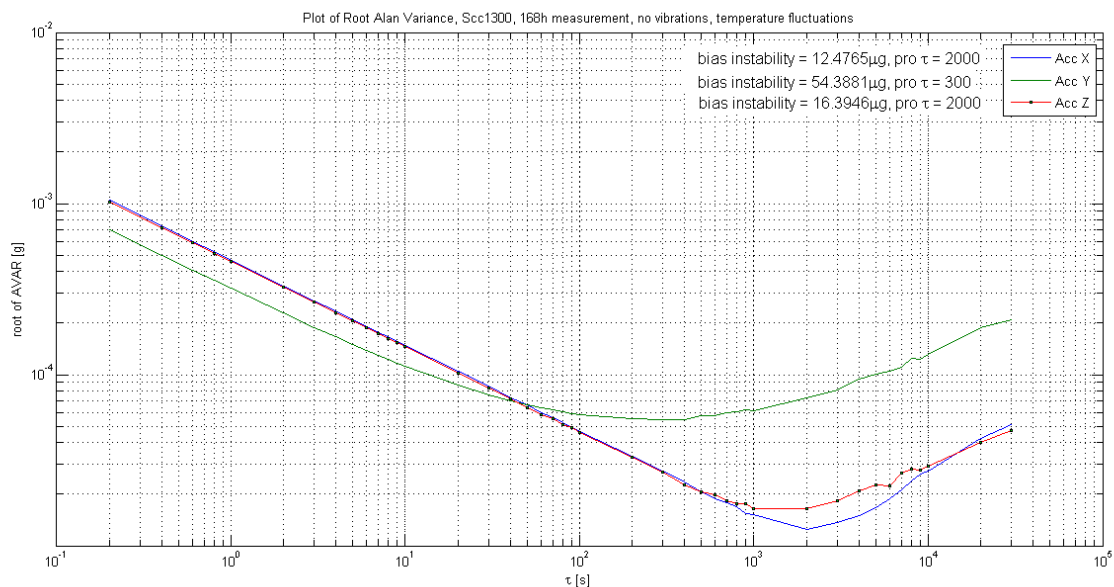
Osa	Angle Random Walk	Bias Instability	Rate Random Walk
X	$6,4 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ/\sqrt{s} = 0,38 \text{ } ^\circ/\sqrt{h}$	$3,82 \pm 0,05 \text{ } ^\circ/h \text{ } (\tau=200s)$	$7,3 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/s/\sqrt{s} = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ/s/\sqrt{h}$
Y	$9,9 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ/\sqrt{s} = 0,59 \text{ } ^\circ/\sqrt{h}$	$8,56 \pm 0,07 \text{ } ^\circ/h \text{ } (\tau=80s)$	$32,3 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/s/\sqrt{s} = 19,4 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ/s/\sqrt{h}$
Z	$6,6 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ/\sqrt{s} = 0,39 \text{ } ^\circ/\sqrt{h}$	$2,18 \pm 0,04 \text{ } ^\circ/h \text{ } (\tau=500s)$	$3,3 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ/s/\sqrt{s} = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ/s/\sqrt{h}$

7.4.3 Murata Scc1300-D02

7.4.3.1 Akcelerometr



Graf 7.23 Allanova odchylka akcelerometru Scc1300 (doma)

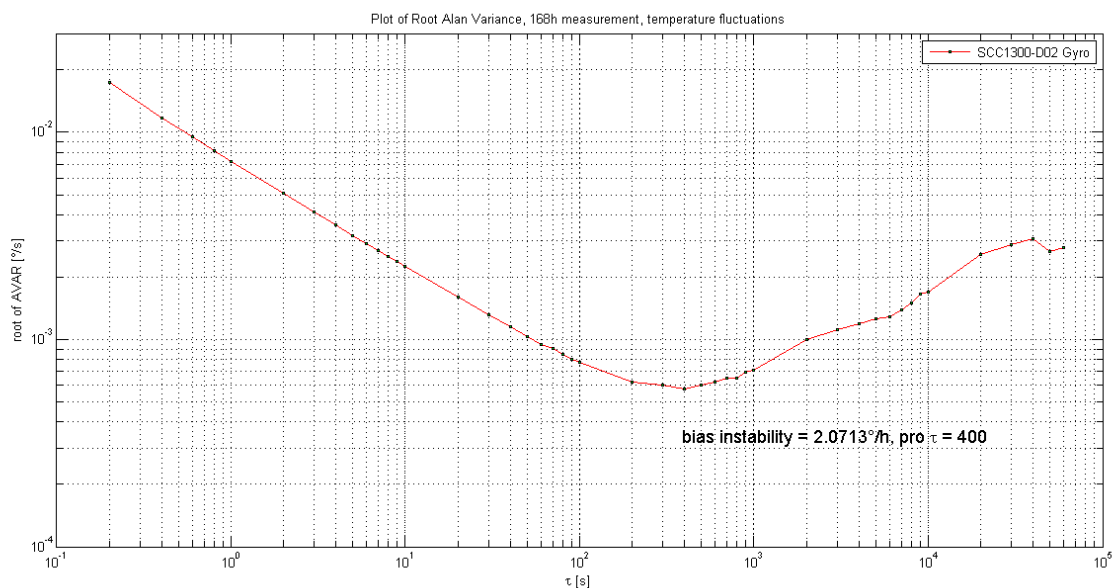


Graf 7.24 Allanova odchylka akcelerometru Scc1300 (lab)

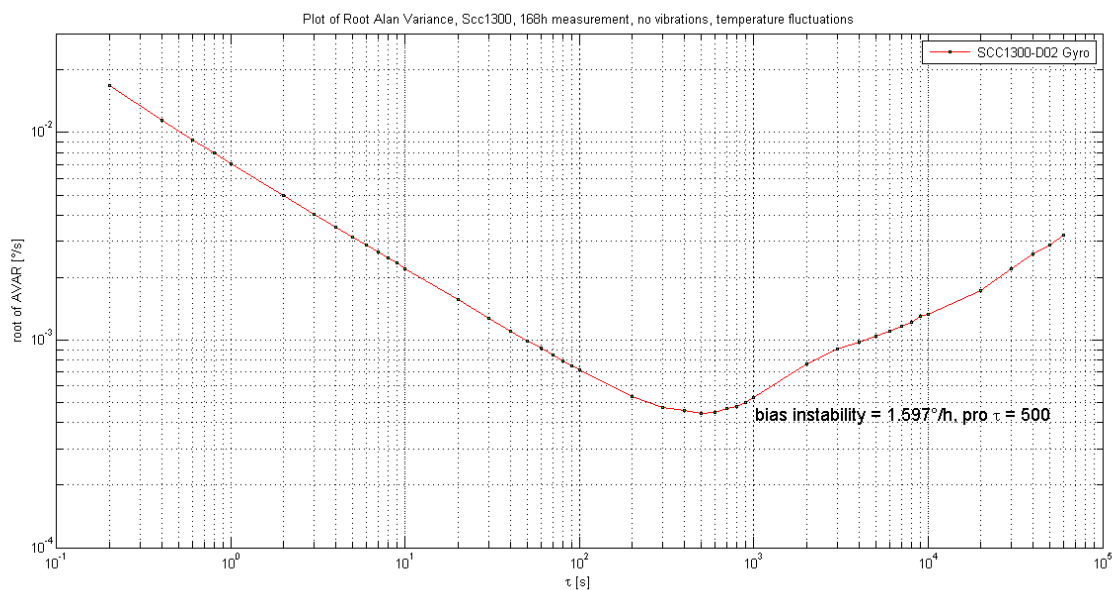
Tabulka 7.5 Zjištěné parametry z AD akcelerometru Scc1300

Osa	Velocity Random Walk	Bias Instability	Accel. Random Walk
X	4,67. 10 ⁻⁴ g. $\sqrt{s}$ = 0,028g.s/ $\sqrt{h}$	12.48 $\pm$ 0.51.10 ⁻⁵ g (τ =2000s)	0,47 μ g/ $\sqrt{s}$ = 28,3 μ g/ $\sqrt{h}$
Y	3,19. 10 ⁻⁴ g. $\sqrt{s}$ = 0,019g.s/ $\sqrt{h}$	54.39 $\pm$ 0.86.10 ⁻⁵ g (τ =300s)	2,29 μ g/ $\sqrt{s}$ = 137,2 μ g/ $\sqrt{h}$
Z	4,58. 10 ⁻⁴ g. $\sqrt{s}$ = 0,027g.s/ $\sqrt{h}$	16.39 $\pm$ 0.67.10 ⁻⁵ g (τ =2000s)	0,50 μ g/ $\sqrt{s}$ = 30,3 μ g/ $\sqrt{h}$

7.4.3.2 Gyroskop



Graf 7.25 Allanova odchylka gyroskopu Scc1300 (doma)



Graf 7.26 Allanova odchylka gyroskopu Scc1300 (lab)

Tabulka 7.6 Zjištěné parametry z AD gyroskopu Scc1300

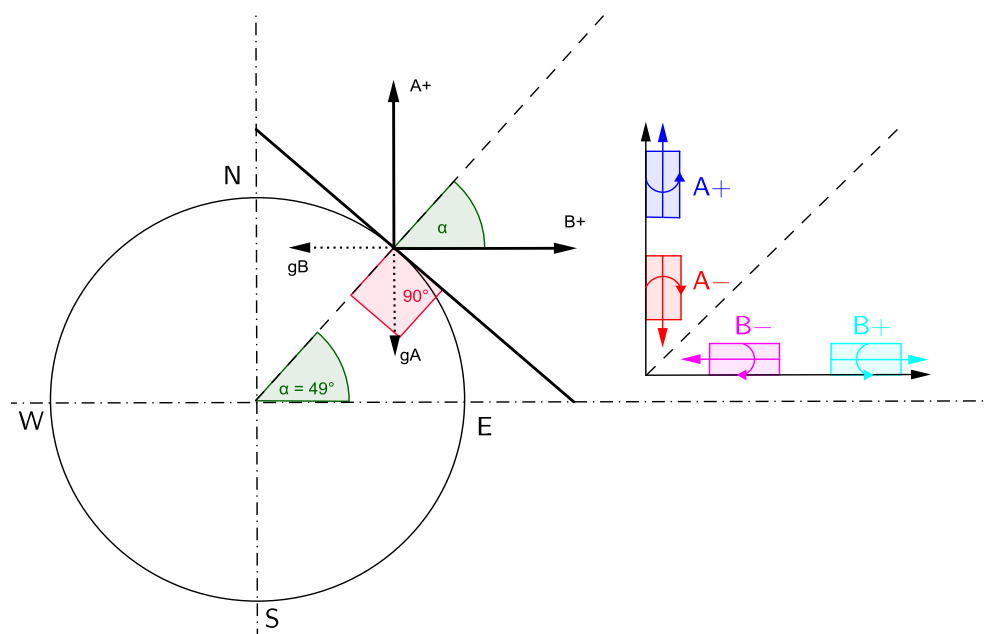
Osa	Angle Random Walk	Bias Instability	Rate Random Walk
X	0.007 °/√s = 0.42 °/√h	1.59±0.03 °/h ($\tau = 500$ s)	2.5.10 ⁻⁵ °/s/√s = 1.5 .10 ⁻³ °/s/√h

Údaje od výrobce jsou ARW = 0,45 °/√h a BI = 1 °/h.

7.5 Vlastní experiment

Jelikož jsem při studiu literatury potřebné k diplomové práci narazil na článek popisující měření zemské rotace pomocí MEMS senzoru a tím dokazující schopnost snímače zachytit tak nízkou úhlovou rychlost, která je běžně u MEMS snímačů ztracena v šumu. Rozhodl jsem se podobný experiment provést také, jelikož jsem měl doma k dispozici zapůjčené senzory. Pro měření jsem vybral ten nejpřesnější z nich a to gyroskop Scc1300, jehož naměřené Allanovy odchylky říkají, že při průměrování daný čas je rozptyl šumu $1,5 \text{ }^\circ/\text{h}$, tím pádem by bylo možné ve výstupu snímače rozlišit působící zemskou rotaci, která je $4.178074 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{s} \sim 15,041066 \text{ }^\circ/\text{h}$ podle standardu světového geodetického systému (WGS 84).

