

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky



Diplomová práce

**Přesný inerciální navigační systém kategorie
„Tactical grade“**

Bc. Marek Bílý

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Roháč, Ph.D.

Studijní program: Otevřená informatika

Studijní obor: Počítačové inženýrství

7. května 2015

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Marek Bílý**

Studijní program: Otevřená informatika

Obor: Počítačové inženýrství

Název tématu: **Přesný inerciální navigační systém kategorie "Tactical grade"**

Pokyny pro vypracování:

Měřicí jednotka má za úkol sběr inerciálních dat a jejich základní předzpracování formou filtrace, korekce deterministických chyb a teplotních závislostí. Výpočetní jednotka pak plní funkci pokročilé algoritmizace za účelem odhadu základních navigačních údajů, tj. pozice, rychlost a orientace v prostoru. Daný odhad bude prováděn pomocí Kalmanovy filtrace, a to na základě fúze dat získaných z měřicí jednotky, dále GPS přijímače a magnetometru. Měřicí jednotka s výpočetní jednotkou je propojena po CAN sběrnici, GPS přijímač a magnetometr přes sběrnici RS232.

1. Navrhnete, realizujete a ověříte SW pro základní funkce přesného inerciálního navigačního systému využívajícího quartz akcelerometry a laserové vláknové gyroskopy.
2. Daný SW implementujete do řídicích částí (mikrokontrolér STM32F4xx), a to jak měřicí jednotky, tak i výpočetní jednotky.
3. Navrhnete a implementujete SW pro PC pro vizualizaci a ukládání navigačních údajů v reálném čase.

Seznam odborné literatury:

- [1] Soták, M. - Sopata, M. - Bréda, R. - Roháč, J. - Váci, L. (ed.): Integrácia navigačných systémov. 1. vyd. Košice: Bréda Róbert, 2006. 344 s. ISBN 80-969619-9-3.
[2] Cortex-M3t, Technical Reference Manual. Publ. ARM DDI 0337B, 2006, ARM Limited
[3] RM0008 - Reference manual. Doc. ID 13902 Rev 11, STMicroelectronics 2010

Vedoucí: doc. Jan Roháč Ing., Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016



prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 29. 9. 2014

Poděkování

Zde bych rád poděkoval doc. Ing. Janu Roháčovi, Ph.D. za připomínky a návrhy při vedení práce, odborné rady a pomoc. Dále pak děkuji kolegům z laboratoře Leteckých Informačních Systémů, kteří vždy ochotně pomohli a poradili. V neposlední řadě děkuji mé rodině a všem mým blízkým, za jejich podporu a oporu po celou dobu studia.

Prohlášení

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

V Praze, dne 7. května 2015



.....
Podpis

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem a implementací SW pro inerciální navigační systém (INS). INS využívá dvě mikrokontrolérové jednotky, a to měřicí a výpočetní. Měřicí jednotka zabezpečuje sběr dat z quartz akcelerometrů a z gyroskopů s optickým vláknem v kategorii „Tactical grade“, dále pak tříosého magnetometru a přijímače GPS. Tato jednotka rovněž provádí základní zpracování dat formou filtrace a korekce deterministických chyb akcelerometrů a gyroskopů. Výpočetní jednotka provádí navigační úlohu, jejímž výstupem je odhad pozice, rychlosti a orientace objektu v prostoru. Komunikace mezi měřicí a výpočetní jednotkou je realizována prostřednictvím sběrnice CAN. Výstupem výpočetní jednotky jsou veškerá měřená data a odhadované navigační údaje prostřednictvím sběrnice RS-232. Dále byl v rámci této diplomové práce navržen a implementován SW pro PC, který je schopen data výpočetní jednotky vizualizovat v reálném čase a rovněž je ukládat.

Abstract

This diploma thesis deals with design and implementation of SW for inertial navigation system (INS). The INS uses two microcontroller units, which are the measurement unit and the computing unit. The measurement unit provides data collection of quartz accelerometers and fiber optic gyroscopes in “Tactical Grade category”, triaxial magnetometer and GPS receiver. The measurement unit performs a data processing using filtration and correction of deterministic sensor errors of accelerometers and gyroscopes. The computing unit performs navigation algorithm, which output is estimation of position, velocity and attitude angles. The communication between measurement and computing units is done via CAN bus. The computing unit provides the output of measured and navigation data via RS-232 bus. Furthermore, software for the PC, which is able to visualize data of computing unit real-time and store it, was designed and implemented.

Obsah

Seznam zkratk.....	1
1 Úvod	2
2 Teoretický rozbor	3
2.1 Navigační systémy	3
2.1.1 Druhy inerciální navigačních systémů	3
2.1.2 Souřadnicové soustavy	5
2.1.3 Navigační úloha	7
2.2 Předzpracování dat pro navigační algoritmus	8
2.2.1 Filtrace a decimace digitálního signálu	8
2.2.2 Oprava deterministických chyb inerciálních senzorů.....	10
2.3 Analýza šumových vlastností senzorů pomocí „Allan Variance“	13
2.4 Mikrokontrolér pro inerciální navigační jednotku kategorie „Tactical grade“	15
2.4.1 Floating point unit a optimalizace výpočtů v pohyblivé řádové čárce	16
3 Praktické řešení navigační jednotky kategorie „Tactical grade“	17
3.1 Popis inerciálního navigačního systému.....	17
3.2 Senzory a měřicí systémy	18
3.2.1 Akcelerometry INN-204.....	18
3.2.2 Gyroskopy DSP-3100	21
3.2.3 Magnetometr HMR-2300	22
3.2.4 GPS modul u-blox NEO 6	23
3.3 Kalibrace a oprava deterministických chyb senzorů	24
3.3.1 Kompenzace teplotních závislostí akcelerometrů.....	25
3.3.2 Kalibrace deterministických chyb akcelerometrů	27
3.3.3 Kalibrace deterministických chyb gyroskopů	30
3.4 Popis funkce měřicí jednotky – jednotky sběru dat	33
3.4.1 Program jednotky sběru dat.....	33
3.4.2 Synchronizace akcelerometrů a gyroskopů.....	38
3.4.3 Výstupní komunikační protokol jednotky sběru dat	39
3.5 Popis funkce výpočetní jednotky – jednotky navigace.....	40
3.5.1 Popis programu jednotky navigace	41
3.5.2 Výstupní datový formát jednotky navigace.....	43
3.6 Vizualizační a logovací program VLINS	47
3.7 Měření s navigačním systémem.....	49

4 Závěr	53
Seznam obrázků	54
Seznam tabulek	55
Obsah CD	56
Bibliografie	57

Seznam zkratek

μC	Mikrokontrolér
μP	Mikroprocesor
ADC	Analog/Digital Convertor
AHRS	Attitude and heading Reference System
API	Application Programming Interface
ARW	Angular random walk
BIN	Bias INstability
CAN	Controller Area Network
DRS	Data Rate Select
FIR	Finite Impulse Response
FOG	Fibre Optic Gyro
FPU	Floating Point Unit
GPS	Global Positioning System
HSCA	Hrubý Scale Factor Akcelerometrů
IDT	Identifikátor datového typu
IIR	Infinite Impulse Response
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Measurement Unit, Inerciální navigační systémy
JN	Jednotka Navigace
JSD	Jednotka Sběru Dat
LLA	Latitude-Longitude-Altitude
LSB	Least Significant Bit
MAC	Multiple And Acumulate
NED	North-East-Down
NO	Navigovaný objekt
PLL	Phase-Locked Loop
RMSE	Root Mean Square Error
SC	Scale Factor
SD	Secure Digital
SEM	Sensor Error Model
SIMD	Single Instruction – Multiple Data
SPI	Serial Peripheral Interface
STD	Standard Deviation
SW	SoftWare
TG-INS	Tactical Grade Inertial Measurement Unit
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
USB	Universal Serial Bus
VCP	Virtual COM Port
VLINS	Visualization and Logging program for Inertial Navigation Unit
VRW	Velocity random walk
WGS	World Geodetic System

1 Úvod

Navigace označuje postupy, jak na základě informací o okolním prostředí určovat svou polohu, orientaci a také jak hledat cestu k cíli. V posledních letech se zejména venkovní navigace za pomoci satelitních navigačních systémů (nejčastěji GPS) a mapových podkladů stala běžnou součástí každodenního života. Navigace našla široké uplatnění např. v dopravě, zemědělství, stavebnictví, atd. a to především díky cenově dostupným navigačním přístrojům. Některé aplikace vyžadují, aby byla navigace prováděna i při nedostatečném, nebo žádném signálu GPS (např. uvnitř budov). Dále může být požadováno, aby byla poloha poskytována s vyšší frekvencí, než jsou schopny poskytovat GPS přijímače. V takových aplikacích jsou pak využívány navigační systémy, které využívají inerciální senzorů pro určení nejen polohy, ale i orientace v prostoru. Výhodou těchto systémů je nezávislost na externích zdrojích signálu.

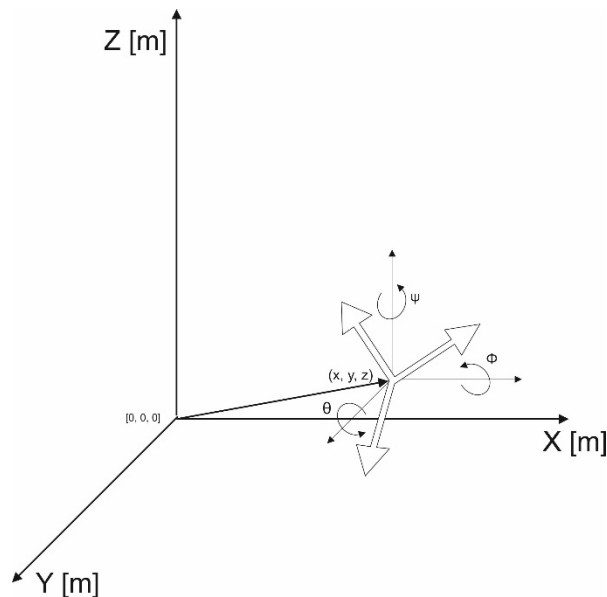
Cílem této práce je navrhnout a implementovat SW pro Inerciální Navigační Systém (INS), který využívá tříosé gyroskopy s optickým vláknem a tříosé quatz akcelerometry. Pro korekci odhadů polohy, rychlosti a orientace jsou využita data z GPS přijímače a z tříosého magnetometru. Další část této diplomové práce je zaměřena na návrh a implementaci SW pro PC, který zobrazuje měřená data a odhadované údaje o poloze, rychlosti a orientaci v reálném čase a rovněž umožňuje ukládání dat pro následná zpracování a další analýzy.

Teoretická část této diplomové práce se zabývá základními principy a metodami navigace, metodami zpracování signálu využitých senzorů a jejich kalibrací, dále také možnostmi časové optimalizace výpočtů v reálném čase. V praktické části je potom uveden celkový popis vyvíjeného INS, nastavení a popis komunikace s použitými senzory a GPS přijímačem. Praktická část rovněž obsahuje nalezené deterministické chybové modely akcelerometrů a gyroskopů nalezených v rámci kalibrace, popis jednotlivých SW bloků INS a také popis a výsledky provedených experimentů, které ověřují základní funkcionalitu a přesnost INS realizace.

2 Teoretický rozbor

2.1 Navigační systémy

Navigační systémy poskytují data orientace a pozice navigovaného objektu (NO) ve vztažné soustavě. Orientace je určena třídímním vektorem polohových úhlů rotace okolo os vztažné soustavy (θ – roll, ϕ – pitch, ψ – yaw). Pozice je určena třídímním vektorem (X, Y, Z) a rychlost vektorem (v_x, v_y, v_z) . Znárodnění vektorů orientace a pozice je vidět na Obr. 1.



Obr. 1: příklad orientace a pozice v referenční vztažné soustavě

Výpočet pozice, orientace a rychlosti (navigačních dat) navigovaného objektu je nejčastěji založen na známých počátečních navigačních datech v referenční soustavě. Následně jsou pozice a orientace korigovány na základě měření zrychlení a úhlových rychlostí. Měření jsou prováděna pomocí tříosých inerciálních senzorů [1]. Jsou to senzory zrychlení (akcelerometry – ACC) a senzory úhlových rychlostí (gyroskopy – GYR). Tyto senzory společně tvoří tzv. inerciální měřicí jednotku (Inertial measurement Unit - IMU). Navigační systémy, které využívají tento princip výpočtu pozice a orientace se nazývají inerciální navigační systémy (inertial navigation systém – INS).

2.1.1 Druhy inerciálních navigačních systémů

Existují dva základní typy INS. Prvním typem je INS s pohyblivou základnou a druhým je tzv. „strap-down“ INS:

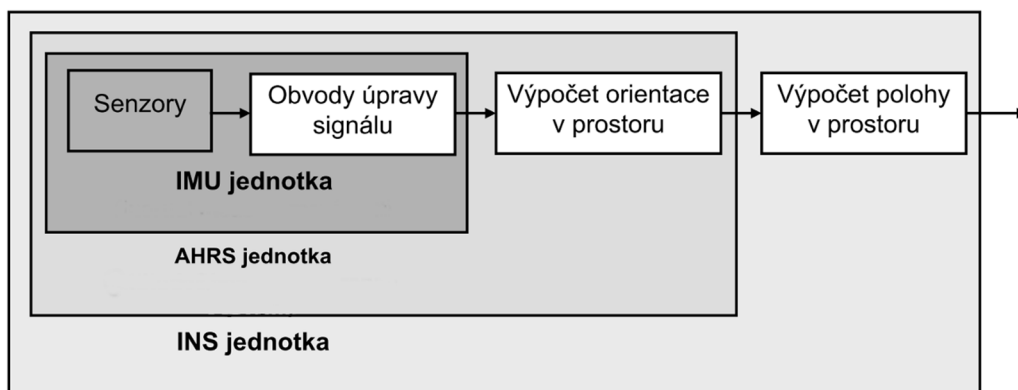
- **Navigační systém s pohyblivou základnou** (tzv. kardanový INS [2], [3]) se vyznačuje tím, že inerciální senzory jsou umístěny na platformě, která je mechanicky stabilizována vůči referenční soustavě i při pohybu a rotaci NO. Osy akcelerometrů měří tedy zrychlení přímo v osách

referenční soustavy. Kardanové INS dosahují vysoké přesnosti a jsou využívány např. v ponorkách. Nevýhodou tohoto typu INS je jejich velká hmotnost a rozměr.

- **Strap-down INS** se vyznačují tím, že senzory jsou pevně uchyceny k NO a jejich osy měření jsou zarovnané s osami NO. Do referenční soustavy, ve které je prováděna navigace je nutné měřená data matematicky zarovnávat. INS, kterou se zabývá tato práce je typem strap-down systému.

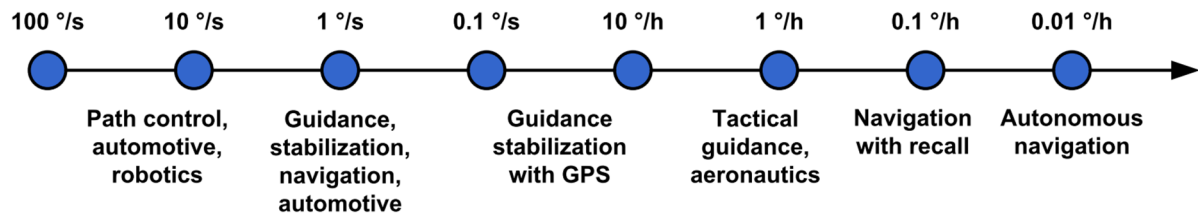
Systémy strap-down se členění z hlediska výstupních dat, což je naznačeno na Obr. 2.