Idea měření pocházela s článku [35], kde však byl použit senzor Systron Donner HZ1-90-100A ($<0,006^\circ/\text{s/g}$) s uváděnou nižší citlivostí na g než Murata Scc1300 ($\pm 0,1^\circ/\text{s/g}$). U Scc1300 je však uveden jen rozsah hodnot a žádná typická, což může také značit, že daný parametr nebyl přesně zjišťován a ve skutečnosti je vliv g nižší.



Obr. 7.10 Měření zemské rotace

Měření bylo provedeno v Brně, které má zeměpisnou šířku $49^\circ 12' (\alpha)$. Znázornění experimentu je na obrázku 7.10. Gyroskop byl pomocí nakloněné roviny postupně umístěn citlivou osou do poloh A^+ , B^+ , A^- a B^- . V každém umístění proběhl sběr dat po dobu 20 hodin, pro dosažení lepší přesnosti. Aby na osu snímače působila zemská rotace v plné síle, musí nakloněná rovina, na níž je snímač umístěn směřovat k severu. Základní myšlenka je taková, že pokud se od sebe odečtou naměřené hodnoty ze směru A a B, eliminují se tím nežádoucí vlivy (offset, částečně vliv g) a výsledná hodnota bude odpovídat hodnotě zemské rotace

Výstup gyroskopu v jednotlivých směrech bude složen z těchto složek[35]:

$$\begin{aligned}
 \Omega_{A+} &= \omega_0 + \omega_{gAB} + \omega_{gAA} + \omega_E + \nu \\
 \Omega_{A-} &= \omega_0 + \omega_{gAB} - \omega_{gAA} - \omega_E + \nu \\
 \Omega_{B+} &= \omega_0 + \omega_{gBB} + \omega_{gBA} + \nu \\
 \Omega_{B-} &= \omega_0 - \omega_{gBB} + \omega_{gBA} + \nu
 \end{aligned}
 \tag{7.12}$$

, kde ω_0 je vliv nuly, ω_{gBB} , ω_{gBA} , ω_{gAB} , ω_{gAA} vliv g v jednotlivých osách, ω_E je zemská rotace a ν je působící šum. Pokud se jednotlivé výstupy odečtou následujícím způsobem, eliminují se nežádoucí vlivy nuly a zůstane snížený vliv g a šumu.

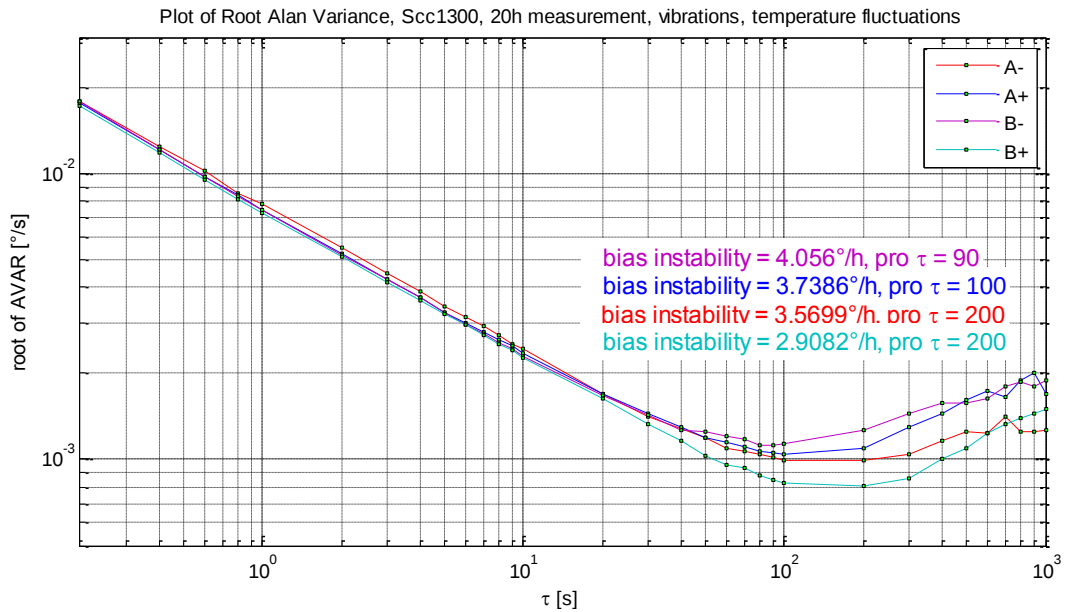
$$\begin{aligned}
 \omega_+ &= \Omega_{A+} - \Omega_{B+} = \omega_{gAB} + \omega_{gAA} - \omega_{gBB} - \omega_{gBA} + \omega_E + \nu \\
 \omega_- &= \Omega_{B-} - \Omega_{A-} = -\omega_{gBB} + \omega_{gBA} - \omega_{gAB} + \omega_{gAA} - \omega_E + \nu \\
 \omega_+ - \omega_- &= 2\omega_{gAB} - 2\omega_{gBA} + 2\omega_E + \nu
 \end{aligned}
 \tag{7.13}$$

Složky ω_{gBA} , a ω_{gAB} se dají vyjádřit jako:

$$\begin{aligned}
 \omega_{gAB} &= k_\omega \cdot g \cdot \sin \alpha \\
 \omega_{gBA} &= k_\omega \cdot g \cdot \cos \alpha \\
 \omega_{gAB} - \omega_{gBA} &= k_\omega \cdot g \cdot (\sin \alpha - \cos \alpha)
 \end{aligned}
 \tag{7.14}$$

, kde k_ω je koeficient vlivu lineárního zrychlení na citlivou osu gyroskopu. Vliv těchto složek lze zanedbat v případě, že je úhel $\alpha = 45^\circ$ (zeměpisná šířka). Pro zeměpisnou šířku Brna je vliv g na výsledek jen $(\sin 49^\circ - \cos 49^\circ) = 0,098g \cdot k_\omega$. Tudíž je vliv g zanedbán a výsledná hodnota zemské rotace vypočítána ze vztahu (7.13) jako:

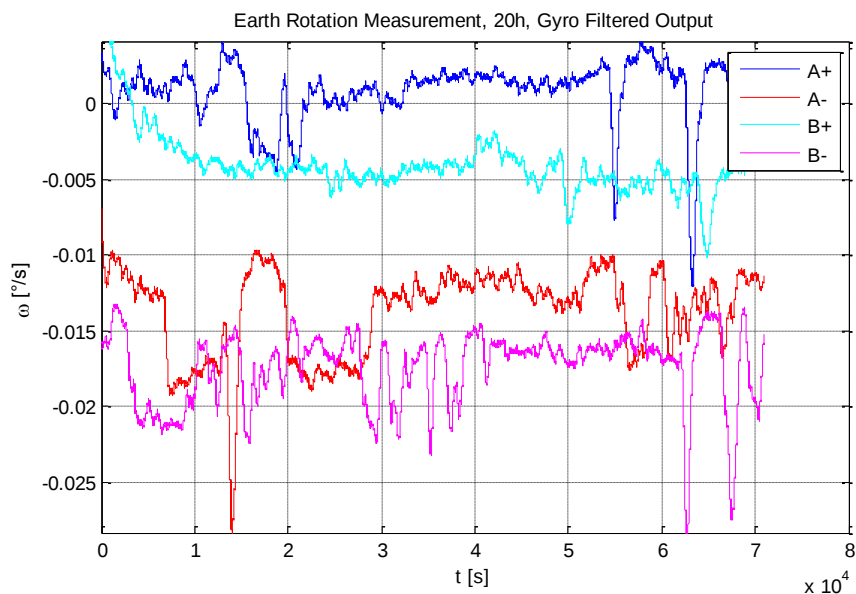
$$\omega_E = \frac{\omega_+ - \omega_-}{2} + \nu
 \tag{7.15}$$



Graf 7.27 AD výstupů snímače z měření zemské rotace

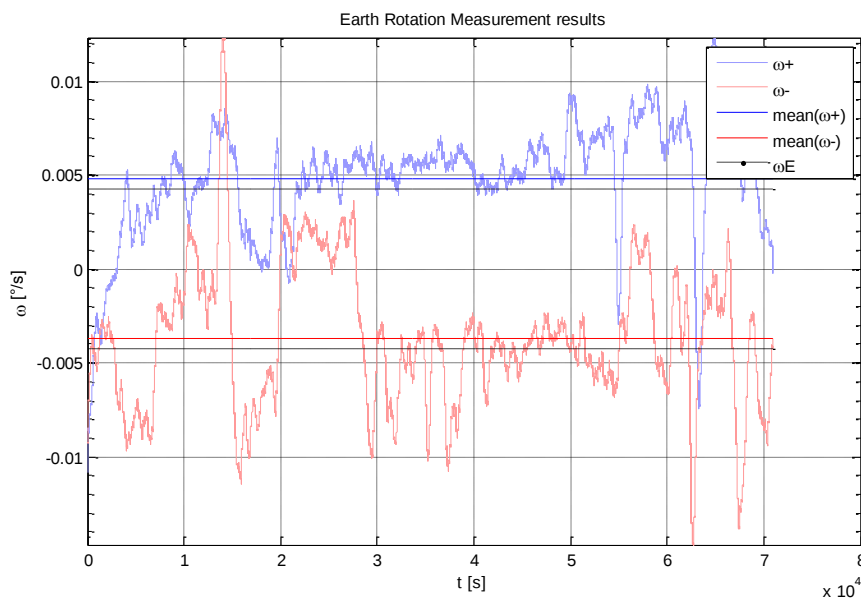
Z naměřených dat byla zpracována Allanova odchylka (Graf 7.27), aby bylo zřejmé, jestli je možné z dat hodnotu zemské rotace získat. Z grafu je vidět že pro všechny pozice snímače je úroveň šumu pro daný čas τ nižší než je rychlost zemské rotace.

Výstupy gyroskopu z jednotlivých pozic po zprůměrování plovoucím průměrem řádu odpovídajícímu τ je na grafu 7.28.



Graf 7.28 Přefiltrovaná data gyroskopu z měření zemské rotace

Po odečtení výstupů dle vztahu (7.13) vypadají výsledky následovně:



Graf 7.29 Výsledek měření zemské rotace

Z hodnot ω_+ a ω_- je poté vypočítán průměr a dle vztahu (7.15) zjištěna hodnota zemské rotace ω_E .

Změřená hodnota zemské rotace je $4.241 \cdot 10^{-3}$ °/s, tj. 15.269 °/h.

Udávaná hodnota zemské rotace je $4.178 \cdot 10^{-3}$ °/s, tj. 15.048 °/h.

7.6 Shrnutí

Veškeré programy pro zpracování dat byly napsány jako skripty v programu Matlab a jsou přiloženy na CD ve složkách podle jednotlivých měření. Pokud je ve složce i soubor se zdrojovými daty *.mat*, je možno kterýkoliv graf vykreslit opětovně spuštěním skriptu. Obslužné programy vytvořené v LabView pro automatické testování citlivosti gyroskopu a teplotních závislostí jsou taktéž přiloženy na CD.

Na zapůjčených senzorech byla provedena měření:

- statické měření nuly v závislosti na teplotě pro Scc1300 a MPU6050
- měření přechodové charakteristiky teplotních snímačů Scc1300
- dynamické měření citlivosti gyroskopu pro Scc1300
- dynamické měření citlivosti gyroskopu v závislosti na teplotě pro Scc1300
- statické měření Allanovy odchylky pro Scc1300, MPU6050 a iNemo
- statické měření zemské rotace pro Scc1300

U teplotních měření způsobovaly problémy vibrace komory způsobené kompresorem a větrákem vhánějícím vzduch, pro omezení vlivu vibrací byl omezen výkon větráku při měření na 50%. Zkusil jsem senzory umístit i na nosník tvořen tyčkou vedoucí otvorem do komory, který stál na vedlejším stole. Přes utěšňovací teplotní závěr komory se však vibrace na tyčku přenášeli a způsobovali ještě větší chybu. Senzory tedy při měření ležely volně v teplotní komoře, lze předpokládat, že působící vibrace měly přibližně nulovou střední hodnotu, a tudíž výsledné měření tolik neovlivňovaly.

Při měření citlivosti gyroskopu byl snímač upevněn na talíř rotačního stolku pomocí vyrobené konstrukce z úhelníků, upevnění bylo třeba provést co nejpřesněji, aby citlivá osa snímače nebyla odchýlena od osy rotace. Při testování ovládání systému RMS (teplotní komora a rotační stolek) přes sériovou linku, vypadávala komunikace vždy s částí připojenou přes převodník USB/RS232, zatímco přes přímé připojení na sériové rozhraní vše fungovalo pořádku. Bylo vyzkoušeno i vícero převodníků, komunikace však stále náhodně vypadávala. Pro část připojenou přes převodník jsem tedy nastavil co nejnižší komunikační rychlosti a v systému nastavil pro daný port co nejvyšší velikost FIFO zásobníku, poté se již měření podařilo uskutečnit.

Se statickým měřením pro zjištění Allanovy odchylky nebyly žádné markantní komplikace. Jelikož byly provedeny dvě stejně dlouhá statická měření v různých prostředích (doma a v laboratoři), lze z výsledných závislostí sledovat vliv vibrací prostředí, které vlastně zvyšují hladinu šumu a také jejich opakovatelnost.

V poslední podkapitole je popsán pokus měření zemské rotace, který se úspěšně podařil. Nepostradatelnou roli na výsledku měření má kromě metody výpočtu, dostatečný počet dat a správně zvolená doba průměrování z Allanových odchylek.

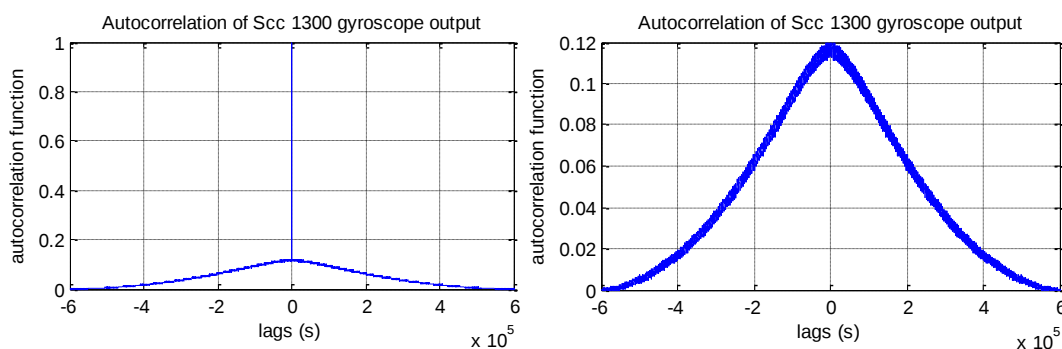
8 NÁVRH MODELU

[36, 37, 38]

Systematický model výstupu akcelerometru a gyroskopu je popsán rovnicemi v kapitole 6.1 (a také příloze B). Kdy systematické chyby je možno jednoduše modelovat jako násobení vstupní veličiny daným koeficientem. Problematickou část tvoří šum vstupující do modelu, který má podstatný vliv na výstup snímače. Tato kapitola se zabývá právě návrhem modelu výstupního šumu. Šum musí být modelován stochastickými procesy jelikož je náhodný. Cílem modelování je vygenerovat šum, který bude mít stejné charakteristiky jako reálný šum snímače. Nejprve je však třeba mít tyto charakteristiky k dispozici, aby bylo z čeho vycházet. Informace o charakteru šumu poskytuje právě naměřená Allanova odchylka, z níž lze vyčíst rozptyly jednotlivých projevujících se šumů (N,B,K).

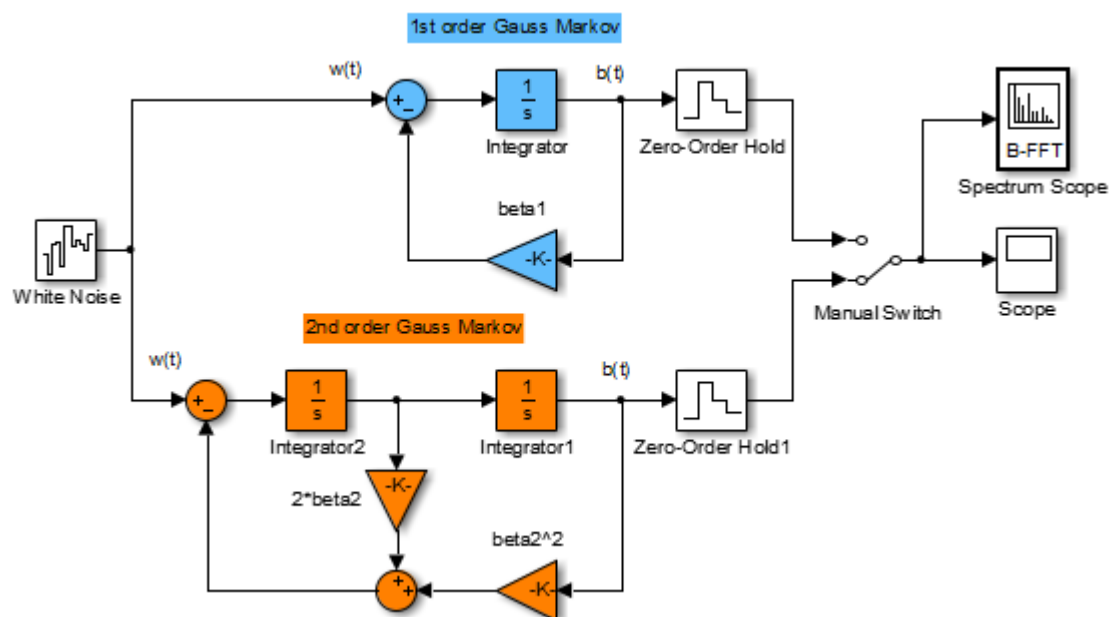
Pro modelování je však třeba získat diferenciální rovnici popisující daný proces, jelikož však parametry B a K mají iracionální spektrum, je i přenosová funkce odpovídajícího filtru iracionální a daný filtr je potřeba aproximovat racionální funkcí [36]. Jelikož je analytický postup aproximace diferenciálních rovnic popisující dané procesy, komplikovanější, nepodařilo se mi jej bohužel obsáhnout. Postupy stochastického modelování popisuje například disertační práce [38]. Zvolil jsem proto jiný postup.

Nejrychlejší způsob jednoduché analýzy popisující charakter výstupního šumu je autokorelační analýza. Návrh modelu jsem vyzkoušel na výstupu gyroskopu Scc1300. Nejprve jsem si vykreslil autokorelační funkci výstupu (příkaz `xcorr` v matlabu). Zníž je patrná korelace výstupního šumu. Autokorelační funkci a detail na spodní část znázorňuje Graf 8.1.



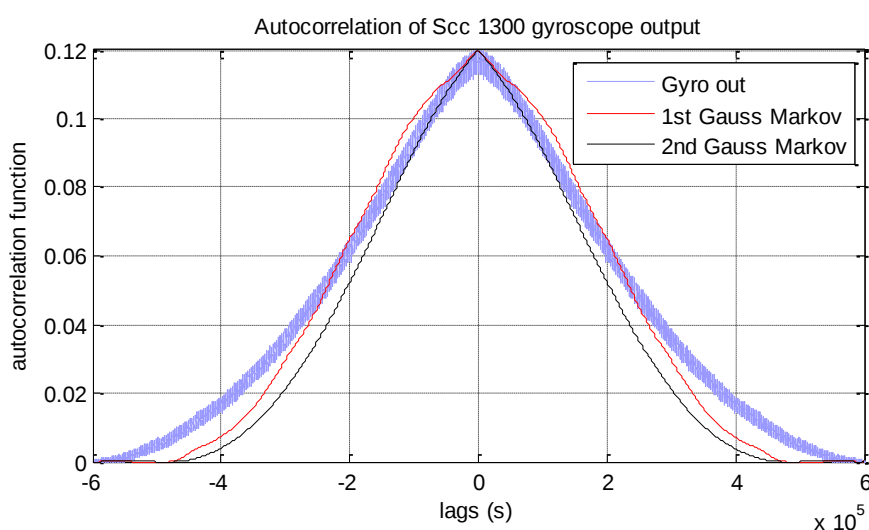
Graf 8.1 Autokorelační funkce výstupu gyroskopu

Na detailu autokorelační funkce je vidět že její tvar připomíná korelovaný Gaussův šum, tz. Gauss – Markovův proces (dále GM proces). Implementoval jsem tedy rovnice (dle [38]) pro GM proces prvního a druhého řádu. Vytvořený model těchto náhodných procesů je na Obr. 8.1. Jako vstupní hodnotu výkonu bílého šumu jsem zadal zjištěnou hodnotu koeficientu B, jelikož se tento proces používá pro modelování nestability nuly [37]. Hodnota zesílení zpětné vazby β odpovídá převrácené hodnotě odečteného korelačního času. Jelikož je GM proces exponenciální korelace, lze korelační čas odečíst pro hodnotu autokorelační funkce $1/e \cdot \text{maximum}$.



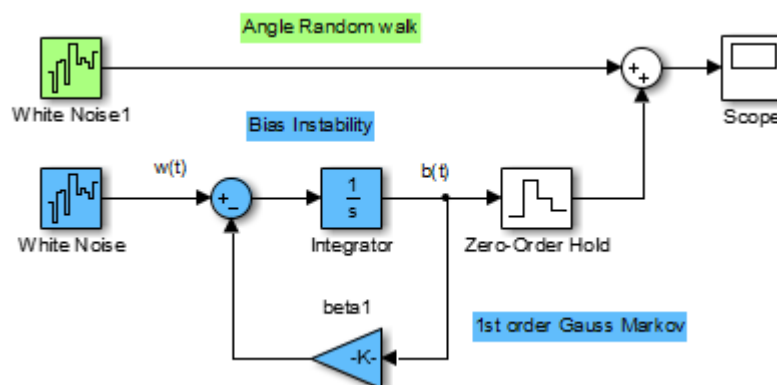
Obr. 8.1 Modelovaný GM proces prvního a druhého řádu

Na grafu 8.2 je vidět původní autokorelační funkce a autokorelační GM procesů prvního a druhého řádu. Vhodnější aproximaci v tomto případě poskytuje první řád.



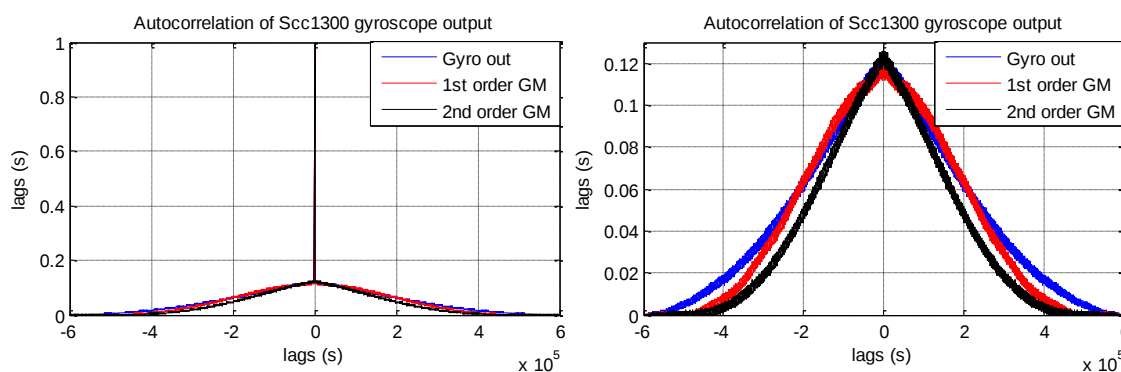
Graf 8.2 Srovnání autokorelačních funkcí modelu a gyroskopu

Porovnání autokorelačních funkcí však pouze ukazuje, který model je vhodnější použít, pro aproximaci spodní části autokorelační funkce. Aby generovaný šum statisticky odpovídal šumu gyroskopu, je potřeba přidat ke GM procesu ještě další zdroj šumu tak, aby složením autokorelačních funkcí obou šumů vznikl požadovaný tvar této funkce. Největším zdrojem výstupního šumu gyroskopu je *angle random walk*, jak ukazuje i Allanova odchylka. Tento proces se modeluje jako bílý šum, o daném výkonu odpovídajícímu parametru N . K modelu byl tedy přidán další zdroj šumu (viz Obr. 8.2).



Obr. 8.2 Model výstupu gyroskopu (N, B)

Aby si však korelační funkce modelu a gyroskopu odpovídaly, bylo nutné výkonové poměry jednotlivých zdrojů bílého šumu ještě experimentálně doladit, aby vykazovaly stejnou autokorelační funkci.