- **Inerciální měřicí jednotky (IMU)** poskytují pouze zrychlení a úhlové rychlosti bez zarovnání do referenční soustavy.
- **Attitude and heading reference system (AHRS)** je rozšířením IMU. Navíc k inerciálním datům poskytuje i data o polohových úhlech a kurzu (θ, ϕ, ψ). V jednotkách AHRS se jako další senzor k výpočtu kurzu používá senzor magnetické indukce – magnetometr. Tento kurz je vztažen k magnetickému severu.
- **Inerciální navigační systémy (INS)** poskytují inerciální data, data pozice, data polohových úhlů a kurzu. Jsou to systémy, které využívají k výpočtům navigačních dat pouze inerciální senzory a známou počáteční pozici a orientaci. Pro získávání počáteční pozice NO je jako další systém často používán přijímač GNSS (Global Navigation Satellite System – Globální družicový polohový systém, například GPS – Global Positioning System).

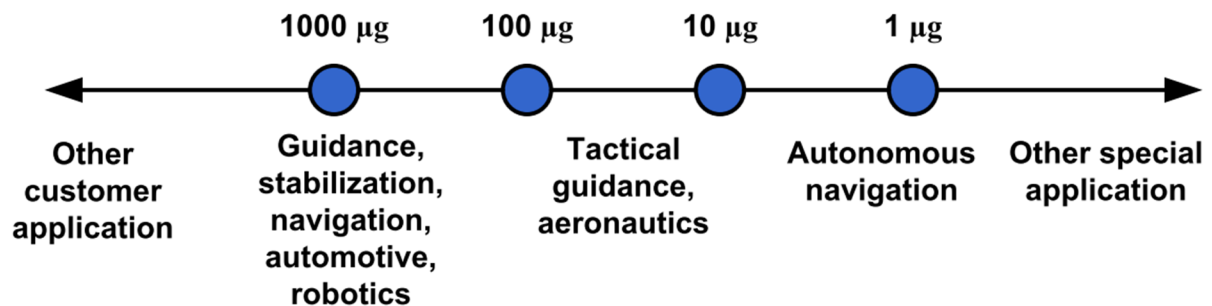


Obr. 2: členění inerciálních jednotek dle výstupů [4]

Dále lze INS dělit i podle kategorie inerciálních senzorů ([5], [6]), které jsou využívány pro měření dat. Kategorie senzorů je pro gyroskopy a pro akcelerometry definována dle přesnosti a šumových vlastností (viz Obr. 3, Obr. 4, Tab. 1).



Obr. 3: kategorie přesnosti gyroskopů [6]



Obr. 4: kategorie přesnosti akcelerometrů [6]

Tab. 1 ukazuje hodnoty chybových vlastností gyroskopů a akcelerometrů dle kategorie přesnosti [5].

Kategorie (Grade)		„Navigation“	„Tactical“	„Automotive“	„Consumer“
Maximální chyba v pozici za čas		1,9 (km/h)	19 – 38 (km/h)	2 (km/min)	3 (km/min)
Gyroskopy	Bias (°/h)	0,0005 – 0,01	1 – 10	180	360
	Chyba scale factoru (ppm)	5 – 50	200 – 500		
	Šum (°/h/√Hz)	0,002 – 0,005	0,2 – 0,5		
Akcelerometry	Bias (μg)	5 – 10	200 – 500	1200	2400
	Chyba scale factoru (ppm)	10 – 20	400 – 1000		
	Šum (μg/h/√Hz)	5 – 10	200 – 400		

Tab. 1: kategorie senzorů a jejich vlastnosti [5]

Nedostatky v přesnosti měření senzorů jsou největším zdrojem chyb v určení pozice a orientace, proto se často používá korekcí za pomoci dat GPS a magnetometru. Inerciální navigační systém, jehož SW je vyvíjen v rámci této práce využívá právě těchto korekcí.

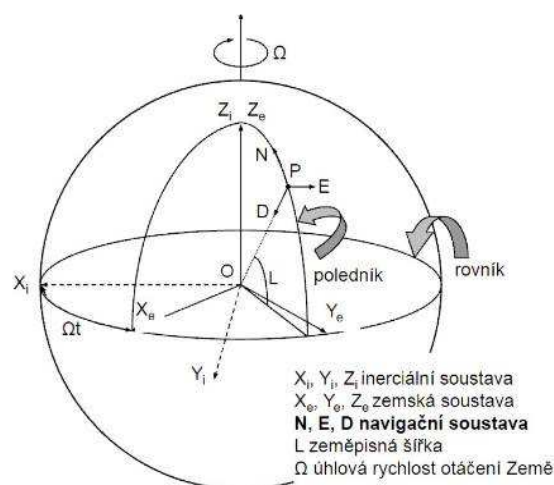
2.1.2 Souřadnicové soustavy

Existuje celá řada referenčních souřadnicových soustav, ve kterých se provádějí navigační výpočty a k nimž jsou poloha a pozice vztaženy. Referenční soustavy jsou ortogonální a pravotočivé. Mezi soustavami je možné informace o poloze a orientaci matematicky přepočítávat. Níže zmíněné referenční soustavy jsou zobrazeny na Obr. 5 vůči Zemi.

Inerciální soustava (Inertial frame) má počátek ve středu Země, osa Z je totožná se zemskou osou, ostatní osy směřují ve směru určených hvězd s neměnnou polohou vůči zemi, soustava se Zemí neotáčí.

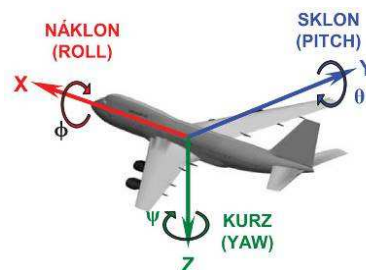
Zemská soustava (Earth Fixed Earth Centered Frame) má počátek ve středu Země a osa Z je totožná se zemskou osou. Osa X směřuje k průsečíku nultého poledníku a rovníku, osa Y je ortogonální k osám X a Z.

Navigační soustava (Navigation Frame) má počátek v pozici navigačního systému, proto se označuje jako lokální referenční soustava. Jednou z navigačních soustav, je soustava NED (North-East-Down [7], [8], [9], [10]). Osy směřují dle Obr. 5 v kladném směru os, tj. X (N) k severu, Y (E) k východu a Z (D) ve směru vertikály vůči oběma osám.



Obr. 5 ukázka souřadnicových soustav [6]

Soustava navigovaného objektu (Body Frame) je pevně spojena s NO a osy měřicí jednotky a NO jsou rovnoběžné. Strap-down systémy měří data v „body frame“ a do referenční soustavy je potřeba data matematicky zarovnat [11], [12]. Na Obr. 6 je ukázka směru os vůči osám letadla dle normy ISO [3]. Akcelerometry měří zrychlení v kladném smyslu dle směru os a gyroskopy v kladném smyslu dle pravidla pravé ruky okolo os.



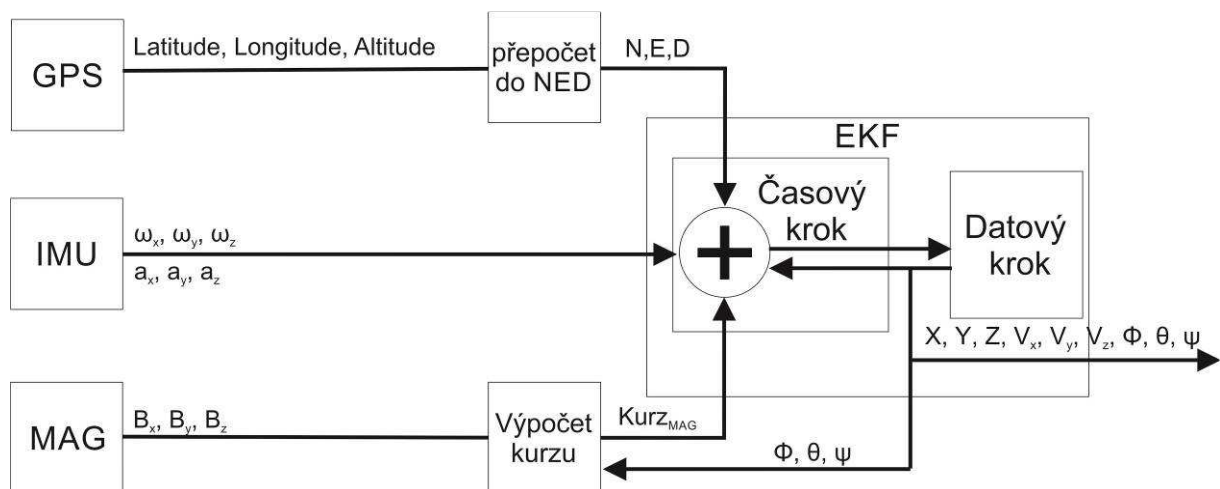
Obr. 6: ISO norma určující osy soustavy vůči navigovanému objektu [3]

Inerciální senzory navigačního systému, který je vyvíjen v rámci této práce, měří data v „body frame“. Tato data jsou matematicky zarovnávaná do navigační soustavy NED, ve které je prováděna navigační úloha. Ze soustavy NED lze navigační data transformovat do zeměpisných souřadnic [7], [6, p. 11].

2.1.3 Navigační úloha

Navigační úlohou je nazýván algoritmus, který na základě vstupních inerciálních dat a popřípadě dalších korekčních odhaduje navigační data. Jedním z algoritmů je Kalmanova filtrace (KF) [4, p. 149], [13], [14], [11]. KF je druhem adaptivní diskrétní filtrace. Je to rekurzivní iterativní algoritmus, který na základě modelu systému, jeho aktuálních stavů a sledování vstupních měřených dat odhaduje stavy následující. Principy výpočtů vychází ze statistického počtu. Odvození matematického aparátu pro KF lze nalézt v [13], [14].

KF pracuje s lineárními systémy, pro nelineární systémy existuje rozšířený Kalmanův filtr (Extended Kalman Filter – EKF [4, p. 162], [13, p. 178]). Pro účely této práce je vybrán EKF dle [12], kde je popsán model systému, stavový vektor, vektor měření i princip matematických zarovnání do navigační soustavy. Stavový vektor obsahuje v každém iteračním cyklu navigační data. EKF je pozměněno, tak aby byl využíván i korekční kurz spočítaný pomocí magnetometru. Na Obr. 7 je blokové schéma průběhu odhadu navigačních dat pomocí EKF. Vstupními daty EKF jsou inerciální data, data pozice v NED a kurz spočítaný z magnetometru [15]. V časovém kroku probíhá odhad následujícího stavového vektoru a kovarianční matice na základě stavu minulého [4], [11, p. 15]. V datovém kroku probíhá výpočet matice zesílení, aktualizace stavového vektoru a aktualizace kovarianční matice [4], [11, p. 15].



Obr. 7: blokové schéma EKF

2.2 Předzpracování dat pro navigační algoritmus

Tato kapitola se zabývá popisem digitální úpravy dat a principy kompenzace deterministických chyb inerciálních senzorů.

2.2.1 Filtrace a decimace digitálního signálu

Digitální filtrace, zejména low-pass filtr (spodní propust), je důležitou součástí zpracování signálu inerciálních senzorů. Omezuje frekvenční pásmo digitálního signálu a nepropouští do výstupního signálu vysokofrekvenční šum.

Existují dva typy digitálních filtrů. Prvním typem je FIR (finite impulse response) filtr a druhým typem je IIR (infinite impulse response) filtr.

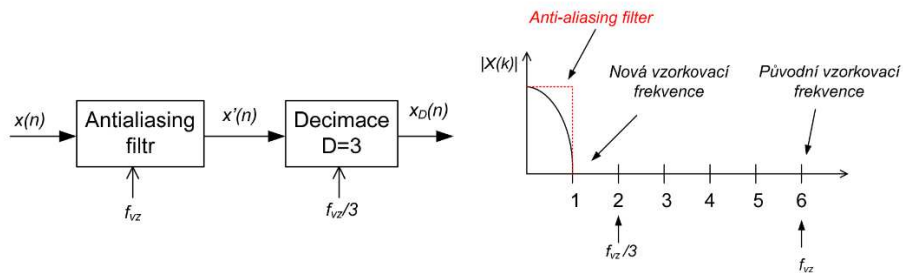
- **FIR:** FIR filtr řádu R je tvořen $R + 1$ koeficienty. Pro výpočet filtrovaného vzorku $out(n)$ je potřeba znát předchozích $R + 1$ vzorků vstupního signálu in . Výpočet digitální filtrace je implementací matematické operace konvoluce, která je popsána vzorcem (1). FIR má ostrou frekvenční charakteristiku, ale vysoké strmosti útlumu za hraniční propustnou frekvencí je docíleno vysokým řádem filtru, to způsobuje velké zpoždění signálu. FIR filtry jsou vždy stabilní. Tento typ filtru je využit k filtraci dat inerciálních senzorů v rámci práci

$$out(n) = \sum_{k=0}^R b_k \cdot in(n - k) \quad (1)$$

- **IIR:** Tento typ filtru má ve frekvenční charakteristice již při nižším řádu vysokou strmost útlumu za hraniční propustnou frekvencí oproti FIR. Nevýhodou však je, že filtr nemusí být vždy stabilní.

Vzorkovací frekvence F_{vz} je spjata s šířkou pásma dle vzorkovacího teorému [16]. Výpočetní nároky na zpracování dat rostou s vzorkovací frekvencí. Snížení vzorkovací frekvence se nazývá decimace, či „downsampling“. Decimovat signál je možné pokud užitečné frekvence signálu spadají do šířky pásma po snížení F_{vz} . Aby byl dodržen vzorkovací teorém a nedocházelo k efektu „aliasing“ [16], který způsobuje ztrátu informace, je nutné před decimací omezit šířku pásma tzv. „antialiasing“ filtrem.

Na Obr. 8 je ukázán příklad decimace vzorků a omezení šířky pásma. Vstupní signál $x(n)$ o frekvenci F_{vz} je předem filtrován „antialiasing“ filtrem. Výstupem filtru je signál $x'(n)$, který je poskytován na F_{vz} . Dále je signál decimován faktorem $D=3$ tak, že je vybrán každý D -tý vzorek vstupního signálu. Výstupní signál $x_d(n)$ je poskytován se vzorkovací frekvencí $\frac{F_{vz}}{3}$



Obr. 8: blokové schéma decimace a ukázka změny šířky pásma [17]

Pro účel filtrování dat inerciálních senzorů a jako „antialiasing“ filtr byl navržen FIR filtr pomocí „DSP toolboxu“ programu Matlab (fdatool). Pro aproximaci koeficientů filtru bylo zvoleno Kaiserovo okno [18], [19]. Parametry navrženého filtru jsou zaznamenány v Tab. 2.