Graf 8.3 Výsledné srovnání autokorelačních funkcí gyroskopu a modelu

Výsledné autokorelační funkce jsou znázorněny na grafu 8.3, pro nastavené parametry:

rozptyl bílého šumu $ARW = 0.0001$ (source white noise variance)

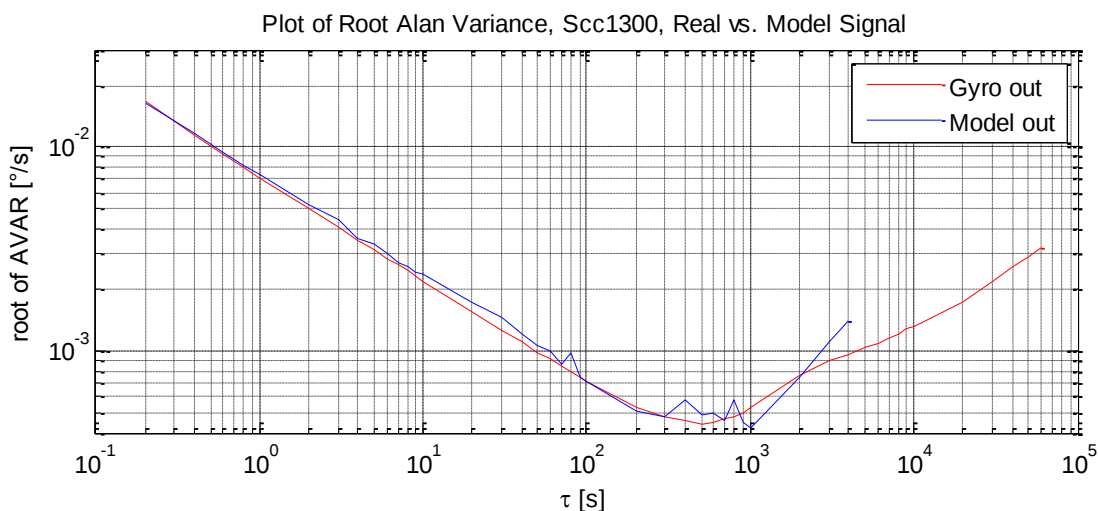
rozptyl vstupního bílého šumu $GM = 3.2 \cdot 10^{-11}$ (source white noise variance)

Model tedy reprezentuje dva druhy šumu projevujícího se u gyroskopu a to *angle random walk* a nestabilitu nuly (*bias instability*).

Pro ověření zdali vygenerovaný šum odpovídá naměřenému, byla vykreslena i Allanova odchylka modelu a srovnána s AD gyroskopu (viz Graf 8.4). Jelikož bylo modelem z hlediska časové úspory (hraničící s realizovatelností opakovaných spuštění) generováno méně vzorků, není Allanova odchylka vypočtena pro dlouhé časy. Srovnání počtu vzorků pro 168h měření je:

Model: $168 \cdot 3600 = 604800$ (vzorkovací čas 1s)

Gyroskop: $168 \cdot 3600 \cdot 50 = 30240000$ (vzorkovací čas 0,02s)



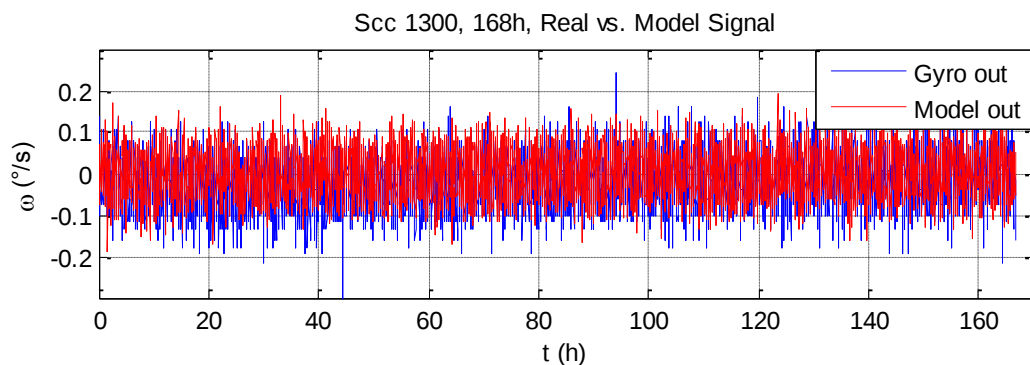
Graf 8.4 Srovnání Allanovy odchylky modelu a výstupu gyroskopu

Pro původně nastavené parametry vstupního šumu byla v oblasti ARW Allanova odchylka modelu mírně posunuta dolů oproti AD gyroskopu, to značí nižší výkon šumu. Aby charakter generovaného šumu odpovídal generovanému v AD, byly parametry ještě doladěny na:

rozptyl bílého šumu ARW = 0.0027 (*source white noise variance*)

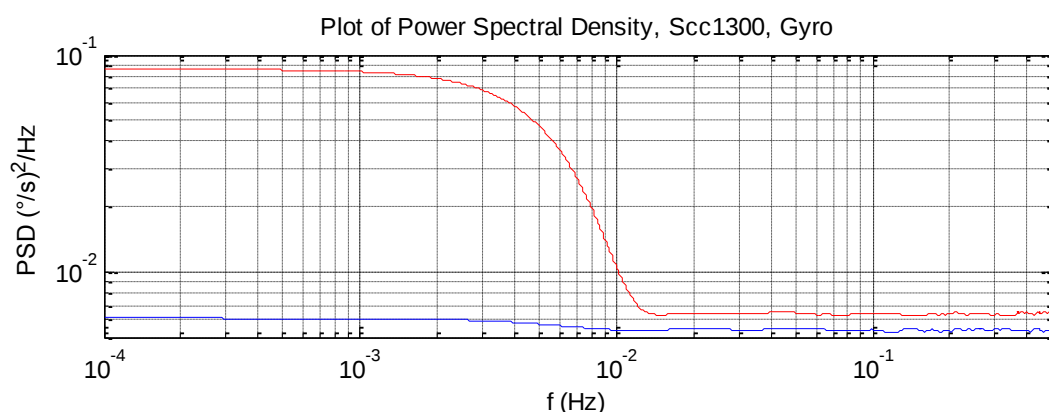
rozptyl vstupního bílého šumu GM = $1.1 \cdot 10^{-11}$ (*source white noise variance*)

S takto naladěným modelem, bylo provedeno srovnání výstupů modelu a gyroskopu, ještě i v časové (Graf 8.5) a frekvenční oblasti (Graf 8.6 a Graf 8.7).

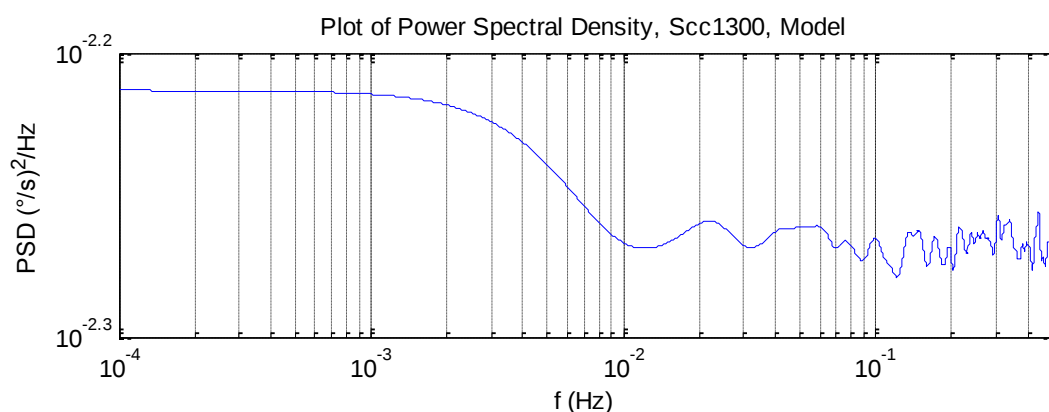


Graf 8.5 Srovnání výstupu modelu a gyroskopu v časové oblasti

Na níže uvedených spektrech je vidět podobnost průběhu frekvenční charakteristiky obou spekter, jednotlivé výkony se však liší, to může být kromě nepřesnosti aproximace také důsledek rozdílného počtu vzorků modelovaného a změřeného signálu. Spektra byly získány v Matlabu Welchovou metodou (funkce *pwelch*).

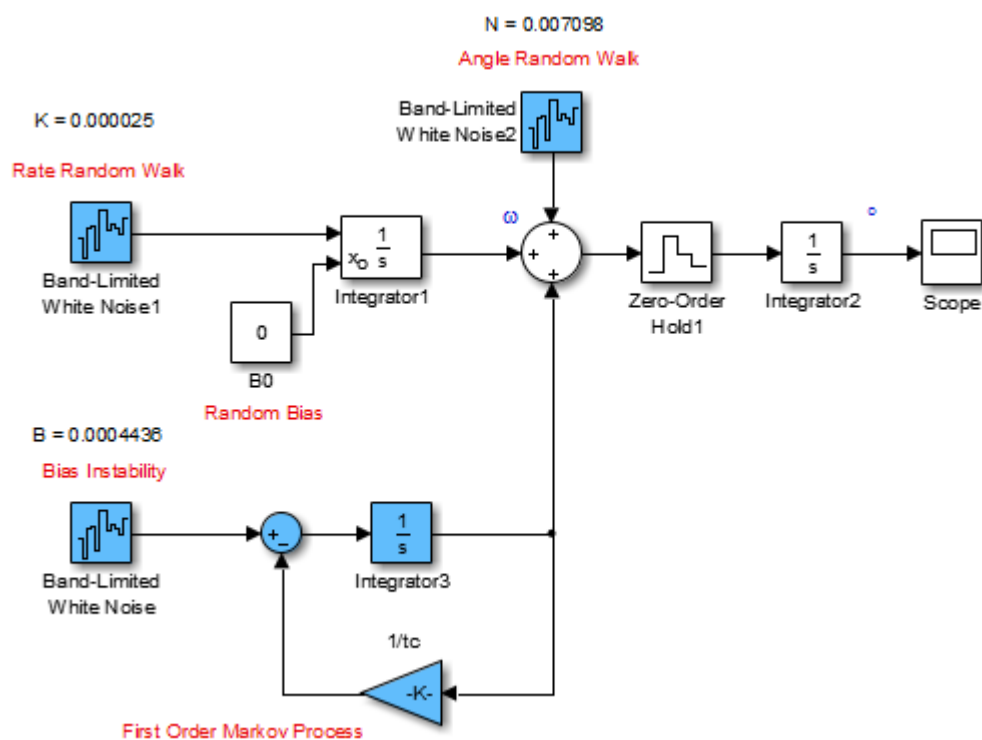


Graf 8.6 PSD výstupu gyroskopu



Graf 8.7 PSD výstupu modelu

Nesourodot generovaného šumu v jednotlivých doménách (autokorelace, AD, PSD), značí schopnost popisu charakteru šumu jednotlivých metod a také, že šumový výstup gyroskopu má složitější charakter, než jakým se jej snažíme aproximovat. Lze konstatovat, že čím více působících šumů se podaří charakterizovat a následně namodelovat, tím bude aproximace přesnější, návrh modelu ale na druhou stranu o to složitější. Pro základní modelování výstupního šumu postačí dva nejsilnější zdroje šumu a to ARW a nestabilita nuly (N,B). V případě, že by bylo potřeba modelovat výstup přesněji, lze k těmto šumům přidat ještě poslední zdroj šumu (zjištěný pomocí AD) *rate random walk* (RRW), který se projevuje jako integrovaný bílý šum. Model sestavený z těchto třech parametrů (N,B,K), poté znázorňuje Obr. 8.3.



Obr. 8.3 Model výstupu gyroskopu (N, B, K)

9 ZÁVĚR

V rámci této diplomové práce jsem měl možnost seznámit se s problematikou měření MEMS inerciálních snímačů, principy jejich funkce a využití, a také s metodami jejich modelování.

Zadání práce bylo koncipováno tak, aby výsledek tvořil navržený model, simulující výstup inerciálního snímače. Model tvořil však pomyslnou špičku ledovce, k dosažení které vedla dlouhá cesta. Jednotlivé cíle práce byly:

- seznámit se s principy inerciálních snímačů
- popsat chyby vyskytující se u těchto snímačů
- provést průzkum trhu s cílem najít senzor s nejlepším poměrem cena/výkon
- seznámit se s metodikou testování
- popsat způsob modelování chyb
- proměřit statické a dynamické parametry
- navrhnout model výstupu snímače

Principy inerciálních snímačů spolu s jejich uváděnými chybami jsou uvedeny v 2. a 3. kapitole. Následující kapitola 4. uvádí průzkum trhu, jehož výstupem jsou dvě tabulky srovnávající vybrané gyroskopy a akcelerometry. Jen někteří výrobci uvádějí všechny srovnávané parametry, proto jsou některé sloupce volné. V další kapitole jsou uvedeny vybrané metodiky testování akcelerometrů a gyroskopů, na které navazuje 6. kapitola popisující způsob modelování snímačů pomocí naměřených systematických a stochastických parametrů. Zde je potřeba zdůraznit uvedenou metodu Allanovy odchylky (podkapitola 6.2), která tvořila stěžejní bod práce, jelikož popisuje stejnými metodami chybový model výstupu gyroskopů i akcelerometrů a umožňuje relativně jednoduché odečtení hledaných parametrů. Následující 7. kapitola prezentuje provedená praktická měření, kdy byly provedeny kromě statických měření i dynamická měření gyroskopu a vlastní experiment. Za výsledky jednotlivých měření jsou vždy uvedeny parametry udávané výrobcem. Předposlední 8. kapitola uvádí postup vytvoření navrženého modelu výstupu snímače. Model byl vytvořen pro gyroskop Scc1300, ale je platný i pro ostatní snímače při zadání jim odpovídajících parametrů zjištěných z Allanových odchylek.

Zadání se z pohledu zadávající firmy podařilo splnit, poněvadž byly proměřeny Allanovy odchylky a teplotní závislosti nuly snímačů MPU6050 a Scc1300. Což byl minimální požadavek, jelikož se počítalo s časovou náročností jednotlivých měření a vyskytujícími se komplikacemi.

Jelikož nic není ideální, vyskytlo se při realizaci jednotlivých měření, kromě běžných záležitostí, spousta problémů způsobující nemalé zdržení. Například vypadávající výstup snímače MPU6050, kdy bylo při kontrole naměřených dat z několikahodinového testu, zjištěn výpadek zhruba v polovině měření. Celý test se poté musel opakovat. Problémy s MPU6050 měli za následek to, že dynamické testy byly provedeny jen pro gyroskop snímače Scc1300, jelikož výstup vypadal skoro již při každém testu. Naštěstí se pro tento senzor povedlo proměřit alespoň teplotní závislost nuly a Allanovy odchylky, které byly měřeny již dříve. Další problémy způsoboval převodník mezi rozhraním USB a sériovou linkou, kdy jsem například spustil řídicí program v LabView pro měření závislosti citlivosti gyroskopu s nastavenými časy čekání jen několik sekund, abych vyzkoušel, zdali celý program funguje správně a celá sekvence projde až do konce. Při tomto testování vše proběhlo v pořádku a celý algoritmus prošel až do konce. Po spuštění ostrého měření jsem však po několika hodinách, kdy jsem měření přišel zkontrolovat, zjistil výpadek komunikace a měření se tudíž zastavilo. To bylo nepříjemné, jelikož dané měření trvalo zhruba 24h a výpadky se při dalších pokusech opakovali po náhodném čase. Problém se však podařilo vyřešit otestováním různých převodníků a rychlostí komunikace. Ostatní měření proběhla celkem bez problémů, i tak jsem díky velkému rozsahu prováděných měření, neměl mnoho času na poslední část práce návrhu modelu, proto jsem se snažil co nejjednodušeji a nejefektivněji navrhnout šumový model výstupu, daná problematika by však potřebovala pro lepší porozumění více času.

Díky této práci jsem se naučil něco z oblasti měření a modelování inerciálních snímačů, o kterých jsem předtím mnoho nevěděl a díky řadě se vyskytujících problémů, jsem také získal užitečné zkušenosti, za které jsem rád.

Literatura

- [1] AGGARWAL, P., Z. SYED, Z. NOURELDIN a N. EL-SHEIMY. *MEMS-Based Integrated Navigation*. Norwood (USA): Artech House, 2010. ISBN 978-1-60807-043-5.
- [2] RIPKA, P., S. DAŽO, M. KREIDL a J. NOVÁK. *Senzory a převodníky*. Praha: ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03123-3.
- [3] TITTERTON, David H. a John L. WESTON. *Strapdown Inertial Navigation Technology*. The American Institute of Aeronautics and Astronautics, second edition, 2004. ISBN 0 86341 358 7.
- [4] IEEE Std 952™-1997. *Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1998. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/findstds/standard/952-1997.html>
- [5] EL-SHEIMY, N, *Inertial Techniques and INS/DGPS Integration*, ENGO 623-Course Notes, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Canada, 2006
- [6] BARBOUR, N. and G. SCHMIDT, *Inertial Sensor Technology Trends*, IEEE Sensors Journal, Vol. 1, No. 4, 2001, pp. 332-339
- [7] WOODMAN, Oliver J. , *An Introduction to Inertial Navigation*, University of Cambridge, Technical report, 2007 [cit. 2012-04-28]. ISSN 1476-2986. Dostupné z: <http://www.cl.cam.ac.uk/techreports/>
- [8] ROETENBERG, Daniel. *Inertial and Magnetic Sensing of Human Motion* [online]. PhD thesis, Universiteit Twente, 2006 [cit. 2012-05-01]. ISBN 90-9020620-5. Dostupné z: <http://www.xsens.com/images/stories/PDF/Inertial and Magnetic Sensing of Human Motion.pdf>
- [9] Sagnac effect. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001[cit. 2012-05-03]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sagnac_shift.svg
- [10] Fiber Optic Gyroscope mechanism. In: *Fiber Optic Gyroscope development* [online]. 2007 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: http://www.neubrex.com/img/applications/gyro/gyro0/001_a.jpg

- [11] An Overview of MEMS Inertial Sensing Technology. In: BERNSTEIN, Jonathan. *Sensormag.com* [online]. 2003 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.sensormag.com/sensors/acceleration-vibration/an-overview-mems-inertial-sensing-technology-970>
- [12] EL-SHEIMY, N. ,S. NASSAR and A. NOURELDIN, *Wavelet De-Noising for IMU Alignment*, IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine, vol. 19, pp. 32- 39, Oct. 2004
- [13] SKOG , I. and P. HÄNDEL , *Calibration of a MEMS Inertial Measurement Unit*, XVII IMEKO WORLD CONGRESS, Brazil, Sept. 2006. Dostupné z: http://www.ee.kth.se/php/modules/publications/reports/2006/IR-EE-SB_2006_026.pdf
- [14] Z.F. SYED, P. AGGARWAL, C. GOODALL, X. NIU and N. EL-SHEIMY, *A new multi-position calibration method for MEMS inertial navigation systems*, Measurement Science and Technology, vol. 18, pp. 1897-1907, 2007
- [15] IEEE Std™ 528 - 2001. *Standard for Inertial Sensor Terminology*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2001. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/findstds/standard/528-2001.html>
- [16] VUKMIRICA, Vladimir, Ivana TRAJKOVSKI a Nada ASANOVIĆ. Two Methods for the Determination of Inertial Sensor Parameters. *Scientific Technical Review* [online]. 2010, č. 60 [cit. 2013-01-01]. Dostupné z: <http://www.vti.mod.gov.rs/ntp/rad2010/34-10/4/04.pdf>
- [17] DEKKING, Michel. *A modern introduction to probability and statistics: understanding why and how* [online]. London: Springer, c2005, xv, 486 p. [cit. 2013-01-15]. ISBN 18-523-3896-2. Dostupné z: http://www.cis.temple.edu/~latecki/Courses/CIS2033-Spring12/A_modern_intro_probability_statistics_Dekking05.pdf
- [18] IEEE Std 1431™-2004. *IEEE standard specification format guide and test procedure for coriolis vibratory gyros* [online]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2004 [cit. 2013-01-20]. ISBN 07-381-4005-8. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1431-2004.html>
- [19] IEEE STD 1293™-1998. *IEEE standard specification format guide and test procedure for linear, single-axis, non-gyroscopic accelerometers* [online]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999 [cit. 2013-01-20]. ISBN 07-381-1430-8. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1293-1998.html>

- [20] MURATA ELECTRONICS OY. *SCC1300-D02 Combined Gyroscope and 3-axis Accelerometer with digital SPI interfaces: Data Sheet* [online]. [2012] [cit. 2013-05-01]. Doc.Nr. 82113000. Dostupné z: http://www.murataMEMS.fi/sites/default/files/documents/82113000c_scc1300-d02_datasheet1.pdf
- [21] MURATA ELECTRONICS OY. *SCC1300 Gyro-Combo Demo Kit: User Manual* [online]. [2012] [cit. 2013-05-01]. Doc.Nr. 82117600.01. Dostupné z: http://www.murataMEMS.fi/sites/default/files/documents/scc1300_gyro-combo_demo_kit_user_manual_82117600.01.pdf
- [22] MURATA ELECTRONICS OY. *Sca3000 Demo Kit: Macro Language Description* [online]. [2012] [cit. 2013-05-01]. Doc.Nr. 8259200.04. Dostupné z: http://www.murataMEMS.fi/sites/default/files/uploads/sca3000_demo_kit_macro_language_description_8259200.04.pdf
- [23] INVENSENSE INC. *MPU-6050: Product Specification* [online]. 2012 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.invensense.com/mems/gyro/documents/PS-MPU-6000A.pdf>
- [24] INVENSENSE INC. *MPU-6050 9-Axis Evaluation Board: User Guide* [online]. 2012 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.invensense.com/mems/gyro/documents/AN-MPU-6000EVB.pdf>
- [25] STMICROELECTRONICS. *STEVAL-MKI062V2, iNEMO™ (iNertial MOdule) demonstration board based on MEMS devices and STM32F103RE: UM0937 User manual* [online]. © 2010 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/CD00271225.pdf
- [26] RMS. *SDL 05 / SGD10 Dynamic Motion Simulator with Temperature Chamber: Technical Specification*. Hamburg, Germany: Regelungs-und Messtechnik - Dynamic Test Systems, [2010].
- [27] EL-SHEIMY, N., *Inertial Techniques and INS/DGPS Integration*, ENGO 623—course notes, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Canada, 2006.
- [28] VectorNav Embedded Navigation Solutions. *VectorNav Support Library* [online]. [2012] [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://www.vectornav.com/support/library>
- [29] ALLAN, D. W., *Statistics of Atomic Frequency Standards*, Proceedings of the IEEE, vol. 54, no. 2, pp. 221-230, Feb 1966
- [30] TEHRANI, M. M., *Ring Laser Gyro Data Analysis with Cluster Sampling Technique*, Proceedings of SPIE, vol. 412, 1983.