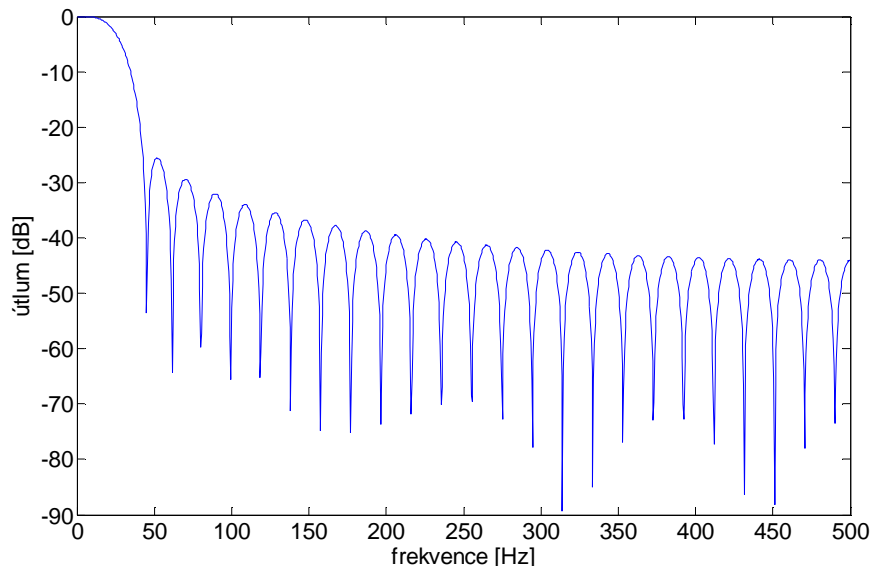
Parametr filtru	Hodnota parametru
Vzorkovací frekvence F_{vz}	1000Hz
Zlomová frekvence F_c	30 Hz
Řád filtru (R)	50
α (β)	1,7

Tab. 2: parametry FIR filtru

Jako zlomová frekvence F_c (cutoff frequency) je frekvence, při které má filtr útlum odezvy minimálně 6 dB (signál této frekvence bude mít po filtraci 1/2 svého výkonu: $-6 \text{ dB} = 20 \cdot \log_{10}(x) \rightarrow x = 10^{\frac{-6}{20}} \cong \frac{1}{2}$). Při návrhu filtru je dbáno na tři zásadní parametry:

1. Pro frekvence vyšší než je $\frac{F_{vz}}{2 \cdot D}$ je nutný vysoký útlum (vyšší než 20 dB) z důvodu dodržení vzorkovacího teorému
2. V propustné oblasti od 0 Hz do F_c Hz nesmí filtr zesilovat signál (útlum je větší než 0)
3. Velikost řádu je navržena, tak aby nevnášela zásadní zpoždění signálu, které je rovno zhruba $\frac{R}{2}$ vzorků signálu

Odezva filtru je znázorněna na Obr. 9. Po filtraci je propustné pásmo omezeno, tak aby i po decimaci faktorem $D = 10$ byl dodržen vzorkovací teorém. Frekvence po decimaci bude $F_{vzD} = \frac{F_{vz}}{D} = 100 \text{ Hz}$. Decimace se provádí jako výběr každého D-tého vzorku filtrovaných dat. Součet všech 51-ti koeficientů je roven jedné a každý koeficient je v absolutní hodnotě menší než 1, to také dokazuje, že filtr nezesiluje.



Obr. 9: frekvenční odezva filtru

2.2.2 Oprava deterministických chyb inerciálních senzorů

Z důvodů deterministických chyb, které lze v měřených datech inerciálních senzorů odhalit je potřeba pro senzory používat kompenzace, které tyto chyby eliminují. Chybami se rozumí zejména [1]:

- teplotní závislost měření
- neortogonalita zarovnání senzorů vůči sobě
- odchylky scale factoru (SC) oproti udávaným hodnotám
- biasy v měřených datech

Princip opravy teplotních závislostí senzorů

Zahřívání, či ochlazování senzorů v průběhu měření způsobuje proměnné odchylky v měřených datech. Tyto odchylky jsou závislé na měřené teplotě. Lze je považovat za deterministické v případě, že mají stejné vlastnosti při každém měření a při každé poloze senzoru. Následuje popis, měření, způsob přípravy a proces teplotní kompenzace [20].

1. Pro teplotní kompenzaci je nutné naměřit dlouhodobá data měřené veličiny senzoru a teploty senzoru při statické poloze jednotky. Po spuštění měření nesmí dojít k sebemenší změně polohy. Měření probíhá v určeném rozsahu teplot okolního prostředí. Hodnota měřené veličiny při ustálené vnitřní teplotě (po zahřátí senzoru), je správná referenční hodnota A_S . Pro každý senzor je naměřeno N vzorků měřené veličiny A_j a stejný počet vzorků teploty T_j ($j = 1 \dots N$).
2. Pro všechny vzorky dat vztažené k teplotě je zjištěna odchylka od A_S :

$$\forall j: \Delta A_j = A_j - A_S; j = 1 \dots N \quad (2)$$

3. Odchylky ΔA_j v závislosti na T_j vytváří křivku diferencí, která je popsána funkcí $F(\tau)$. Funkce $F(\tau)$ tedy vrací na základě teploty odchylku ΔA . Pokud je $F(\tau)$ možné aproximovat nějakou

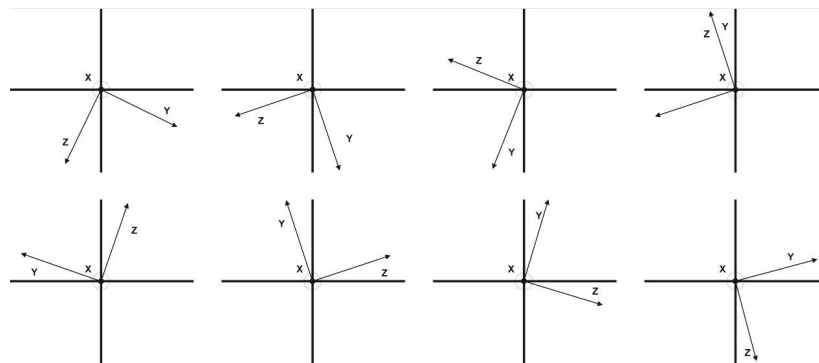
matematickou funkcí, tedy v případě, že má nějaký trend (např. exponenciální, polynomiální, logaritmický ...), je možné jako $F(\tau)$ využít tuto matematickou funkci. V případě, že trend nemá, je možné funkci $F(\tau)$ určit jako tabulku hodnot odchylek v závislosti na teplotě.

Princip kompenzace je takový, že při každém měření je zjištěna diference daná funkcí $F(\tau)$ za aktuální teploty. Tato diference je od aktuálního data měřené veličiny odečtena. Tak je provedena teplotní kompenzace.

Princip kalibrace akcelerometrů

Vedle teplotně závislých deterministických chyb se v měřených datech zrychlení objevují i chyby, které ovlivňují navigační výpočty a zároveň nejsou závislé na teplotě ani na čase měření. Jak bylo uvedeno výše, jsou to neortogonalita usazení senzorů, biasy a odchylky scale factoru. Tyto chyby v měření je možné kompenzovat.

Nejprve je nutné provést kalibrační měření při různých polohách tříosých akcelerometrů, či soustavy tří akcelerometrů. Osy měření musí být přibližně ortogonální a vůči sobě neměnné. Obr. 10 ukazuje princip a minimální počet poloh měření [21] z hlediska rotace kolem osy X (jednotka je přibližně zarovnána pro rotaci okolo dané osy). V každé poloze je potřeba zanechat jednotku ve statické poloze. Doba statického měření v každé poloze by měla být dostatečně dlouhá pro získání statisticky věrohodné střední hodnoty všech tří os zrychlení (v řádu tisíce vzorků). Střední hodnoty v každé poloze jsou použity jako měřená data, čímž se eliminuje náhodný šum. Podobným způsobem se měření provede pro osu Y i Z. Je tedy získáno minimálně 24 trojrozměrných vektorů [21] středních hodnot pro každou polohu (označují se jako kalibrační dataset zrychlení).

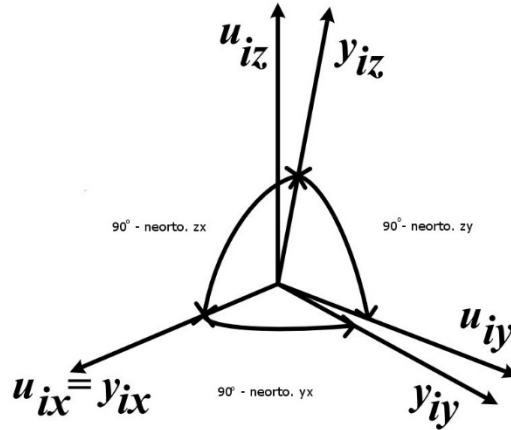


Obr. 10: polohy pro kalibrační měření [21]

Dále je třeba pro akcelerometry vytvořit tzv. sensor error model (SEM [21]), ten se skládá z rovnic, které je možné vyjádřit v maticové formě dle vzorce (3).

$$\mathbf{u}_a = \mathbf{T}_a \mathbf{S}_a (\mathbf{y}_a - \mathbf{b}_a) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \alpha_{xy} & 1 & 0 \\ \alpha_{zx} & \alpha_{zy} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{ax} & 0 & 0 \\ 0 & S_{ay} & 0 \\ 0 & 0 & S_{az} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} y_{ax} \\ y_{ay} \\ y_{az} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_{ax} \\ b_{ay} \\ b_{az} \end{bmatrix} \right) \quad (3)$$

Vektor \mathbf{u}_a je vektor kalibrovaných hodnot zrychlení. Matice \mathbf{T}_a je transformační matice, která neortogonální souřadnice vektoru zrychlení transformuje do ortogonálních souřadnic (ukázka neortogonalit je patrná na Obr. 11). Matice \mathbf{S}_a obsahuje scale factory pro jednotlivé osy. Vektor \mathbf{y}_a je měřené tříosé zrychlení v g při hrubém SC. Vektor \mathbf{b}_a je vektor biasů.



Obr. 11: ukázka neortogonalit os senzorů [21]

Následně se s výhodou se využívá vlastností gravitačního pole Země, které je téměř stálé, a tudíž i gravitační zrychlení má tuto vlastnost. Pro tříosé ortogonální měření zrychlení za stabilní polohy, bez pohybu platí [1]:

$$1g(9,80665 \frac{m}{s^2}) = \sqrt{y_{ax}^2 + y_{ay}^2 + y_{az}^2} \quad (4)$$

Iterační algoritmus, určuje parametry \mathbf{T}_a , \mathbf{S}_a a \mathbf{b}_a tak aby platil vztah (4). S pomocí Matlabu a jeho optimalizační funkce *fminunc* je spočítán SEM [21]. Vstupními daty *fminunc* je kalibrační dataset zrychlení. Jako kritériální funkce, pro minimalizaci „Root Mean Square Error“ (RMSE) je užitá následující funkce (5).

$$RMSE(\mathbf{x}, G) = \sqrt{\frac{\sum_i^n (|a_i(\mathbf{x})| - G)^2}{n}} \quad (5)$$

Vektor \mathbf{x} reprezentuje neznámé parametry SEM. Konstanta n je počet měřených orientací. G je velikost gravitačního zrychlení, tedy $1g$ ($9,80665m/s^2$). Velikost $|a_i(\mathbf{x})|$ je velikost každého vektoru zrychlení pro všechna měření i z datasetu kalibrace zrychlení, které je kalibrováno parametry \mathbf{x} . V průběhu iterací optimalizačního algoritmu se složky \mathbf{x} stabilizují tak, aby (5) nabývala minima při daném datasetu. Tímto je aproximován SEM akcelerometrů a při každém měření je možné data kalibrovat dle rovnice (3).

Princip kalibrace gyroskopů

Kalibrace gyroskopů je prováděna pomocí měření dat při různých polohách tříosých senzorů, či soustavy tří senzorů. Osy měření musí být přibližně ortogonální a vůči sobě neměnné. U gyroskopů, které mají menší rozlišení, než je úhlová rychlost otáčení Země ω_E lze provádět následujícím způsobem.

Hodnota ω_E [1] se rozkládá do všech třech os gyroskopů ω_g (6). Měření vstupních dat probíhá stejně jako v případě kalibračního měření akcelerometrů. Je potřeba průměrovat statické etapy měření, tím se eliminují šумы. Změřená a průměrovaná statická data se nazývají kalibrační dataset úhlových rychlostí.

$$\omega_E = 4,178 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ/\text{s} = \sqrt{\omega_{gx}^2 + \omega_{gy}^2 + \omega_{gz}^2} \quad (6)$$

Model SEM (7) pro gyroskopy se skládá z matice scale factorů S_g , vektoru biasů b_g , transformační matice pro kompenzaci neortogonalit T_g , vektoru měřených úhlových rychlostí ω_g a vektoru výstupních kalibrovaných úhlových rychlostí v_g . Vektor ω_g je získám měřením gyroskopů.

$$v_g = T_g S_g (\omega_g - b_g) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \beta_{xy} & 1 & 0 \\ \beta_{zx} & \beta_{zy} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{gx} & 0 & 0 \\ 0 & S_{gy} & 0 \\ 0 & 0 & S_{gz} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \omega_{gx} \\ \omega_{gy} \\ \omega_{gz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_{gx} \\ b_{gy} \\ b_{gz} \end{bmatrix} \right) \quad (7)$$

Algoritmus nalezení všech parametrů probíhá stejným způsobem jako v případě kalibrace akcelerometrů. Vstupními daty *fminunc* je kalibrační dataset úhlových rychlostí. Jako kriteriální funkce, pro minimalizaci „Root Mean Square Error“ (RMSE) je užita následující funkce (8).

$$RMSE(\mathbf{z}, G) = \sqrt{\frac{\sum_i^n (|\omega_i(\mathbf{z})| - \omega_E)^2}{n}} \quad (8)$$

Vektor \mathbf{z} reprezentuje neznámé parametry SEM gyroskopů. Konstanta n je počet měřených orientací. Velikost $|\omega_i(\mathbf{z})|$ je velikost každého vektoru úhlových rychlostí pro všechna měření i z datasetu kalibrace úhlových rychlostí, které je kalibrováno parametry \mathbf{z} . V průběhu iterací optimalizačního algoritmu se složky \mathbf{z} stabilizují tak, aby rovnice (8) nabývala minima při daném datasetu. Tímto je aproximován SEM gyroskopů a při každém měření je možné data kalibrovat dle rovnice (7).

2.3 Analýza šumových vlastností senzorů pomocí „Allan Variance“

Kromě deterministických chyb se v měřených datech inerciálních senzorů objevují i chyby náhodné. Metoda „Allan Variance“ AVAR [22], [3], [23], [6], [24] analyzuje signál senzorů v časové oblasti. Je to metoda iterativní a je schopna odhalit některé ze základních druhů šumových vlastností senzorů, které jsou označeny v Tab. 3 a Obr. 12 [1]. AVAR pracuje na základě dostatečně dlouhých statických dat signálu (až desítky hodin pro určení vlastností některých typů šumu). Signál je rozdělen do několika

časových intervalů, na nichž je počítána střední hodnota. Základní vzorec pro $AVAR^2$ je popsán v rovnici (9).

$$AVAR^2(\tau) = \frac{1}{2 \cdot (M - 1)} \sum_{i=1}^{M-1} (y_{i+1} - y_i)^2 \quad (9)$$

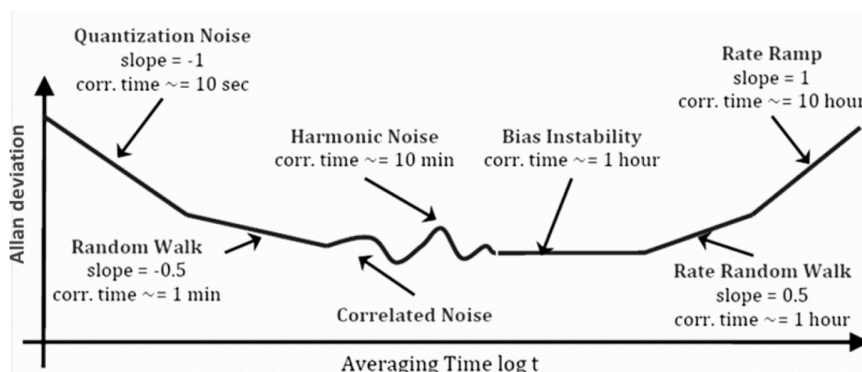
$$\tau = m \cdot T_s$$

Kde M je počet časových intervalů o počtu vzorků m , ve kterých analýza probíhá, T_s je vzorkovací perioda, τ je tedy velikost časových intervalů a y_i jsou střední hodnoty signálu v jednotlivých intervalech i .