- [31] IEEE STD 1139™-1988. *IEEE Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology* [online]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1988 [cit. 2013-05-05]. ISBN 0-7381-4329-4. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1139-1988.html>
- [32] TRUSOV. A. A. *Alan Variance Analysis of Random Noise in Gyroscopes* [online]. 2011 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.alexandertrusov.com/uploads/pdf/2011-UCI-trusov-whitepaper-noise.pdf>
- [33] El-Sheimy, N., Hou, H., Niu, N., *Analysis and Modeling of Inertial Sensors Using Allan Variance*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 57, no 1., January 2008.
- [34] CTS GMBH. *Temperature Test Chambers Series T-65: Product list*. [online]. [2012] [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: http://www.cts-umweltsimulation.de/products/datasheets/CTS_Temperature_Test_Chambers_Bench_Top_Version_eng.pdf
- [35] ARNAUDOV, Rumen a YASEN ANGELOV. Earth rotation measurement with micromechanical yaw-rate gyro. *Measurement Science and Technology*. 2005-11-01, vol. 16, issue 11, s. 2300-2306. DOI: 10.1088/0957-0233/16/11/024. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/0957-0233/16/11/024/>
- [36] HAN, Songlai a Jinling WANG. Quantization and Colored Noises Error Modeling for Inertial Sensors for GPS/INS Integration. *IEEE Sensors Journal*. 2011, vol. 11, issue 6, s. 1493-1503. DOI: 10.1109/JSEN.2010.2093878. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5640632>
- [37] GEORGY, Jacques, Aboelmagd NOURELDIN, Michael J. KORENBERG a Mohamed M. BAYOUMI. Modeling the Stochastic Drift of a MEMS-Based Gyroscope in Gyro/Odometer/GPS Integrated Navigation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2010, vol. 11, issue 4, s. 856-872. DOI: 10.1109/TITS.2010.2052805. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5499066>
- [38] NASSAR, Sameh. *Improving the Inertial Navigation System (INS) Error Model for INS and INS/DGPS Applications: Dissertation* [online]. 2003 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: http://www.ucalgary.ca/engo_webdocs/KPS/03.20183.SNassar.pdf

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Základní model akcelerometru [2].....	11
Obr. 2.2 Jednoduchý akcelerometr [3].....	13
Obr. 2.3 Predikce technologického vývoje okolo r. 2020 [6]	14
Obr. 2.4 Působení Coriolisovy síly na hmotný objekt [8]	15
Obr. 2.5 Princip gyroskopu s vibrační vidlicí [2]	16
Obr. 2.6 Sagnacův jev, změna dráhy a popis [9, 2].....	17
Obr. 2.7 Sagnacův interferometr [10].....	18
Obr. 2.8 Predikce technologického vývoje okolo r. 2020 [6]	19
Obr. 2.9 Ortogonální rozmístění senzorů IMU [3].....	20
Obr. 2.10 Inerciální jednotka stabilní platformy [7]	21
Obr. 2.11 Navigační algoritmus systémů stabilní platformy	21
Obr. 2.12 Navigační algoritmus systémů typu Strapdown	22
Obr. 3.1 Přehled chyb inerciálních snímačů a metody kompenzace [1].....	23
Obr. 3.2 Výstupní závislost snímače na výstupu [13]	24
Obr. 3.3 Chyby rozmístění z výroby (vlevo) a při montáži k objektu (vpravo) [1] ..	25
Obr. 4.1 Cena Inerciálních jednotek vzhledem k technologii a výkonu [6]	28
Obr. 5.1 Graf citlivosti gyroskopu bez hystereze [3].....	37
Obr. 5.2 Graf citlivosti gyroskopu s efektem hystereze [3]	37
Obr. 5.3 Kroková sekvence měření na rotačním stolku [3]	38
Obr. 5.4 Příklad výstupu rotačního testu [3]	39
Obr. 5.5 Příklad výstupu rychlého rotačního testu [3].....	39
Obr. 5.6 Příklad výstupu z osmi pozičního testu[3]	43
Obr. 5.7 Příklad výstupu z testu opakovatelnosti [3].....	44
Obr. 5.8 Příklad výstupu z testu dlouhodobé stability [3]	45
Obr. 5.9 Příklad frekvenční charakteristiky akcelerometru	46
Obr. 6.1 Angle random walk znázorněn pomocí AD	54
Obr. 6.2 Nestabilita nuly znázorněna pomocí AD.....	55
Obr. 6.3 Rate random walk znázorněn pomocí AD.....	56
Obr. 6.4 Kvantizační šum znázorněn pomocí AD	57
Obr. 6.5 Výsledný graf Allanovy odchylky[4].....	58
Obr. 6.6 Výsledný graf Spektrální šumové hustoty[4]	58
Obr. 7.1 STmicroelectronics iNemo [25].....	61
Obr. 7.2 Scc1300 – D02 Demo kit [21]	62
Obr. 7.3 Blokové schéma signálové cesty MPU 6050.....	63
Obr. 7.4 Měření závislosti nuly na teplotě	64
Obr. 7.5 Měření citlivosti gyroskopu.....	72

Obr. 7.6 Diagram postupu měření citlivosti gyroskopu.....	72
Obr. 7.7 Diagram postupu měření citlivosti gyroskopu v závislosti na teplotě	74
Obr. 7.8 Měření Allanovy odchylky	76
Obr. 7.9 Diagram výpočtu Allanovy odchylky	76
Obr. 7.10 Měření zemské rotace.....	84
Obr. 8.1 Modelovaný GM proces prvního a druhého řádu	89
Obr. 8.2 Model výstupu gyroskopu (N,B)	90
Obr. 8.3 Model výstupu gyroskopu (N,B,K).....	93

Seznam tabulek

Tabulka 5.1 Nastavení os gyroskopu pro testy stability [3].....	35
Tabulka 6.1 Shrnutí uvedených typů šumu	58
Tabulka 7.1 Zjištěné parametry z AD akcelerometru iNemo	79
Tabulka 7.2 Zjištěné parametry z AD gyroskopu iNemo	79
Tabulka 7.3 Zjištěné parametry z AD akcelerometru MPU6050.....	80
Tabulka 7.4 Zjištěné parametry z AD gyroskopu MPU6050.....	81
Tabulka 7.5 Zjištěné parametry z AD akcelerometru Scc1300.....	82
Tabulka 7.6 Zjištěné parametry z AD gyroskopu Scc1300	83

Seznam grafů

Graf 7.1 Přechodová charakteristika teplotních snímačů.....	65
Graf 7.2 Průběh skokového testu teplotní závislosti na Scc1300.....	66
Graf 7.3 Teplotní závislost výstupu gyroskopu Scc1300 (1. způsob zpracování)	66
Graf 7.4 Teplotní závislost výstupu gyroskopu Scc1300 (2. způsob zpracování)	67
Graf 7.5 Teplotní závislost průměrovaného výstupu gyroskopu Scc1300	68
Graf 7.6 Teplotní závislost výstupu akcelerometru Scc1300 - osa X.....	68
Graf 7.7 Teplotní závislost výstupu akcelerometru Scc1300 - osa Y.....	69
Graf 7.8 Teplotní závislost výstupu akcelerometru Scc1300 - osa Z.....	69
Graf 7.9 Průběh skokového testu teplotní závislosti na MPU 6050	70
Graf 7.10 Teplotní závislost gyroskopu MPU6050 (osy X,Y,Z shora dolu)	71
Graf 7.11 Teplotní závislost akcelerometru MPU6050 (osy X,Y,Z shora dolu)	71
Graf 7.12 Výsledná závislost měření citlivosti gyroskopu	73
Graf 7.13 Vykreslené odchylek od linearity pro měření citlivosti gyroskopu	73
Graf 7.14 Výstup gyroskopu z měření teplotní závislosti citlivosti	74
Graf 7.15 Výsledná teplotní závislost gyroskopu.....	75
Graf 7.16 Allanova odchylka se zjištěnými asymptotickými parametry	77
Graf 7.17 Allanova odchylka akcelerometru iNemo	79
Graf 7.18 Allanova odchylka gyroskopu iNemo	79
Graf 7.19 Allanova odchylka akcelerometru MPU6050 (doma)	80
Graf 7.20 Allanova odchylka akcelerometru MPU6050 (lab)	80
Graf 7.21 Allanova odchylka gyroskopu MPU600 (doma)	81
Graf 7.22 Allanova odchylka gyroskopu MPU6050 (lab)	81
Graf 7.23 Allanova odchylka akcelerometru Scc1300 (doma)	82
Graf 7.24 Allanova odchylka akcelerometru Scc1300 (lab)	82
Graf 7.25 Allanova odchylka gyroskopu Scc1300 (doma)	83
Graf 7.26 Allanova odchylka gyroskopu Scc1300 (lab).....	83
Graf 7.27 AD výstupů snímače z měření zemské rotace	85
Graf 7.28 Přefiltrovaná data gyroskopu z měření zemské rotace.....	86
Graf 7.29 Výsledek měření zemské rotace.....	86
Graf 8.1 Autokorelační funkce výstupu gyroskopu.....	88
Graf 8.2 Srovnání autokorelačních funkcí modelu a gyroskopu.....	89
Graf 8.3 Výsledné srovnání autokorelačních funkcí gyroskopu a modelu	90
Graf 8.4 Srovnání Allanovy odchylky modelu a výstupu gyroskopu.....	91
Graf 8.5 Srovnání výstupu modelu a gyroskopu v časové oblasti.....	91
Graf 8.6 PSD výstupu gyroskopu	92
Graf 8.7 PSD výstupu modelu.....	92

Seznam zkratek

AcRW	Acceleration Random Walk
AD	Allan Deviation
AHRS	Attitude Heading Reference System
ARW	Angle Random Walk
AVAR	Allan Variance
BI	Bias Instability
DSP	Digital Signal processor
FIFO	First In First Out
FOG	Fiber Optic Gyroscope
GM	Gauss - Markov
I ² C	Inter-Integrated Circuit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFOG	Interferometric Fiber Optic Gyros
INS	Inertial Navigation System
IMU	Inertial Measurement Unit
ISA	Inertial Sensor Assembly
LSB	Least Significant Bit
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
MOEMS	Micro-Optical-Electro-Mechanical Systems
MSB	Most Significant Bit
PSD	Power Spectral Density
RLG	Ring Laser Gyroscope
RMS	Root Mean Square
RRW	Rate Random Walk
RS232	Standard sériového rozhraní
UART	Universal Asynchronous Receiver/transmitter
USB	Universal Serial Bus
VRW	Velocity Random Walk
WGS 84	World Geodetic System standard

Seznam příloh

Příloha A – Obsah přiloženého CD.....	A-1
Příloha B – Typy konfigurací senzorů inerciálních jednotek	B-1
Příloha C – Kompletní modelové rovnice inerciálních snímačů	C-1
Příloha D – Fotodokumentace	D-1

Přílohy

Příloha A – Obsah přiloženého CD

Dokument závěrečné práce.....DP_Jakub_Trlicik.pdf

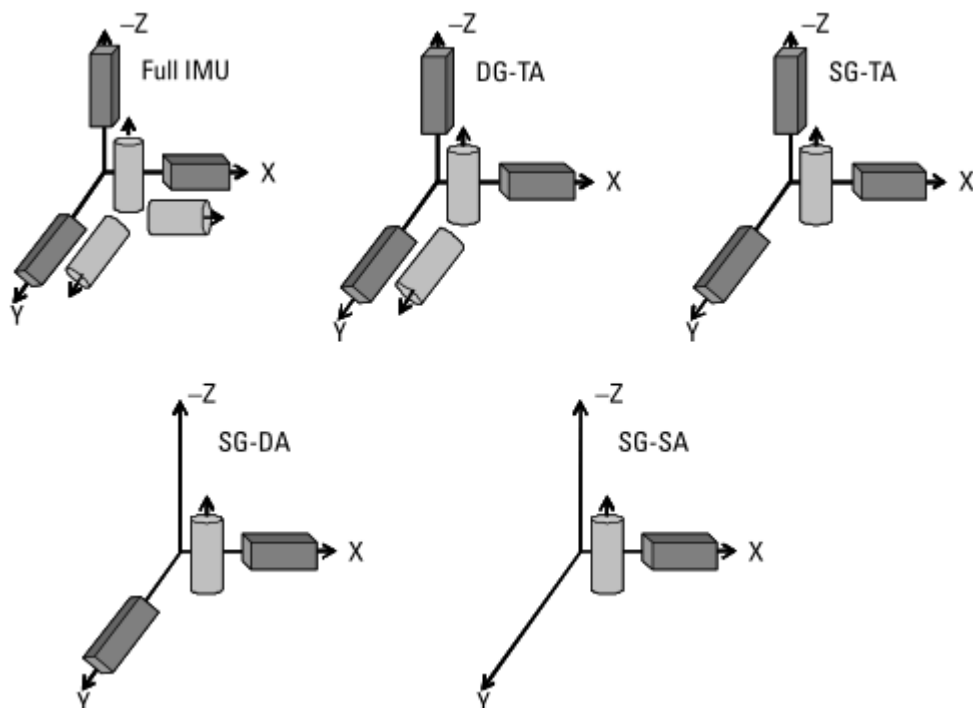
Složky z jednotlivých měření.....Alan
Mereni_rotace_Zeme
Teplotni_mereni

Jednotlivé složky mohou obsahovat:

Soubory s naměřenými daty	.mat
Funkce pro zpracování dat	.m
Dokumentace k vytvořeným funkcím	.doc
Ovládací programy pro LabView	.vi
Jednotlivé grafy výstupů	.fig
Zdrojové obrázky	.emf, .png

Příloha B – Typy konfigurací senzorů inerciálních jednotek

Typy konfigurací inerciálních jednotek pro pozemní navigaci, kdy se integrací více senzorů do jednoho čipu, či snížením počtu detekčních prvků dosáhne nižší ceny, při zachování dostatečné přesnosti pro danou aplikaci.