Čím menší jsou intervaly τ , tím přesnější analýza s vyšší věrohodností je provedena a tím víc intervalů vzhledem k počtu vzorků dat je získáno. Věrohodnost výpočtu $AVAR^2$ je dána minimálním počtem devíti vzorků v každém intervalu. Celkový počet vzorků měření je označen jako N . Potom lze spočítat chybu výpočtu δ_{AVAR} (směrodatné odchyly):

$$\delta_{AVAR}(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \left(\frac{N}{m} - 1\right)}} \quad (10)$$

Pro $m \leq \frac{N}{9}$ je chyba směrodatné odchyly v procentech menší než 25 %. Výsledek $AVAR^2$ je možné vizualizovat pomocí logaritmického grafu v obou osách, kde na ose X je čas a na ose Y je druhá odmocnina $AVAR$, což je „Allan deviation“ – Alanova odchylnka. Typický průběh Alanovy odchylnky je vidět na Obr. 12, kde jsou označeny i parametry šumových vlastností [1].



Obr. 12: Typický průběh Allan Variance [1]

V Tab. 3 jsou zaznamenány typy šumů signálu senzorů a jejich vlastnosti dle Alanovy odchylnky.

Typ šumu	Zkratka	Sklon křivky (logaritmicky)	Hodnota koeficientu
„Quantization noise“	Q	-1	$Q = \sigma(\sqrt{3})$
„Angular/velocity random walk“	ARW/VRW	-1/2	$N = \sigma(1)$
„Flicker noise/bias instability“	BIN	0	$B = \frac{\sigma_{min}}{\sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot \ln(2)}}}$
„Rate/acceleration random walk“	RRW	+1/2	$K = \sigma(3)$
„Rate ramp noise“	RR	1	$R = \sigma(\sqrt{2})$

Tab. 3: typy šumů a jejich parametry v Allan Variance

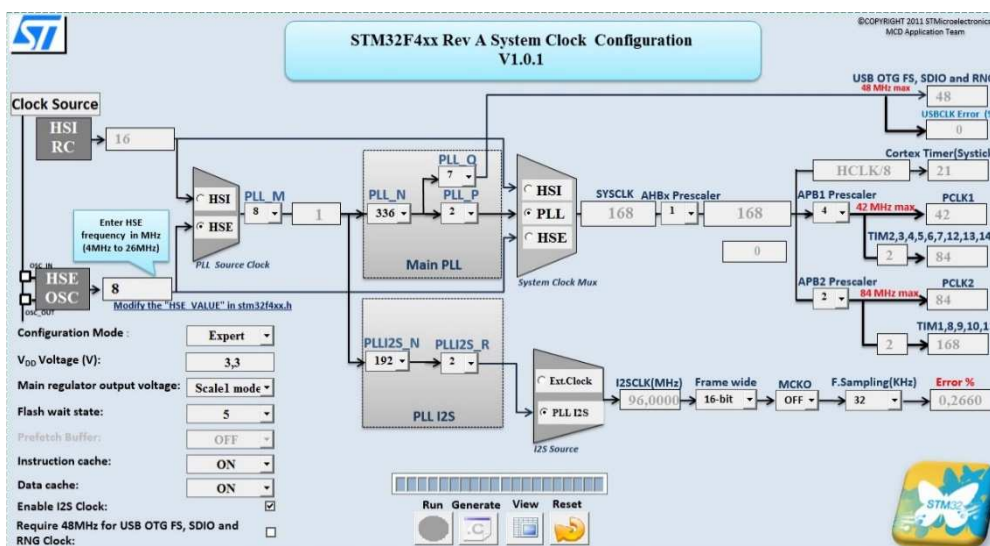
Hodnoty $AVAR^2$ pro jednotlivé šumové vlastnosti jsou nekorelované, celkový rozptyl lze tedy určit jako součet rozptylů jednotlivých složek šumu.

$$\delta_{celkový}^2 = \delta_Q^2 + \delta_{ARW}^2 + \delta_{BIN}^2 + \delta_{RRW}^2 + \delta_{RR}^2 \quad (11)$$

2.4 Mikrokontrolér pro inerciální navigační jednotku kategorie „Tactical grade“

Jako mikrokontroléry (μC) jsou označovány integrované obvody, které obsahují na jednom čipu mikroprocesorovou (μP) jednotku, instrukční i operační paměť a obvody vstupně-výstupních, komunikačních a aplikačních periférií. Obecně jsou μC využitelné ve vestavěných, průmyslových a multisenzorových jednotkách.

Pro aplikaci INS kategorie „Tactical grade“ (TG-INS) jsou vybrány jako sběrné, výpočetní a komunikační mikrokontroléry řady STM32F4 [25], [26]. Mikrokontrolér STM32F4 je vybaven řadou funkčních bloků a periférií, které jsou potřebné pro ovládání senzorů, časování sběru dat a efektivitu výpočtů. Jako výpočetní jádro na čipu je použitý μP architektury ARM Cortex-M4 [27]. Mezi periférie μC nutné pro řešení této práce patří zejména dostatečné množství periférií USART¹ (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter), periférií CAN (controller area network [28]), periférií SPI, časovačů (timers) a vstupně výstupních pinů. Rozvod hodinového taktu pro veškeré periférie je vidět na Obr. 13 [29]. Vnitřní frekvence STM32F4 jsou nastaveny za pomoci krystalu a PLL (Phase-Locked Loop) [25]. Takt jádra procesoru a hlavních systémových sběrnic AHB (Advanced High-Performance Bus [30]) je standardně nastaven na maximální hodnotu 168 MHz. Pro sběrnice APB (Advanced Peripheral Bus [30]) a k nim připojeným perifériím, jsou nastaveny nižší frekvence hodinového taktu.



Obr. 13: rozvod hodin μC STM32Fxx [29]

¹ V práci jsou periférie USART využívány vždy jako asynchronní, označení USARTx, nebo UARTx je následně považováno za konkrétní periférii μC , kde x je číslo periférie. Při obecném popisu dále vždy uváděno jen jako UART.

Pro vývoj aplikací μC je využit SW Keil μVision společnosti ARM. V základní „light“ verzi je poskytnuta podpora mnoha procesorů, dále také ARM kompilátor a debugger. Dále jsou poskytnuty základní knihovny pro ovládání výpočetního jádra μC . Další knihovny pro ovládání periférií μC jsou získány ze stránek výrobce [29]. Pro programování a „debugování“ programu μC je standardně využito programovací rozhraní SWD (serial wire debug [31]).

2.4.1 Floating point unit a optimalizace výpočtů v pohyblivé řádové čárce

STM32F4 obsahuje dva FPU (floating point unit) koprocesory pro výpočty v základní přesnosti plovoucí desetinné čárky (single-precision [32]). Dva FPU koprocesory, navíc ke standardním operacím, poskytují podporu SIMD (single instruction – multiple data) instrukcí. Zejména instrukce typu MAC (multiple and accumulate) jsou využitelné v oblasti digitálního zpracování signálu. Instrukce MAC je možné volat z programu v jazyce C prostřednictvím tzv. intrinsické (vložené) funkce typu:

```
__jméno_instrukce(adresy operandů...)
```

Instrukce VLMA [27] je typ instrukce MAC. Na vstupu jsou dva *floatové* operandy, které jsou mezi sebou vynásobeny a přičteny do *floatové* akumulátorové proměnné v jednom instrukčním cyklu procesoru (12). Její využití lze nalézt při implementaci FIR filtrace. Jeden z operandů může být vzorek dat a druhý koeficient FIR filtru, výsledek se uloží do akumulátoru pro výstup filtru. Dalším možným využitím je maticové násobení. Tento typ operace, tak jako i další SIMD instrukce, je možné využívat bez intrinsických funkcí vhodně zvoleným zápisem jazyka C, kdy ARM kompilátor automaticky vloží SIMD instrukci. Příklad vhodného zápisu (*OUT*, *A*, *B* jsou *float* proměnné):

$$OUT += A \cdot B \quad (12)$$

Další metodou optimalizace je využívání speciálních *floatových* funkcí. Existují goniometrické a další funkce, které jsou optimalizovány pro datový typ *float*. Knihovna „*math.h*“ obsahuje funkce s příponou „*f*“ (např. *sinf*, *cosf*, *sqrtf*). Také je možné využít knihovnu „*arm_math.h*“ speciálně pro procesory ARM, která umožňuje optimalizovat operace, které jsou přímo jádrem procesoru hardwarově podporovány (např. *arm_sqrt_f32*).

Tab. 4 ukazuje experimentální časové výsledky a zrychlení vybraných optimalizovaných operací vůči jejich standardním verzím. Experiment je proveden přímo v programu μC z řady STM32F4 při taktovací frekvenci jádra 168 MHz. Je prováděn pomocí měření trvání tisíců cyklů zkoumaných operací a následně je spočítán průměrný čas jejich vykonávání. Řádky tabulky 1. a 2. zkoumají zrychlení za pomoci VMLA instrukce. Řádky 3. až 5. ukazují možnosti optimalizace goniometrických funkcí pro *float* operandy a zastupují všechny ostatní goniometrické funkce (zrychlení ostatních gon. funkcí bylo srovnatelné). Řádky 6. až 7. ukazují zrychlení operací při využití přímo jejich HW podpory.

Číslo	Operace	Doba provedení [ns]	Zrychlení [%]
1.	$OUT = OUT + A \cdot B$ (standardní)	393	-
2.	$OUT += A \cdot B$ (SIMD)	298	132 %
3.	sin(double)	30 754	-
4.	sinf(float)	1 262	2437 %
5.	arm_sin_f32(float)	1 167	2635 %
6.	sqrt(double)	2001	-
7.	sqrtf(float)	583	343 %
8.	arm_sqrt_f32(float, float*)	322	621 %

Tab. 4: ukázka zrychlení některých optimalizovaných funkcí v C

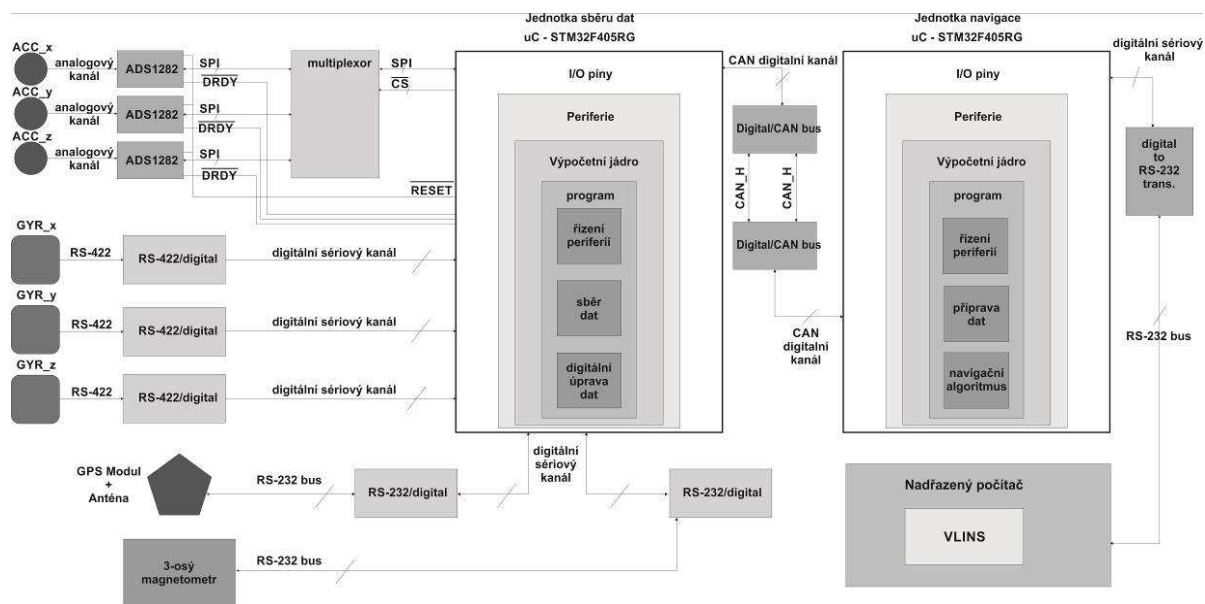
3 Praktické řešení navigační jednotky kategorie „Tactical grade“

Tato kapitola se zabývá popisem navigačního systému kategorie „Tactical grade“, včetně implementovaného SW a komunikačních protokolů. Popisuje provedení kalibrací senzorů. Dále obsahuje popis vizualizačního programu VLINS (Visualization and logging program for inertial navigation units) a jeho funkcionalit.

3.1 Popis inerciálního navigačního systému

TG-INS se skládá ze tří základních částí, přičemž základní blokové schéma jednotky je vidět na Obr. 14. První částí TG-INS je část senzorů, tedy akcelerometry, gyroskopy, magnetometr a přijímač GPS signálu. Druhou částí je jednotka sběru dat (JSD), neboli měřicí jednotka, která je tvořena μ C STM32F405. Třetí částí je jednotka navigace (JN), neboli výpočetní jednotka pro navigační algoritmy, kterou tvoří μ C STM32F407.

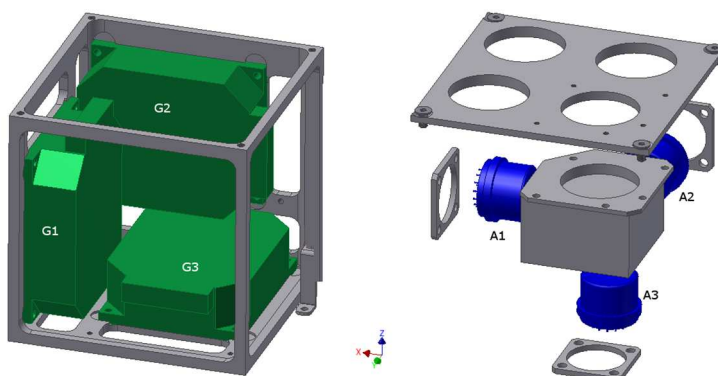
Data senzorů jsou sbírána, digitálně zpracovávána, decimována a upravována z hlediska deterministických chyb pomocí JSD. Takto upravená data jsou na 100 Hz odesílána pomocí sběrnice CAN (controller area network [28]) do jednotky navigace. V jednotce navigace (JN) jsou data upravena pro výpočty navigačních algoritmů a tyto výpočty jsou provedeny. Výstupem jednotky navigace jsou navigační data, která udávají pozici a orientaci v prostoru, a také vstupní data JN. Výstupní data jsou odesílány pomocí sběrnice RS232 na frekvenci 100 Hz. Data je možné zaznamenávat přes standardní sériový terminál, či pomocí VLINS software. VLINS je schopen data ukládat přímo do formátu pro Matlab pro další analýzy a zpracování. VLINS umožňuje „real-time“ vizualizaci dat.



Obr. 14: blokové schéma jednotky TG-INS

3.2 Sensory a měřicí systémy

Uspořádání senzorů je vidět na Obr. 15. Prvky značené Gx jsou gyroskopy a Ax jsou akcelerometry ostatní je konstrukce a rám jednotky. Vlastnosti a další informace o využitých senzorech jsou popsány níže. Akcelerometry jsou vůči sobě zarovnány ortogonálně a jsou zasunuty do rámu, tak aby jejich osy měřily zrychlení rovnoběžně s osami rámu. Taktěž uspořádání gyroskopů je ortogonální vůči sobě a měří uhlové rychlosti okolo os jednotky. Osy měření A1 a G1, A2 a G2, A3 a G3 jsou rovnoběžné. Při celém uspořádání je dbáno na minimalizaci chyb neortogonality senzorů vůči sobě a rovnoběžnost os akcelerometrů a gyroskopů.



Obr. 15: princip uspořádání senzoru jednotky TG-INS

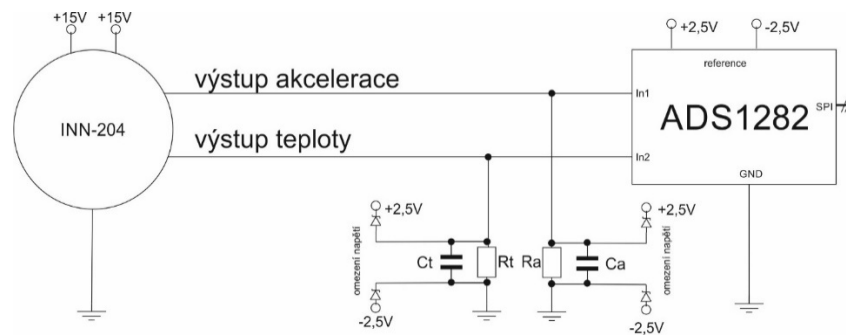
3.2.1 Akcelerometry INN-204

Akcelerometr INN-204 Obr. 16 je senzor měřící zrychlení v jedné ose. Jak bylo uvedeno výše, jsou využity tři ortogonálně uspořádané INN-204. Akcelerometr INN-204 je „quartz“ akcelerometr [33]. INN-204 má proudové výstupy pro měření zrychlení a měření teploty.



Obr. 16: akcelerometr INN-204 [33]

Princip zapojení všech tří INN-204 je vidět na Obr. 17. Výstupy INN-204 jsou převedeny na napětí pomocí rezistorů R_t a R_a . Napětí na rezistorech je dále digitalizováno pomocí dvoukanálového A/D převodníku (A/D, ADC – analog/digital convertor) ADS1282 [34]. Komunikace mezi převodníkem a μC je realizována prostřednictvím sběrnice SPI (Serial Peripheral Interface).



Obr. 17: způsob připojení INN-204 k ADC

Pro správnou funkci ADC při daném zapojení jsou registry ADS1282 [35] v aplikaci TG-INS nastaveny takto:

- Je nastaven Pulse SYNC mode
- Je nastaven High-resolution mode
- Data Rate Select (DRS) je nastaven na 8 kHz – vnitřní frekvence vzorkování.
- Je zapnut pouze Sinc filter block, který provádí filtraci signálu popsanou v [34, p. 19]
- Je nastaveno měření kanálu číslo 1 (napětí mezi piny AINP a AINN) bez jakéhokoliv zesílení

Z principu zapojení a z parametrů technického manuálu ADC je možné určit hrubý SC pro oba výstupy akcelerometru. $HSCA_z$ je hrubý SC pro zrychlení dle vzorce (13) a $HSCA_t$ je hrubý SC pro teplotu dle vzorce (14). Oba SC převádí digitalizované napětí na zrychlení dle vzorce (15) a na teplotu dle vzorce (16). Parametry pro výpočet hrubých SC a převod napětí na měřenou veličinu:

- inV_t, inV_z ... digitalizované napětí ve formátu celého čísla pro teplotu a zrychlení [–]
- LSB ... převodní konstanta ADS1282 z inV na napětí [V]; $LSB = 2,328306439e - 09[V]$
- R_a, R_t ... hodnota převodního odporu 150 Ω pro kanál zrychlení a 1000 Ω pro kanál teploty
- I_z ... hodnota proudového výstupu pro zrychlení 1 g: $I_z = 1,52e - 3 A/g$

- I_t ... hodnota proudového výstupu pro teplotu 1 K: $I_t = 1e - 6 A/K$
- $KtoC_{offset}$... offset přepočtu teploty z Kelvinů na stupně Celsia [-]
- T_{out} ... výstupní hodnota teploty [$^{\circ}C$]
- Z_{out} ... výstupní hodnota zrychlení [g]
- $HSCA_z, HSCA_t$... hrubé scale factory pro zrychlení [g] a pro teplotu [$^{\circ}C$]

$$HSCA_z = \frac{LSB}{Ra \cdot I_z} = 1,02118703464912e - 08 \quad (13)$$

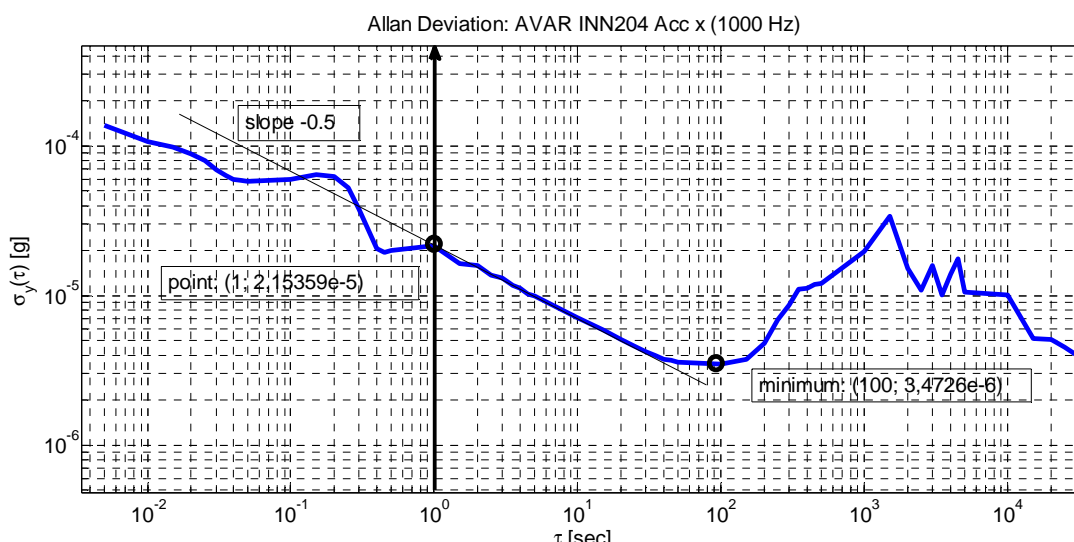
$$HSCA_t = \frac{LSB}{Rt \cdot I_z} = 2,328306439e - 06 \quad (14)$$

Rovnice přepočtu z měřeného napětí na výslednou veličinu:

$$T_{out} = inV_t \cdot HSCA_t - KtoC_{offset} \quad (15)$$

$$Z_{out} = inV_z \cdot HSCA_z \quad (16)$$

Pro statická měření dat akcelerometrů byla spočítána a vizualizována analýza AVAR na Obr. 18. Minimum je v bodě $\sigma(100) = 3,347 \cdot 10^{-6} g$. V tomto bodě je dle kapitoly 2.3 spočítán BIN takto: $BIN = \sigma(100) / 0,664 = 5,041 \cdot 10^{-6} g$. Dalším parametrem je „velocity random walk“ (VRW), ten lze spočítat z hodnoty AVAR v bodě $\sigma(1) = 2,1536 \cdot 10^{-5} g$ takto: $VRW = \frac{\sigma(1) \cdot 9,80665}{60} = 0,012671 m/s/\sqrt{h}$. Výrobce udává [33] hodnotu $BIN = 31,8 \cdot 10^{-6} g$. Hodnoty BIN a VRW řadí akcelerometr dle Tab. 1 z kapitoly 2.1.1 do kategorie „Tactical grade“.



Obr. 18: AVAR analýza akcelerometrů

3.2.2 Gyroskopy DSP-3100

Gyroskop DSP-3100 [36] na Obr. 19 je vláknový optický gyroskop (FOG – fibre optic gyro), který měří úhlovou rychlost s frekvencí 1000 Hz v jedné ose. V aplikaci TG-INS je tedy využito ortogonální uspořádání tří těchto gyroskopů. Výstup FOG je digitální s využitím sběrnice RS-422, která je převedena převodníkem *RS – 422/digital* na digitální sériovou linku pro UART periferie μ C. DSP-3100 neumožňují žádná nastavení vnitřní logiky. Hodnota scale factor a popis komunikačního protokolu je uveden v [36]. Rychlost sériové komunikace je pevně nastavena na 230 400 baud/s.



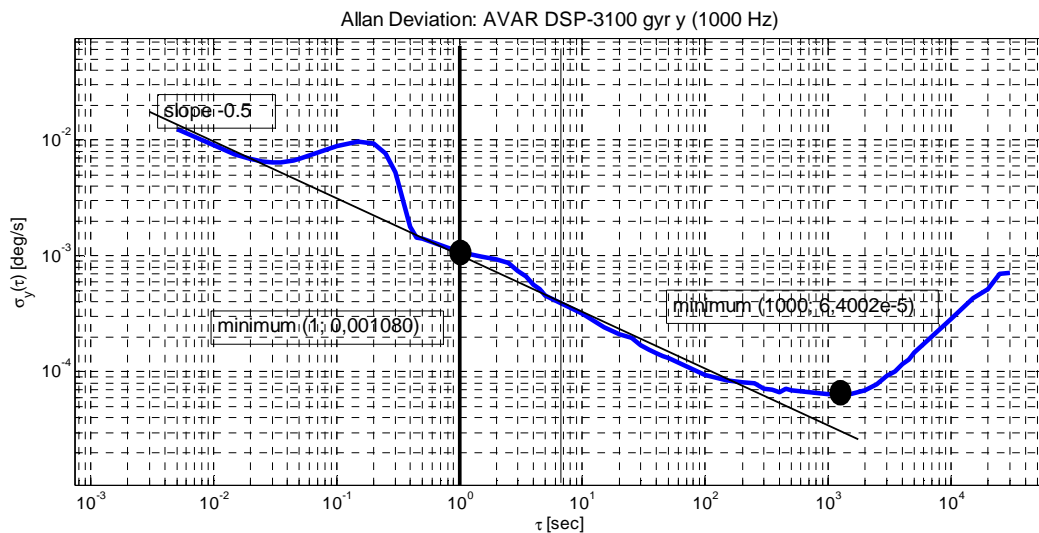
Obr. 19: gyroskop KVH DSP-3100 [36]

Parametry rovnice (17) pro přepočítání z dat v celočíselném formátu [36] na data ve $^{\circ}/s$:

- $inData_g$... vstupní celočíselná hodnota úhlové rychlosti [–]
- LSB_g ... převodní konstanta z $inData_g$ na stupně za sekundu $LSB_g = 2,384e - 05 [^{\circ}/s]$
- $outData_g$... výstupní data [$^{\circ}/s$]

$$outData_g = inData_g \cdot LSB_g \quad (17)$$

Pro statická měření dat gyroskopů byla spočítána a vizualizována analýza AVAR na Obr. 20. Z grafu lze zjistit minimum v bodě $\sigma(1000) = 6,4 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}/s$, hodnoty lze spočítat $BIN = \sigma(1000)/0,664 = 9,6 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}/s = 0,347015 \text{ }^{\circ}/h$. ARW se spočítá z bodu grafu $ARW = \sigma(1) = 1,080 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}/s = 0,064794 \text{ }^{\circ}/\sqrt{h} = 3,88764 \text{ }^{\circ}/h/\sqrt{Hz}$. Výrobce udává hodnoty $BIN = 1 \text{ }^{\circ}/h$ a $ARW=0,0667 \text{ }^{\circ}/\sqrt{h} = 4 \text{ }^{\circ}/h/\sqrt{Hz}$. Dle Tab. 1 z kapitoly 2.1.1 gyroskop splňuje kategorii „Tactical grade“ dle ukazatele BIN .



3.2.3 Magnetometr HMR-2300

Měřicí magnetometrická jednotka Honeywell HMR-2300 [37] na Obr. 21 (dále jen magnetometr) poskytuje data tříosé magnetické indukce v jednotkách Gauss v digitální podobě. K měření magnetometr využívá magnetorezistivní senzory. Magnetometr měří v rozsahu od -2 Gauss do 2 Gauss. Data jsou poskytována pomocí sběrnice RS-232, maximální frekvence vzorkování je 135 Hz. RS-232 je nastaven na rychlost 19 200 baud/s. Jeden rámeček má 8 bitů, jeden stop bit a je bez paritního bitu.



Obr. 21: HMR-2300 [37]

Měřená data každé osy jsou 16 bitová (2 byty). Přepočítání z hrubých dat v celočíselném formátu je provedeno dle rovnice (18) a parametrů [37] následovně:

- $inData_m$... vstupní celočíselná hodnota magnetické indukce [–]
- LSB_m ... převodní konstanta z $inData_m$ na mGauss $LSB_m = 1/15$ [mGauss]
- $outData_m$... výstupní data [mGauss]

$$outData_m = inData_m \cdot LSB_m \quad (18)$$

Nastavení magnetometru na požadované parametry probíhá sekvenčně dle Tab. 5:

Textový příkaz	Význam	Odpověď na příkaz
„Esc\r“	Vypne případný kontinuální režim měření	-
„*99P“	Nastaví čtení dat na požadavek	-
„*99WE *99B“	Nastaví binární režim dat	„BINARY ON\r“
„*99WE *99TN“	Zapne automatické S/R pulsy (popis [37])	„S/R ON\r“
„*99WE *99R=100“	Nastaví periodu vzorkování/vysílání dat na 100 Hz	„OK\r“
„*99 WE *99VN“	Zapne průměrování vzorků	„AVG ON\r“
„*99C“	Nastaví kontinuální mód odesílání dat	-

Tab. 5: Sekvenční příkazy pro nastavení HMR-2300

Digitální filtr implementovaný vnitřní logikou magnetometru provádí filtraci jako kombinaci hřebenevého filtru a „low-pass“ filtru, závislou na vzorkovací frekvenci. Chování filtru je popsáno v tabulce ([37, p. 8]). Díky filtraci, která je pro uživatele transparentní, není nutná žádná další filtrace získaných dat.

3.2.4 GPS modul u-blox NEO 6

Modul u-blox NEO 6 ([38], [39]) je přijímač GPS signálu, který zpracovává a interpretuje do mnoha formátů. Komunikace probíhá po sběrnici RS-232, která je nastavena na rychlost 115 200 baud/s, 8 bitová data, 1 stop bit, bez paritního bitu. Pro nastavení parametrů modulu jsou pomocí vyhodnocovacího SW dodávané společností u-blox (u-center [40]) vygenerovány nastavovací zprávy v Tab. 6, které jsou odeslány do modulu.