Obrázek 9.1 Typy konfigurace senzorů inerciálních jednotek [1]

Full IMU	tri-axial accelerometer and three orthogonal gyroscopes, capable to provide three-dimensional motion
DG-TA	dual axis gyroscope and tri-axial accelerometer
SG-TA	single axis gyroscope and tri-axial accelerometer
SG-DA	single axis gyroscope and dual axis accelerometer
SG-SA	single axis gyroscope and single axis accelerometer

Příloha C – Kompletní modelové rovnice inerciálních snímačů

C.1 - Gyro model equation [18]

The model equation for a single-axis CVG expresses the relationship between the input rotation rate and the gyro output in terms of parameters whose coefficients are necessary to specify the performance of the gyro.

The use of the coefficients defined in this subclause to simulate gyro performance is discussed in Annex B.

Pick the appropriate model equation based upon the CVG output type.

For analog output, in either force-rebalance or open loop mode,

$$\begin{aligned} S_0 V_o &= [I + D] [1 + 10^{-6} \varepsilon_K]^{-1} \\ S_0 &= \text{nominal scale factor } (^\circ/\text{h})/\text{V} \\ V_o &= \text{analog output (volts)} \end{aligned}$$

For digital output, in either force-rebalance or open loop mode,

$$\begin{aligned} S_0 V_d &= [I + D] [1 + 10^{-6} \varepsilon_K]^{-1} \\ S_0 &= \text{nominal scale factor } (^\circ/\text{h})/\text{LSB} \\ V_d &= \text{digital output (LSBs)} \end{aligned}$$

For frequency output,

$$\begin{aligned} S_0 F &= [I + D] [1 + 10^{-6} \varepsilon_K]^{-1} \\ S_0 &= \text{nominal scale factor } (^\circ/\text{h})/\text{Hz} \\ F &= \text{frequency output (Hz)} \end{aligned}$$

For ratiometric output,

$$\begin{aligned} S_0 (V_{ref}/V_p) V_o &= [I + D] [1 + 10^{-6} \varepsilon_K]^{-1} [1 + K_r (V_{ref}/V_p)] \\ S_0 &= \text{nominal scale factor } (^\circ/\text{h})/\text{V} \\ V_{ref} &= \text{voltage at which the nominal scale factor is determined} \\ V_p &= \text{power supply voltage} \\ K_r &= \text{ratiometric error coefficient} \end{aligned}$$

For whole angle mode,

$$S_0 (\Delta \theta_{pickoff} / \Delta t) = [I + D] [1 + 10^{-6} \varepsilon_K]^{-1}$$

where the pickoff angle, $\Delta \theta_{pickoff}$ and the D_F component of D have harmonic errors as a function of pickoff angle.

$$\begin{aligned} S_0 &= \text{nominal scale factor } (^\circ/\text{LSB}) \\ \Delta \theta_{pickoff} &= \text{angle rotated in time interval } \Delta t \\ \Delta t &= \text{time between output data words (s)} \end{aligned}$$

where LSB represents the least significant bit of the digital word representing the angle change.

$$\begin{aligned} I &= \text{Inertial input } (^\circ/\text{h}) \\ &= \omega_{IRA} + \omega_{XRA} \sin \Theta_Y - \omega_{YRA} \sin \Theta_X \\ D &= \text{Drift rate } (^\circ/\text{h}) \\ &= D_F + D_R + E \\ \varepsilon_K &= \text{Scale factor error (ppm)} \\ &= \varepsilon_{K0} + \varepsilon_T \Delta T + S_a a \end{aligned}$$

where

$\omega_{IRA}, \omega_{XRA}, \omega_{YRA}$	= Components of the inertial input rate resolved into the gyro reference coordinate frame.
Θ_X	= Misalignment of the IA about the XRA.
Θ_Y	= Misalignment of the IA about the YRA.
E	= Environmentally sensitive drift rate ($^{\circ}/h$)
	= $D_T \Delta T + \vec{D}_{\nabla T} \bullet \nabla T + D_{\dot{T}} \dot{T} + D_c a_{VR} + D_{\Delta F} a_{V\Delta F} + D_D a_{VD} + D_P a_{VP} + D_{SR} a_{VSR} + D_a a + D_{RI} a_{VOF} (\omega_{XRA} + \omega_{YRA}) + D_{RBB} a_{VBB}$
$D_T \Delta T$	= Drift rate attributable to a change in temperature, ΔT , where D_T is the drift rate temperature sensitivity coefficient.
$\vec{D}_{\nabla T} \bullet \nabla T$	= Drift rate attributable to the temperature gradient, ∇T , where $\vec{D}_{\nabla T}$ is the drift rate temperature gradient sensitivity.
$D_{\dot{T}} \dot{T}$	= Drift rate attributable to the time rate of change of temperature, $\dot{T}$, where $D_{\dot{T}}$ is the drift rate time rate of change of temperature sensitivity.
$D_c a_{VR}$	= Drift rate attributable to coning error caused by a random vibration input around a resonance, a_{VR} , where D_c is the drift rate vibration induced coning sensitivity coefficient.
$D_{\Delta F} a_{V\Delta F}$	= (Open loop mode) Drift rate attributable to random vibration input around the difference frequency, $a_{V\Delta F}$, where $D_{\Delta F}$ is the drift rate sensitivity coefficient.
$D_D a_{VD}$	= (Open loop mode) Drift rate attributable to random vibration input around the drive frequency, a_{VD} , where D_D is the drift rate sensitivity coefficient.
$D_P a_{VP}$	= (Open loop mode) Drift rate attributable to random vibration input around the pickoff frequency, a_{VP} , where D_P is the sensitivity coefficient.
$D_{SR} a_{VSR}$	= Drift rate attributable to random vibration input around a structural resonance, a_{VSR} , where D_{SR} is the drift rate structural resonance sensitivity coefficient.
$D_a a$	= Drift rate due to acceleration, a , applied along any given axis, where D_a is the drift rate acceleration sensitivity coefficient for that axis.
$D_{RI} a_{VOF} (\omega_{XRA} + \omega_{YRA})$	= Drift rate attributable to random vibration, a_{VOF} , around the operating frequency and a constant input rate about an axis orthogonal to the input axis, where D_{RI} is the drift cross-axis vibration sensitivity coefficient.
$D_{RBB} a_{VBB}$	= Drift rate attributable to broadband input vibration, a_{VBB} , coupled with pickoff asymmetry, where D_{RBB} is the noise sensitivity coefficient.
The noise generated adds to ARW in an open loop mode and to angle white noise in the whole angle mode. $D_{RBB} a_{VBB}$ must be multiplied by the square root of the mission time in the open loop mode or by the square root of the vibration input bandwidth in the whole angle mode prior to adding this term to E.	
D_F	= Bias
D_R	= $D_{RN} + D_{RB} + D_{RK} + D_{RR} + D_{RM} + D_{RQ}$
D_{RN}	= Random drift rate attributable to Angle Random Walk, where N is the coefficient.
D_{RB}	= Random drift rate attributable to Bias Instability, where B is the coefficient.
D_{RK}	= Random drift rate attributable to Rate Random Walk, where K is the coefficient.

- D_{RR} = Random drift rate attributable to Ramp, where R is the coefficient.
 D_{RM} = Random drift rate attributable to Markov noise.
 D_{RQ} = Random drift rate attributable to Output Quantization, where Q is the coefficient.
 ϵ_{K0} = Scale factor error at nominal conditions (difference between actual scale factor and nominal scale factor, ppm)
 $\epsilon_T \Delta T$ = Scale factor error attributable to a change in temperature, ΔT , where ϵ_T is the scale factor temperature sensitivity coefficient.
 $S_a a$ = Scale factor error due to acceleration, a , applied along any given axis, where S_a is the scale factor acceleration sensitivity coefficient for that axis.

Other sensitivities may be added to the model equation, such as those due to variations in supply voltage, magnetic fields, and other environments pertinent to the particular application.

C.2 - Accelerometer model equation [19]

The model equation of the accelerometer is defined as a series that mathematically relates the accelerometer output E to the components of applied acceleration, angular velocity, and angular acceleration along the accelerometer reference axes.

The following model equation contains more terms than might usually be employed and can be shortened or have other terms added as necessary depending on the application.

$$E = K_1 \left\{ K_0 + \frac{K'_0}{2} \text{sign}(a_i) + \left(1 + \frac{K'_1}{2} \text{sign}(a_i) \right) a_i + K_{\text{eq}} a_i |a_i| + K_2 a_i^2 + K_3 a_i^3 + \sum_{n \geq 4} K_n a_i^n + \delta_o a_p - \delta_p a_o + K_{ip} a_i a_p + K_{io} a_i a_o + K_{po} a_p a_o + K_{pp} a_p^2 + K_{oo} a_o^2 + K_{\text{spin}} \omega_i \omega_p + K_{\text{ang. accel}} \dot{\omega}_o + \varepsilon \right\}$$

where

E	is accelerometer output in accelerometer output units (such as volts),
ε	is measurement and process noise and unmodeled error (g),
K_1	is scale factor (output units per g),
a_i, a_p, a_o	are applied acceleration components along the IA, PA, and OA (g),
$\text{sign}(a_i)$	is $\begin{cases} +1 & \text{if } a_i > 0 \\ -1 & \text{if } a_i < 0 \\ 0 & \text{if } a_i = 0 \text{ (ambiguous in bias asymmetry model)} \end{cases}$
$\omega_i, \omega_p, \omega_o$	are angular velocity components along the IA, PA, and OA (rad/s),
$\dot{\omega}_i, \dot{\omega}_p, \dot{\omega}_o$	are angular acceleration components along the IA, PA, and OA (rad/s ²),
K_0	is bias (g),
K'_0	is bias asymmetry (g),
K'_1	is scale factor asymmetry (dimensionless),
K_{eq}	is odd quadratic coefficient (g/g^2),
K_2	is second-order coefficient (g/g^2),
K_3	is third-order coefficient (g/g^3),
K_n	is other higher order along IA terms, $n = 4, 5, 6, \dots$, to order appropriate for given accelerometer (g/g^n),
δ_o, δ_p	are misalignment of the IA with respect to the input reference axis about the OA and PA, respectively (rad),
K_{ip}, K_{io}, K_{po}	are cross-coupling coefficients [$(g/g)/\text{cross-}g$ or g/g^2],
K_{pp}, K_{oo}	are cross-axis nonlinearity coefficients ($g/\text{cross-}g^2$ or g/g^2),
K_{spin}	is spin correction coefficient, equal to $-(J_i - J_p) - Pr_c]/P$ [converted to $g/(\text{rad/s})^2$],
$K_{\text{ang. accel}}$	is angular acceleration coefficient, equal to $[J_o - Pr_c]/P$ [converted to $g/(\text{rad/s})^2$];

where (see Annex C)

J_i, J_p, J_o	are pendulum principal moments of inertia relative to center of hinge ($g \cdot \text{cm}^2$),
P	is pendulum pendulosity = pendulum mass times distance of center of mass from center of hinge ($g \cdot \text{cm}$),
r_c	is distance from the center of hinge to a point at the null position of the pendulum at which accelerations are assumed to act on the pendulum (cm).

When calibrating scale factor and other parameters in an up-down, four-point, or multipoint tumble test at a specific site, it is natural to use the local acceleration due to gravity as the reference unit of acceleration g (see Annex K). The magnitude of gravity varies with location, including effects of latitude and altitude, so that the local gravity differs somewhat from the international standard value $g_0 = 9.80665 \text{ m/s}^2$. The absolute calibration of the local value of gravity is best accomplished with a falling laser corner cube gravimeter (see 3.2.6).

The acceleration along the arm in a centrifuge test is $r\omega^2$, where r is the distance from the rotation axis of the centrifuge and ω is the centrifuge rate. The latter accurately measures the relative variation in acceleration at different centrifuge rates, with compensation, if necessary, for measured variations in arm length and droop by laser interferometer or other techniques. The constant part of the arm length r is absorbed in the scale factor for the test (which is not used in applications) when scale factor is estimated simultaneously with the acceleration nonlinearity model coefficients. Hence for the purpose of estimating the nonlinearity coefficients for applications, the units of $r\omega^2$ can be g (regardless of whether local g or the standard gravity g_0 is used unless the acceleration nonlinearities need to be calibrated to better than 0.1%).

Calibration of acceleration nonlinearity model terms in a vibration test uses the rms acceleration measured with monitor piezoelectric accelerometers, which are accurate to at best 1% and usually expressed in g . Absolute calibration of a piezoelectric accelerometer could be accomplished by laser interferometer observations of a vibrating element on which it rests.