Zpráva hexadecimálně	Význam nastavovací zprávy
B5 62 06 08 06 00 C8 00 01 00 01 00 DE 6A	Nastavuje vzorkovací periodu měření na 200ms (5 Hz)
B5 62 06 00 14 00 01 00 00 00 D0 08 00 00 00 C2 01 00 07 00 03 00 00 00 00 00 C0 7E	Nastavuje „baud rate“ na 115 200 baud/s, nastavuje typ zpráv na formát NMEA

Tab. 6: nastavovací zprávy u-blox modulu

Nastavení komunikační rychlosti na 115 200 baud/s není přímočaré, jelikož některé moduly mají možnost zapamatování posledního nastavení. Komunikační rychlost předešlé komunikace je tedy potřeba nejprve zjistit a následně změnit na požadovanou rychlost. Princip zjištění nastavení rychlosti modulu spočívá v nastavení postupně všech možných kom. rychlostí periferie UART μ C, které modul umožňuje a odesílání nastavovacích zpráv. Pokud na zprávu přijde kladná odpověď, je aktuální komunikační rychlost zjištěna. Dále se nastaví požadovaná rychlost 115 200 baud/s a při této rychlosti se provede nastavení modulu.

Pro aplikaci TG-INS jsou zvoleny NMEA zprávy ([41]), které lze dekodovat v μ C. NMEA zprávy jsou textové, sestavené ze znaků ASCII ([42]) tabulky, to znamená, že dekodování NMEA zpráv probíhá

standardní konverzí textu na číselné hodnoty, či interpretací textových hodnot. Standardní NMEA zpráva je popsána níže. Pole „tt“ určuje identifikátor odesílatele zprávy, pro GPS je to „GP“. Pole „sss“ určuje identifikátor zprávy dle normy [41]. Následují textové a číselné informace zprávy oddělené ‚,‘. Na konci je ‚*‘ a pole „ch“, což označuje kontrolní součet (checksum), a to jako textovou reprezentaci hexadecimálního čísla toho součtu. Kontrolní součet je počítán jako 8 bitový XOR součet všech hodnot znaků ze zprávy mezi znakem ‚\$‘ a ‚*‘. Zpráva končí znaky „\r\n“² což je zakončení řádku.

```
„$ttsss,d1,d2,...*ch\r\n“
```

Geografické souřadnice (zeměpisná šířka a délka) jsou v NMEA zprávách ve formátu:

```
„ddmm.sss...,q,“
```

, kde „ddd“ jsou celé stupně souřadnic v rozmezí 0 až 180, „mm“ jsou celé minuty souřadnic v rozmezí 0 až 59, „sss...“ jsou desetinná část minut souřadnic a ‚q‘ je ‚N‘, nebo S pro zem. šířku, či ‚E‘, nebo ‚W‘ pro zem. délku. Znak q označuje polokouli N‘-„North“-severní, S‘-„South“-jižní, E‘-„East“-východní, W‘-„West“-západní polokoule Země.

Data zem. souřadnic je třeba přepočítat na stupně a uložit je do „single precision float“ formátu. Celá číselná část zprávy „ddmm.sss“ je označena jako „in“. Přepočet je uveden ve vzorci (19) a (20).

$$koor = celáČást\left(\frac{in}{100}\right) + \left(100 \cdot \frac{desetináČást\left(\frac{in}{100}\right)}{60}\right); \quad (19)$$

$$if(q == 'S' or q == 'W') koor = -koor;$$

Při převodu z „in“ do zeměpisných souřadnic (LLA – „Latitude, Longitude, Altitude“) i při převodu z LLA do navigační soustavy NED se díky chybám *float* reprezentace desetinných čísel ztrácí přesnost výsledků. Z tohoto důvodu se při převodech využívá reprezentace *double*. Navíc je v rámci zachování přesnosti možné provést i optimalizaci výpočtu, tak aby byl použit menší počet operací s plovoucí řádovou čárkou dle vzorce (20).

$$koor = textNaČíslo(dd) + \frac{textNaČíslo(mm.sss \dots)}{60}; \quad (20)$$

$$if(q == 'S' or q == 'W') koor = -koor;$$

3.3 Kalibrace a oprava deterministických chyb senzorů

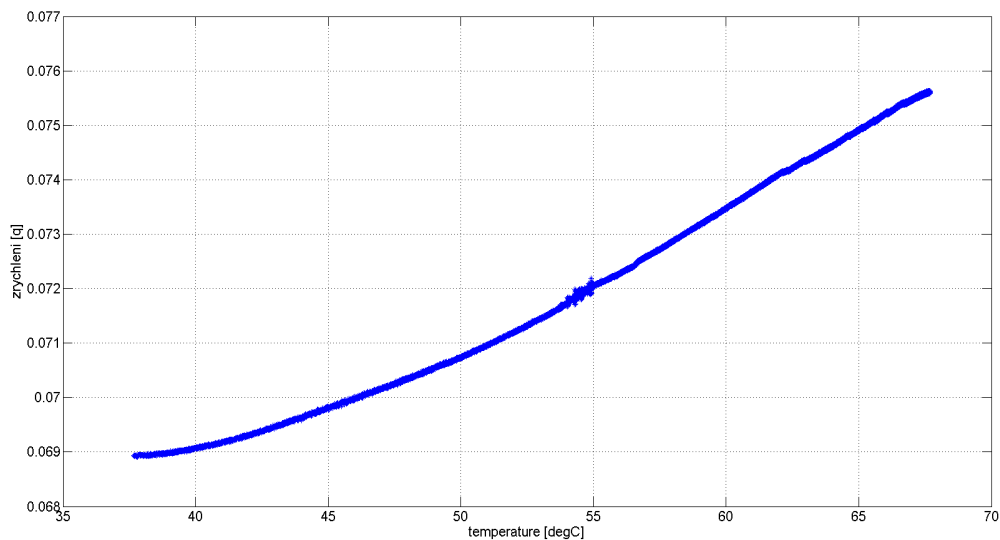
V následujících podkapitolách jsou popsány jednotlivé výsledky kalibrací pro akcelerometry a gyroskopy. Gyroskop KVH DSP-3100 neposkytuje informace o teplotě uvnitř senzoru. Není tedy možné provádět teplotní kalibraci a kompenzaci měření. Tato kompenzace je prováděna algoritmy, které jsou pro uživatele transparentní – výrobce je zavádí přímo do výpočetní logiky senzoru.

² Označuje „carriage return“ (CR) a „line feed“ (LF) ve standardním značení jazyku C pro řetězce ASCII znaků.

3.3.1 Kompenzace teplotních závislostí akcelerometrů

Měření teploty i zrychlení je pro tuto kalibraci prováděno ve voltech na obou kanálech. Data pro grafy této kapitoly jsou z důvodů přehlednosti přepočítané z napětí na teplotu a zrychlení pomocí $HSCA_t$ a $HSCA_z$.

Za stabilních okolních podmínek se po určité době vnitřní teplota INN-204 ustálí. Hodnota zrychlení měřená při ustálené vnitřní teplotě, je správná referenční hodnota napětí A_s^i (pro i-tý akcelerometr). Po měření je pro každý akcelerometr i naměřeno N vzorků napětí výstupu zrychlení A_j^i stejný počet napětí výstupu teploty T_j^i ($j = 1 \dots N$). Na Obr. 22 je příklad měření jednoho z akcelerometrů v závislosti na teplotě. Jedná se o dlouhodobé 18 hodinové měření. Z dat je patrný trend závislosti měření zrychlení na teplotě.

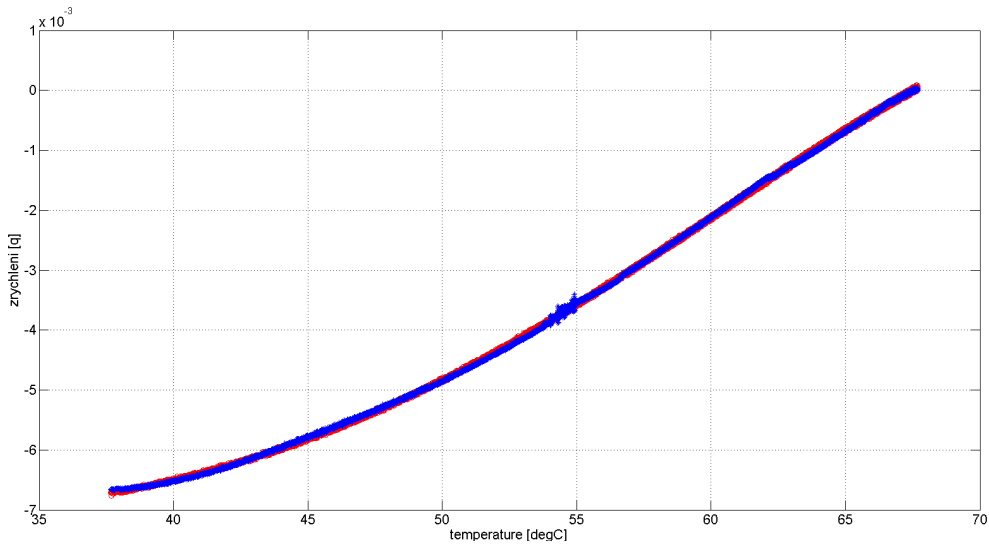


Obr. 22: data zrychlení v závislosti na teplotě senzoru

Pro všechny vzorky dat vztažené k teplotě je zjištěna odchylka:

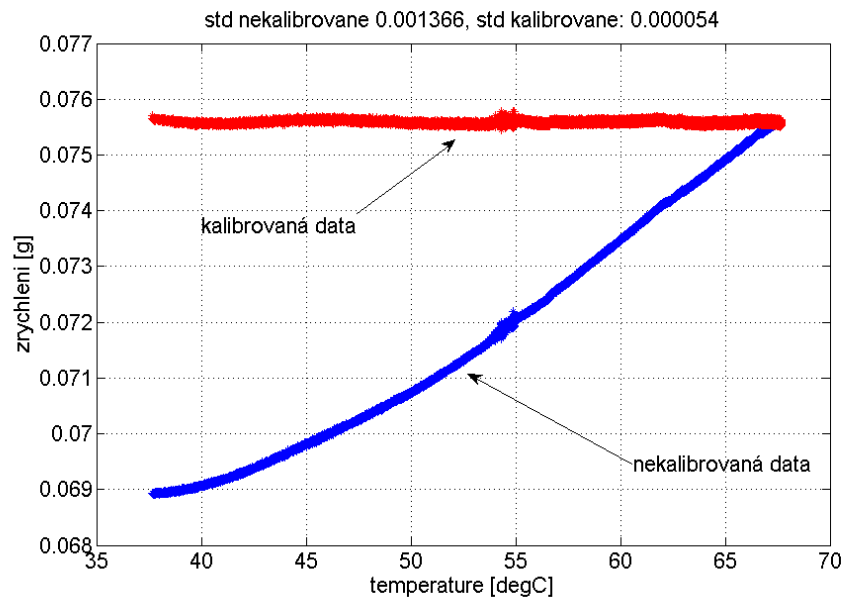
$$\forall i, j: \Delta A_j^i = A_j^i - A_s^i; i = 1 \dots 3; j = 1 \dots N \quad (21)$$

Diference ΔA_j^i v závislosti na T_j^i vytváří křivku odchylek zobrazených na Obr. 23. Tuto křivku je možné proložit funkcí $F^i(\tau)$ pro i-tý akcelerometr. Funkce vrací na základě napětí výstupu teploty spočítanou odchylku ΔA_τ^i .



Obr. 23: křivka odchylek zrychlení od referenční hodnoty v závislosti na teplotě

Při každém měření je zjištěna odchylka daná funkcí $F^i(\tau)$ za aktuální teploty. Tato odchylka je od aktuálního data napětí kanálu zrychlení odečtena. Tak je provedena „real-time“ teplotní kompenzace. Příklad kompenzace je vidět na Obr. 24. Průběh zrychlení proměnlivý v závislosti na teplotě je shodný s Obr. 22, po kompenzaci teplotních vlivů je výsledkem průběh zrychlením, který je stabilizován v závislosti na teplotě.



Obr. 24: ukázka teplotní kompenzace (kalibrace)

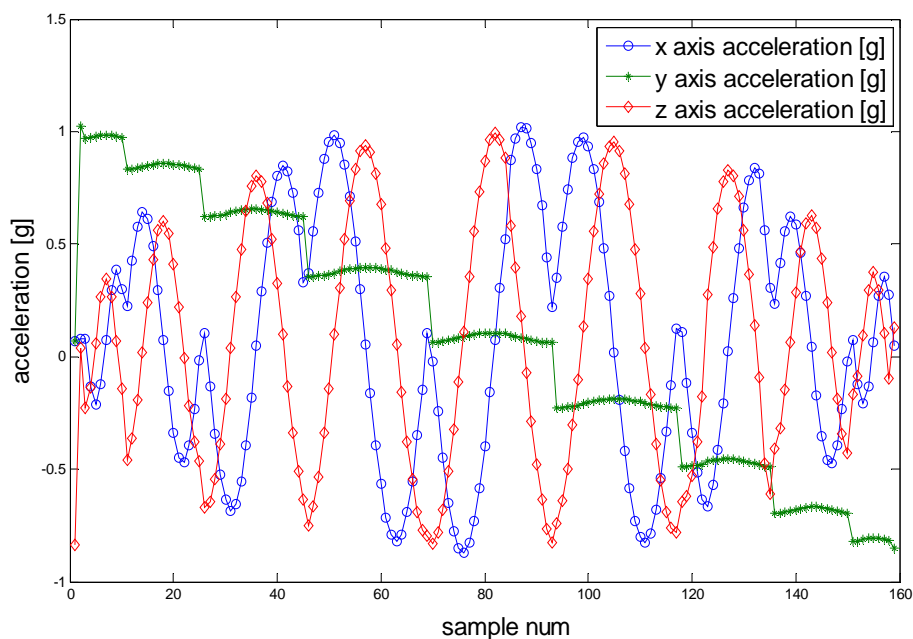
Tab. 7 ukazuje $F^i(\tau)$ pro každý akcelerometr. Nevyšší zlepšení směrodatné odchylky po kompenzaci měla polynomiální funkce 4tého stupně. Snížení STD po kompenzaci v procentech původního STD je také uvedeno v Tab. 7 pro každý akcelerometr.