Thus for carrying out tests at a specific test site, the unit of acceleration used in the model equation is most conveniently taken to be the local value of the acceleration due to gravity g . When using the scale factor and other parameters calibrated at a local test site in an application or when comparing scale factors and other parameters measured on the same accelerometer at different test sites, the units have to be changed to the standard gravity g_0 or to m/s^2 .

The coefficients in the model equation may be functions of other variables (e.g., time, input voltage(s), input frequency(ies), operating temperature, external magnetic induction, pressure) and may represent either error terms or modeled coefficients that define the nominal behavior of the accelerometer. Some terms might not be excited in a given test or might not be separable from other terms.

For example, the model in a four-point tumble test is restricted to scale factor, bias, and one of the misalignment angles. The resulting estimate of bias has lumped into it some of the effect due to K_2 , and that of scale factor has lumped into it some of the effect of K_3 (see Annex K).

In a multipoint tumble test about OA, the parameters δ_p , K_{oo} , etc. are not excited, and K_2 and K_{pp} cannot be simultaneously estimated when bias K_0 is also estimated. Similarly K_2 and K_{oo} cannot be simultaneously estimated in a tumble about PA (see K.2.4). Also K_{ip} or K_{io} cannot be simultaneously estimated with K_2 and K_0 , and K_3 cannot be simultaneously estimated with K_1 , in dual orthogonal accelerometer tests using the magnitude-squared-of- g observable that is insensitive to angle-setting errors, or if angle-setting errors are estimated with individual accelerometer observables (see K.5.2).

The indicated acceleration is $A_{ind} = E/K_1$. The scale factor can be written as $K_1 = K_1^o(1 + k_1)$, where K_1^o is a nominal scale factor, such as determined in an IA up-down test, and k_1 is a scale factor correction whose product with other model coefficients is ignorably small. Then the model equation for $A_{md} = E/K_1^o$ is the expression in brackets in the model equation for E , and the 1 term multiplying a_i is replaced by $1 + k_1$.

Applied acceleration refers only to nongravitational acceleration (e.g., from rocket thrust, air drag) since an accelerometer cannot sense the acceleration of free fall. The downward attractive force of gravity acts equally on the accelerometer proof mass and case; therefore, the output of an earthbound accelerometer is due to the upward reaction force to gravity of the support acting on the accelerometer case and thence to the pendulum hinge and gives the same indication as an applied acceleration of 1 g upward.

Angular motion environments produce several specific forms of nongravitational acceleration:

- a) Centripetal acceleration, which is associated with steady-state spin ($\vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r}$)
- b) Tangential acceleration, which is associated with time-varying spin ($\vec{\dot{\omega}} \times \vec{r}$)
- c) Coriolis acceleration, which arises when a point of interest moves with velocity $\vec{v}$ relative to a rotating frame of reference ($2(\vec{\omega} \times \vec{v})$)

Centripetal and tangential accelerations both depend on $\vec{r}$, which is the vector distance from the instantaneous center of the angular motion to the point at which the acceleration forces are assumed to act. Coriolis acceleration depends on velocity, i.e., rate of change of position, and, therefore, is not dependent on position per se.

The measurement and process noise in ϵ could have quantization, white, random walk, flicker, or other components. The process noise distinct from the noise due to the analog-to-digital converter, voltage-to-frequency converter, or other digitization readout system can be regarded as due to accelerometer random bias instability, separate from any systematic models of bias variation such as trend or temperature and other sensitivities.

Characterization of the measurement and process noise in the output observable can be done with PSD and Allan variance techniques. The process noise can be modeled in a guidance system Kalman filter model using augmented Markov process states.

The unmodeled error in ϵ should be made as small as required by the application by means of design improvements and/or addition of calibratable model terms that best represent the underlying physics of the device.

An accelerometer attached to a moving frame may be assumed to measure a single component of the acceleration that exists at a point in the frame that is coincident with its effective center of mass. Since acceleration fields typically have spatial gradients associated with them, this coincidence must be carefully defined. In a pendulous accelerometer, the effective mass center is on the PA, located at a distance r_c outward from the HA or OA. The optimal value, of all possible values to be chosen for r_c , depends in a somewhat complicated way on the mass properties of the pendulum.

Ideally, the true effective center of mass would correspond to a choice of r_c so that the error terms K_{spin} and $K_{ang, accel}$ are both made equal to zero. Theoretically, both error terms could be made zero in a dry accelerometer with an infinitesimally thin pendulum. In real accelerometers, whose pendulums have finite thickness and which may be further affected by fluid effects in liquid filled accelerometers, error torques are generated that make impossible cancellation of both error terms by proper choice of r_c .

It is possible to choose a value of r_c so that K_{spin} is equal to zero or to choose another value so that $K_{ang, accel}$ is equal to zero, but not to have both error terms equal zero at the same time. In general, if the value of r_c that is chosen is between these two values, the error will be bounded by the fact that the sum of the two angular motion coefficients is equal to a constant: $K_{spin} + K_{ang, accel} = K_{ai}$, the anisoinertia coefficient.

A common solution to this idiosyncrasy of pendulous accelerometers in strapdown inertial navigation systems is to define r_c so that $K_{ang, accel}$ is zero (literally: no sensitivity to angular acceleration about any axis through the chosen point) and then correct the residual spin error by using the measured values of ω_i and ω_p , which are available as part of the system state vector.

The angular motion sensitivity terms that are included in the example model equation of this clause neglect the normally small terms that arise from pendulum products of inertia and from products of spin coefficients with the pendulum misalignment coefficients. See Annex C for further details. Angular velocity and angular acceleration error terms are not excited in any nonrotating environment or in a discrete position tumble test, where the local gravity vector includes the effect of the centripetal acceleration due to earth rotation.

Alternative expressions for the bias and scale factor asymmetry model terms are

$$K_{0+} = K_0 + \frac{K'_0}{2}, \quad K_{0-} = K_0 - \frac{K'_0}{2}$$

$$K_{1+} = K_1 \left(1 + \frac{K'_1}{2} \right), \quad K_{1-} = K_1 \left(1 - \frac{K'_1}{2} \right)$$

where K_{0+} and K_{1+} are the bias and scale factor, respectively, for positive a_i , and K_{0-} and K_{1-} are the bias and scale factor, respectively, for negative a_i . The bias in either formulation of the asymmetry model is ambiguous when $a_i = 0$, or from a practical standpoint when a_i is near zero.

The average bias and the difference in positive and negative acceleration biases (bias asymmetry) are

$$K_0 = \frac{1}{2} (K_{0+} + K_{0-}), \quad K'_0 = K_{0+} - K_{0-}$$

The average scale factor and the fractional difference in positive and negative acceleration scale factors (scale factor asymmetry) are

$$K_1 = \frac{1}{2} (K_{1+} + K_{1-}), \quad K'_1 = (K_{1+} - K_{1-})/K_1$$

The IA misalignment components in the model equation are defined by right-handed Euler angles. For strapdown applications, it may be desirable to use direction cosines, in which case the terms

$$\delta_o a_p - \delta_p a_o$$

would be replaced by

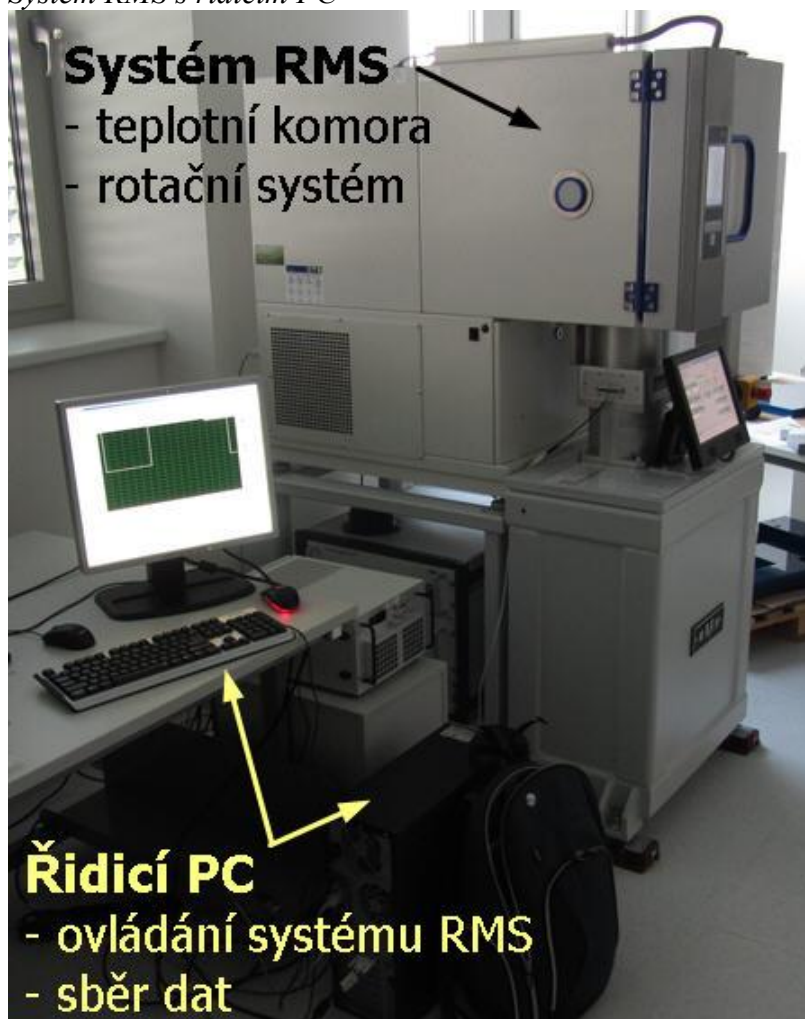
$$\delta_p a_p + \delta_o a_o$$

where δ_p, δ_o = misalignment of the IA with respect to the input reference axis in the plane of the PA and OA, respectively, in radians.

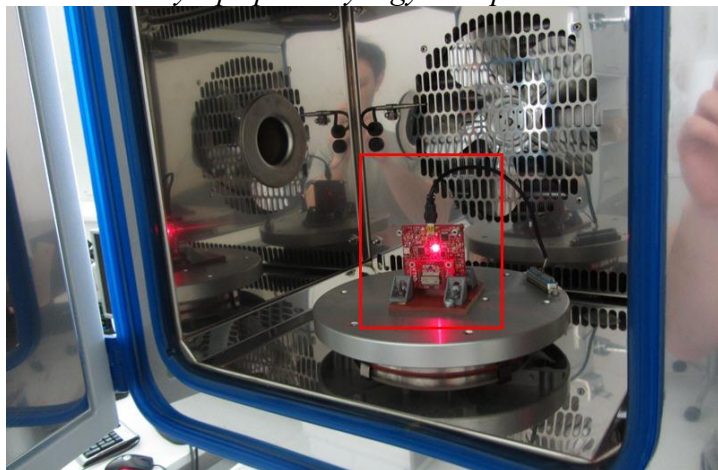
Příloha D – Fotodokumentace

D.1 - Měření Scale Factoru

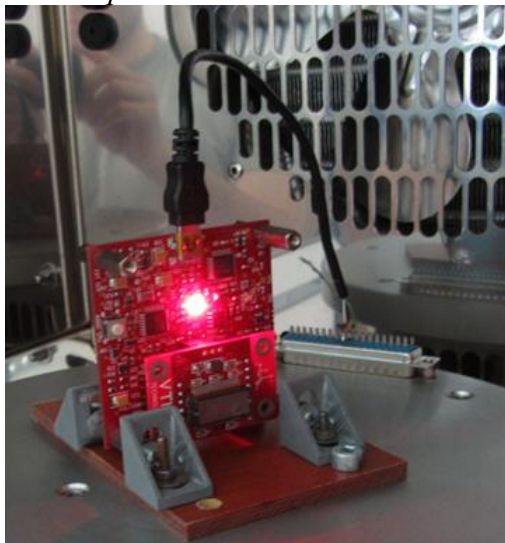
Systém RMS s řidicím PC



Detail komory s připevněným gyroskopem Scs 1300 na rotačním systému



Detail upevnění snímače na rotační stůl



D.2 - Měření teplotní závislosti offsetu

Snímač upevněný na nosníku v teplotní komoře



D.3 - Měření zemské rotace

Měřicí soustava – gyroskop připevněný na nakloněnou rovinu propojený s notebookem



Detail na nakloněnou rovinu s popisem os