Akcelerometr v ose jednoty	$F^i(\tau)$	STD signálu	STD signálu po kompenzaci	snížení STD v procentech STD původního signálu
akcelerometr pro osu X	$F^1(\tau)$ $= -1098\tau^4 + 1401\tau^3$ $- 669,1\tau^2 + 141,8\tau$ $- 11,25$	0,001366	5,4e-05	4%
akcelerometr pro osu Y	$F^2(\tau)$ $= -8884\tau^4 + 11610\tau^3$ $- 5688\tau^2 + 1237\tau$ $- 100,9$	9,6e-04	1,46e-04	15,20%
akcelerometr pro osu Z	$F^3(\tau)$ $= -4831\tau^4 + 6320\tau^3$ $- 3098\tau^2 + 674,6\tau$ $- 55,06$	0,001666	5,98e-04	35,90%

Tab. 7: funkce teplotní kompenzace pro každý akcelerometr

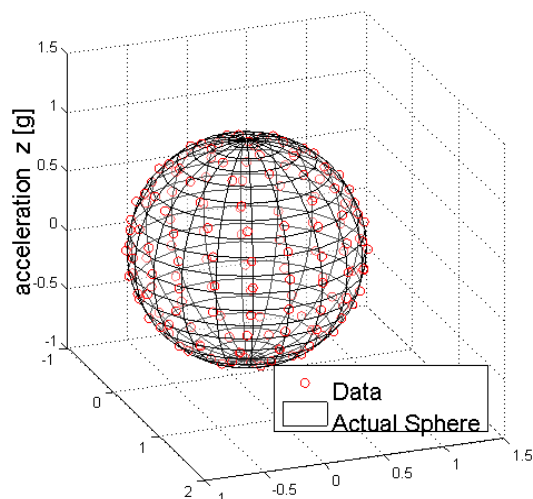
3.3.2 Kalibrace deterministických chyb akcelerometrů

Kalibrace akcelerometrů TG-INS je provedena dle kapitoly 2.2.2. Pro kalibraci akcelerometrů výše uvedených deterministických chyb je nejprve třeba naměřit data při různých polohách jednotky. Na Obr. 25 je zobrazeno měření tří os akcelerace ve 160-ti polohách TG-INS, což je kalibrační dataset, který je použit jako vstup kalibračního algoritmu. Hodnoty jsou v g spočítané za pomoci $HSCA_z$.



Obr. 25: kalibrační dataset akcelerometrů

Na Obr. 26 je vidět, že data v trojrozměrném prostoru aproximují sféru. Posun středu sféry v jednotlivých osách určuje iniciální biasy pro každou osu měření. Podíl očekávaného poloměru sféry (1 g), ku skutečnému poloměru aproximované sféry udává SC ze SEM. Tato aproximace SEM ovšem neřeší deformace sféry z důvodů neortogonalit os. Je tedy nutné provést iterační algoritmus popsany v kapitole 2.2.2



Obr. 26: sféra daná kalibračním datasetem akcelerometru

Model SEM, který je výstupem kalibračního algoritmu, je implementován do SW jednotky pro sběr dat a každé měření je následně kompenzováno tímto modelem. Z hlediska časové optimalizace a minimalizace výpočtů je implementován model na základě rovnic (22) až (24), kdy se rozepíše maticové operace popsané v kapitole 2.2.2.

$$u_{ax} = S_{ax}(y_{ax} - b_{ax}) \quad (22)$$

$$u_{ay} = S_{ax}\alpha_{xy}(y_{ax} - b_{ax}) + S_{ay}(y_{ay} - b_{ay}) \quad (23)$$

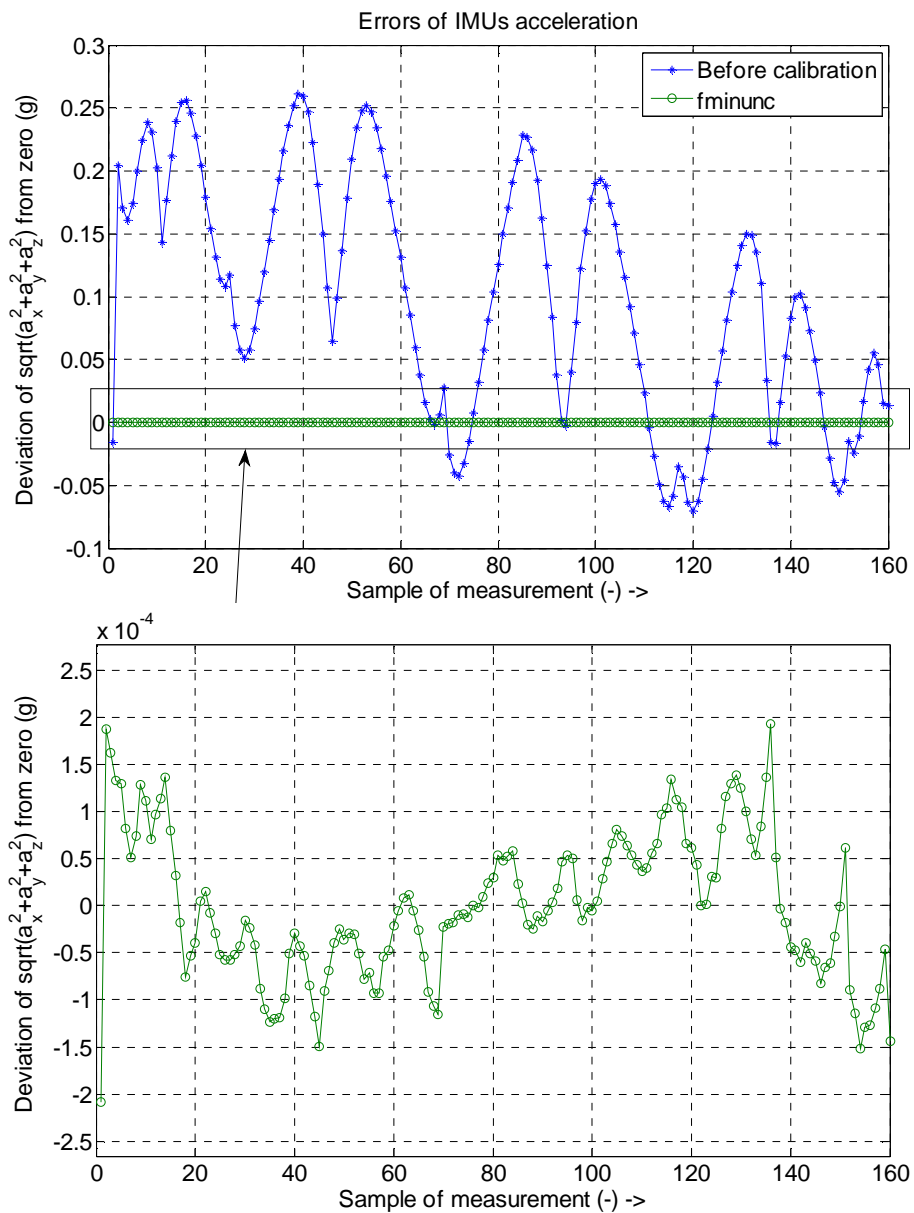
$$u_{az} = S_{ax}\alpha_{zx}(y_{ax} - b_{ax}) + S_{ay}\alpha_{zy}(y_{ay} - b_{ay}) + S_{az}(y_{az} - b_{az}) \quad (24)$$

Tab. 8 ukazuje hodnoty parametrů SEM pro akcelerometry.

Parametr SEM akcelerometrů	Hodnota
S_{ax}	0,900989 [-]
S_{ay}	0,908290 [-]
S_{az}	0,934953 [-]
b_{ax}	0,091199 [g]
b_{ay}	0,098869 [g]
b_{az}	0,091908 [g]
α_{xy}	0,005881 [-]
α_{zx}	0,001944 [-]
α_{zy}	-0,000447 [-]

Tab. 8: parametry SEM akcelerometrů

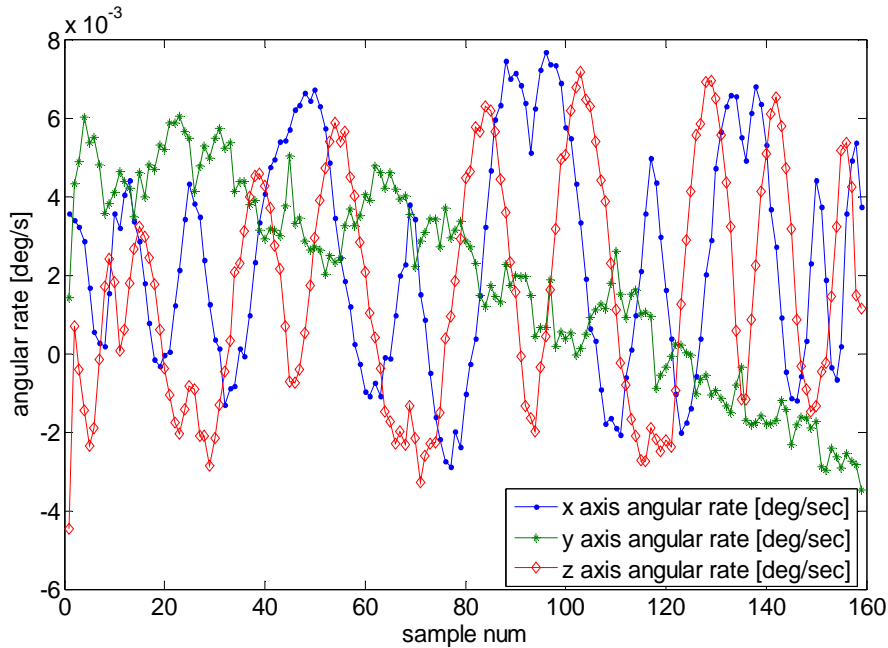
Po kalibraci se odchylky velikosti vektoru zrychlení od referenční hodnoty (1 g) pro kalibrační dataset akcelerometrů sníží o více než tisícinu odchylky před kalibrací. V grafech na Obr. 27 jsou znázorněny odchylky před kalibrací a po kalibraci a také přiblížení odchylek po kalibraci.



Obr. 27: odchylky velikosti vektoru zrychlení od referenční hodnoty

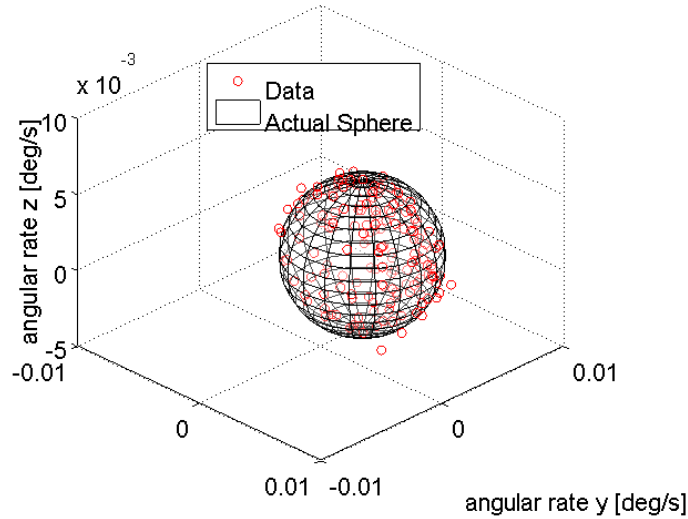
3.3.3 Kalibrace deterministických chyb gyroskopů

V technickém manuálu gyroskopu KVH DSP-3100 je možné najít hodnotu rozlišení gyroskopu, která je určena jako $2,384 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ/\text{s}$. Což je asi 100 krát nižší hodnota úhlové rychlosti otáčení země ω_E . Lze tedy použít metodu popsanou v kapitole 2.3.2. Obr. 28 vizualizuje měření kalibračního datasetu gyroskopů ve 160-ti různých polohách TG-INS.



Obr. 28: kalibrační dataset gyroskopů

Tak jako akcelerometry při statickém měření v dostatečném množství poloh aproximují třídimenzi-
onální sféru, tak i gyroskopy aproximují sféru na Obr. 29. Data gyroskopů ve třech osách vůči sobě by
měla opisovat sféru s poloměrem rovným úhlovému otáčení Země $4,16 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{s}$. Při některých ruši-
vých jevech jako jsou záchvěvy kalibrační platformy jsou vidět odchylky měřených dat vůči povrchu
sféry. Ovšem i v tomto případě lze sféru aproximovat a zjistit scale factor a offsety v jednotlivých osách.
Podobně jako v případě akcelerometrů je potřeba provést iterační algoritmus, který přesněji určí SEM.



Obr. 29: sféra daná kalibračním datasetem gyroskopů

Model SEM, který je výstupem kalibračního algoritmu je implementován do SW jednotky pro sběr dat a každé měření je následně kompensováno tímto modelem. Z hlediska časové optimalizace a minimalizace výpočtů je implementován model na základě rovnic (25) až (27), kdy se rozepíší maticové operace popsané v kapitole 2.2.2.

$$v_{gx} = S_{gx}(\omega_{gx} - b_{gx}) \quad (25)$$

$$v_{gy} = S_{gx}\beta_{xy}(\omega_{gx} - b_{gx}) + S_{gy}(\omega_{gy} - b_{gy}) \quad (26)$$

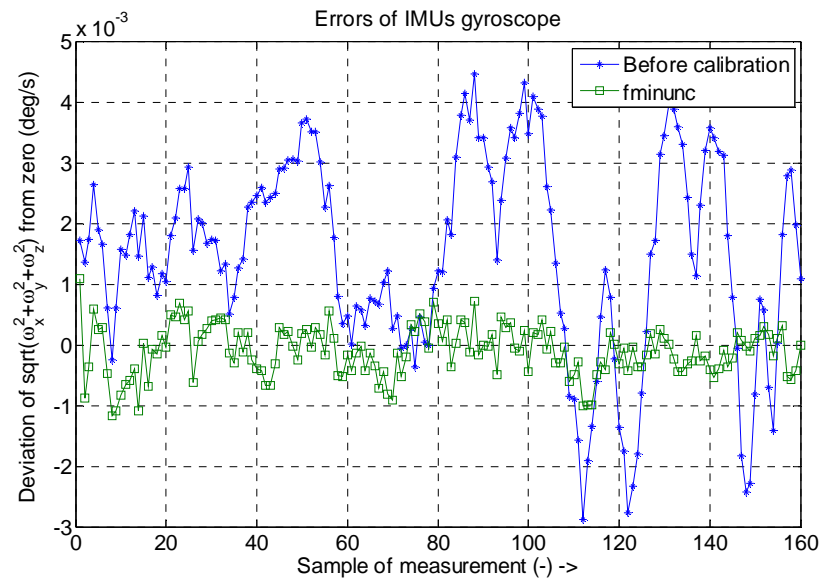
$$v_{gz} = S_{gx}\beta_{zx}(\omega_{gx} - b_{gx}) + S_{gy}\beta_{zy}(\omega_{gy} - b_{gy}) + S_{gz}(\omega_{gz} - b_{gz}) \quad (27)$$

Tab. 9 ukazuje hodnoty parametrů SEM pro gyroskopy.

Parametr SEM akcelerometrů	Hodnota
S_{gx}	0.819243 [-]
S_{gy}	0.8761961 [-]
S_{gz}	0.856612 [-]
b_{gx}	0.002467 [$^{\circ}/s$]
b_{gy}	0.000794 [$^{\circ}/s$]
b_{gz}	0.001658 [$^{\circ}/s$]
β_{xy}	0.146973 [$^{\circ}/s$]
β_{zx}	-0.071954 [-]
β_{zy}	0.343574 [-]

Tab. 9: parametry SEM gyroskopů

Po kalibraci se odchylky velikosti vektoru úhlových rychlostí od referenční hodnoty (ω_E) pro kalibrační dataset gyroskopů sníží dle Obr. 30. V grafu jsou znázorněny odchylky před kalibrací a po kalibraci.

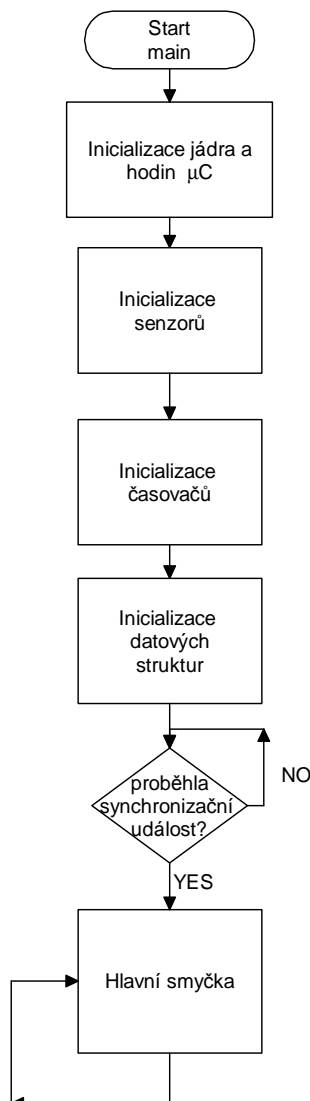


Obr. 30: odchylky velikosti vektoru úhlových rychlostí od referenční hodnoty

3.4 Popis funkce měřicí jednotky – jednotky sběru dat

Tato kapitola popisuje program a popis činnosti jednotky sběru dat (JSD). Účel jednotky sběru dat je získávání dat senzorů a měřících jednotek, jejich digitální filtrace, decimace, korekce deterministických chyb a teplotních závislostí a odesílání dat po komunikační sběrnici CAN pro další zpracování.

3.4.1 Program jednotky sběru dat



Obr. 31: vývojový diagram main pro JSD

Po zapnutí napájení TG-INS se načte hlavní program (main) μC , který je zde popsán. Hlavní struktura programu je vidět na Obr. 31. Na začátku programu jsou nastaveny základní parametry jádra procesoru, zapnutí FPU koprocessorů a je nastaven hodinový takt a rozvod hodin pro periferie μC za pomoci PLL. Taktéž je nastaven takt hlavního systémového časovače „SysTick“ [43] na 100 Hz. Na základě SysTick je počkáno více jak 20 s, což je dostatečná doba pro základní vnitřní inicializaci všech senzorů a připojených jednotek.

V rámci inicializace senzorů (a také ADC pro akcelerometry, dále jen senzorů), která je popsána níže, jsou nastaveny parametry využitých komunikačních periférií μC . Také jsou nastaveny parametry řídicích i komunikačních pinů. Dále jsou nastaveny přerušení a ukazatele na obslužné rutiny přerušení jednotlivých periférií.

Inicializace časovačů spočívá v nastavení taktů časovačů, přerušení a nastavení obslužných rutin přerušení při tiku časovače. Od tiku časovačů je odvozována synchronizace vyčítání senzorů, odesílání CAN zpráv, přepínání kanálů ADC a získávání času běhu systému. Je využit časovač TIM3 [25], jehož tik, a tedy i volání přerušení, je nastaveno na frekvenci 1 kHz (jednou za ms). V přerušení TIM3 jsou kopírována data z datových struktur pro vyčítání do datových struktur pro další zpracování. Dále jsou v přerušení nastaveny příznaky

pro další vyčtení ADC akcelerometrů, pro zahájení filtrace dat a je inkrementován čas běhu systému. Od času běhu systému je odvozena i perioda změny kanálu ADC pro vyčtení teploty (popsáno dále). Dalším časovačem, který je nastaven je TIM5. Ten je nastaven na frekvenci tiku rovnou vnitřní vzorkovací frekvenci ADC, tedy 8 kHz (jednou za 125 μs). TIM5 je využit pro neblokovací čekání na změnu kanálu ADC (nutné čekání před další konverzí dat ADS1282 při změně registrů [35, p. 36]).

Při inicializaci datových struktur jsou nastaveny defaultní hodnoty datových struktur, jako jsou vyrovnávací datová pole (buffer), „buffer“ filtrace FIR, pole koeficientů FIR, či struktury CAN zpráv.

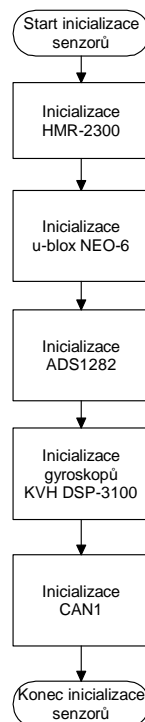
Následně je očekávána synchronizační událost. Touto událostí se rozumí příchod dat některého ze tří gyroskopů. Při příchodu prvních dat některého z gyroskopů po inicializaci časovačů, se spustí časovač TIM3, který má stejnou frekvenci jako je frekvence vysílání dat gyroskopů. Tím je systém synchronizován s prvním gyroskopem (význam synchronizační události popsán v kapitole 3.4.2). Po synchronizační události se spustí hlavní smyčka, ve které probíhá vlastní získávání a úprava dat.

Inicializace senzorů

Inicializace senzorů probíhá v pořadí dle Obr. 32. Pro každý senzor jsou nejprve nastaveny parametry komunikační periferie μ C. Dále jsou nastaveny parametry samotných senzorů, pokud to umožňují

Inicializace Magnetometru HMR-2300: Nejprve je nastavena periferie USART2 pro piny μ C PA2 a PA3 ([26]). Je nastavena jako asynchronní o rychlosti 19 200 baud/s, délky rámce 8 bitů, 1 stop bitu, bez paritního bitu. Také je nastaveno přerušení při příjmu bytu. Následuje konfigurace magnetometru sekvencemi textových příkazů z kapitoly 3.2.3. Po nastavení začne magnetometr periodicky vysílat data na 100 Hz.

Inicializace GPS modulu u-blox NEO-6: Nejprve je nastavena periferie USART1 jako asynchronní pro piny μ C PA9 a PA10 ([26]). USART1 je nastaven na délku rámce 8 bitů, 1 stop bit, bez paritního bitu. Postupným odesíláním nastavovacích zpráv z kapitoly 3.2.4 při všech podporovaných rychlostech je při potvrzovací odpovědi zjištěna případná přednastavená rychlost komunikace. Následně je odeslána zpráva pro nastavení rychlosti 115 200 a periferie USART1 je na tuto rychlost také nastavena. Na této kom. rychlosti se nastaví perioda vzorkování na 200 ms (5 Hz). Také je zapnuto přerušení při příjmu bytů. Po nastavení začne modul periodicky vysílat data na 5 Hz.



Obr. 32: vývojový diagram inicializace senzorů pro JSD

Inicializace ADS1282 převodníků pro akcelerometry:

1. Inicializace ADS1282 začíná nastavením SPI1 periferie μ C ([25], [26]) a všech komunikačních i řídicích pinů. Jako pin hodinového taktu (clock) je využit pin PA5, jako pin SPI-MISO PA6 a jako pin SPI-MOSI PA7. Jako piny výběru ADC (\overline{CS}) jsou určeny piny PB0, PC4, PA4, a pro piny připravenosti vzorkovaných dat (\overline{DRDY}) jsou využity piny PB1, PC5 a PB6 (v pořadí pro akcelerometr měřící v ose X, Y a Z). Jako pin \overline{RESET}

všech ADC je určen pin PB9. Hodinový takt SPI1 je nastaven na 1,3 MHz. SPI1 pracuje v 8mi bitovém (1 byte) módu, kdy první bit je nejvyšší bit celého bytu. Klidový stav clock je nastaven na hodnotu low³ a vzorkování digitálního signálu je prováděno při náběžné hraně od stavu low do stavu high⁴. Také je zapnuto přerušování příjmu bytu pro SPI1

2. Následně se všechny tři ADC restartují pomocí společného pinu \overline{RESET} , který je v klidovém stavu v hodnotě high. \overline{RESET} pin je nastaven do hodnoty low minimálně po dobu 2 period vnitřního hodinového tiku ADC, který je určen oscilátorem o frekvenci 4,096 MHz, doba setrvávání pinu v hodnotě low je tedy minimálně 0,5 μ s. Poté je pin nastaven zpět do hodnoty high, a tím je provedeno resetování veškerého nastavení ADC.
3. Po resetu se nejprve vyčtou hodnoty všech registrů všech ADC a porovnají se s hodnotami v manuálu, pokud jsou správné, je to indikace toho, že se ADC restartovaly a jsou připraveny k použití (pokračuje se na bod 4). V opačném případě se bod 2 provádí znovu. Po 5-ti neúspěšných pokusech vyčíst správné hodnoty, je konkrétní ADC označen za nefunkční, tento stav je indikován blikáním informační LED a je oznámen uživateli v komunikaci s nadřazeným systémem.
4. Dále jsou nastaveny registry ADC na požadované hodnoty dle kapitoly 3.2.1. Veškerá nastavení jsou ověřena opětovným vyčtením registrů.

Inicializace Gyroskopů KVH DSP-3100: Periferie UART jsou pro gyroskopy nastaveny vždy jako asynchronní. Gyroskopy neumožňují žádné nastavení, je tedy možné využít jen přijímací pin periferie μ C. USART3 pro pin PB11, UART4 pro pin PC11 a UART6 pro pin PC7. UART periferie jsou nastaveny na rychlost komunikace 230 400 baud/s, při velikosti rámce 9 bitů (paritní je 9. bit), 1 stop bit, 1 lichý paritní bit. Dále jsou zapnuty přerušování příjmu dat, a také při nečinnosti na sběrnici, což odděluje bloky/vzorky vysílaných dat. Gyroskopy začnou kontinuálně poskytovat své bloky dat maximálně 5 ms ([36]) po zapnutí napájení.

Inicializace CAN1: CAN1 je nastaven na komunikační rychlost 1 Mbit/s pro piny PA11 (pin příjmu dat) a PA12 (pin vysílání dat). Rychlost CAN1 je nastavena při znalosti vstupní frekvence periferie na sběrnici APB1 ($t_{PCLK}=42$ MHz), předděliče (BRP=6) a velikosti časových kvant $t_{BS1}=3$ a $t_{BS2}=3$ ([25, p. 783]). Pro CAN1 jsou nastaveny přerušování příjmu a vysílání datových rámců. Při příjmu jsou rámce zpracovány, dle významu zprávy. Přerušování pro odesílání datových rámců je využíváno pro „nečekající“ nastavování datových rámců, při uvolnění výstupní vyrovnávací paměti. Dále jsou nastaveny přerušování při chybových stavech tj. chybě odesílání rámců, nepřijetí potvrzení, chyba na sběrnici, či při převzetí arbitrace

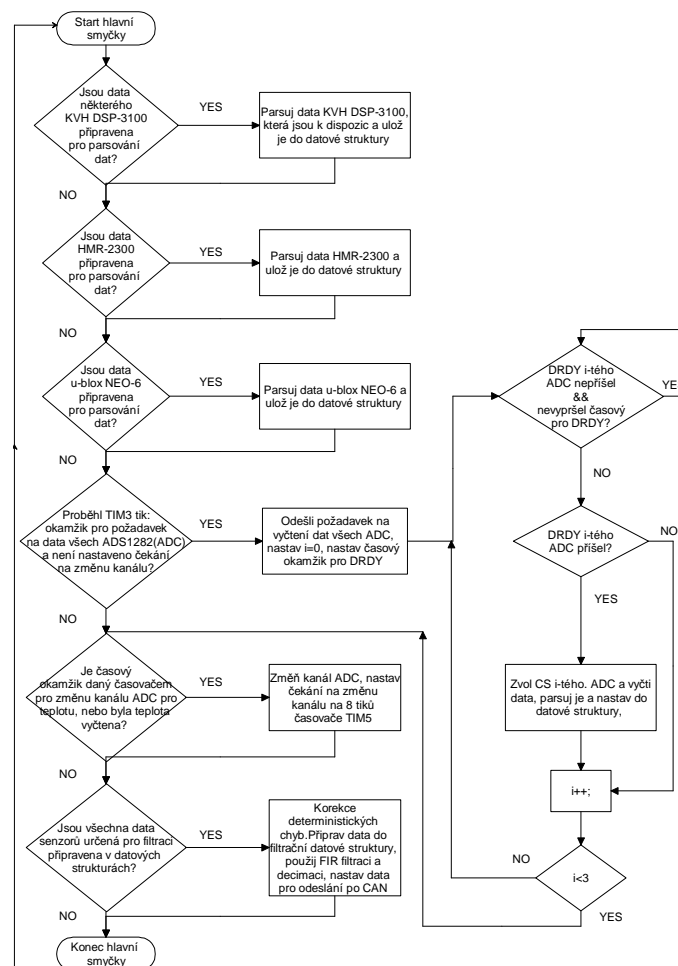
³ Hodnota 0 V vůči digitální zemi celého systému

⁴ Hodnota 3,3 V vůči digitální zemi celého systému

sběrnice jinou jednotkou. Tyto chyby jsou vyhodnocovány standardem ([28], [25, p. 1075]), jsou indikovány, zaznamenávány SW a vypínají další odesílání CAN rámců. Pokud dojde k nápravě chybového stavu například pozdějším připojením jednotky, která je schopna potvrzení rámce, nebo přijetím informačního rámce, je periferie CAN1 znovu nastavena a schopna odesílat data. Systém indikace chyb CAN řeší například pozdější připojení JN ke sběrnici.

Hlavní smyčka programu JSD

V hlavní smyčce programu je implementováno vyčítání dat akcelerometrů, parsování dat do datových struktur, úprava deterministických chyb měření, digitální filtrace a spouštění odesílání dat po CAN. Vývojový diagram je vidět na Obr. 33. Hlavní smyčka probíhá po celou dobu běhu programu v jejím průběhu jsou kontrolovány příznaky pro provedení podprogramů, příznaky se nastavují v přerušeních periférií μ C.



Obr. 33: vývojový diagram hlavní smyčky JSD

- Pokud je přijato všech 5 bytů dat některého z gyroskopů, v přerušení příslušného UART je nastaven příznak, že lze data parsovat a nastavit do datové struktury k dalšímu zpracování, to je následně provedeno v hlavní smyčce. Parsování probíhá následujícím způsobem:

1. Spočítá se a kontrolní součet (checksum) [36]: $checksum = 0xFF - \sum_{i=0}^4 databytes[i]$. Pokud je shodný s přijatým kontrolním součtem ($databytes[4]$) je možné data interpretovat následujícím způsobem:

```
int GYRO_int_Data;
unsigned char databytes[5]
GYRO_int_Data = databytes[0]<<16;
GYRO_int_Data |= databytes[1]<<8;
GYRO_int_Data |= databytes[2];
```

2. Pokud je 24. bit $GYRO_int_Data$ proměnné ,0' je možné hodnotu vynásobit scale faktorem [36] a získat hodnotu v [$^{\circ}/s$].
3. Pokud je 24. bit $GYRO_int_Data$ proměnné ,1' je výsledná hodnota záporná ve formátu 24bitového dvojkového doplňku. Je nutné provést přepočítání a až poté hodnotu vynásobit scale faktorem a získat hodnotu v [$^{\circ}/s$].

```
GYRO_int_Data = (int)(GYRO_int_Data-0x1000000);
```

- Pokud je v přerušení příjmu UART získáno všech 6 bytů dat HMR-2300, je nastaven příznak pro parsování dat, které je provedeno v hlavní smyčce. Dále lze data MAG_x , MAG_y , MAG_z (měření magnetometru v osách x, y, z v body frame) přepočítat scale faktorem na hodnoty v mGauss.

```
Short MAG_x, MAG_y, MAG_z;
MAG_x = (short)((MAG_Data_array[0] << 8) + MAG_Data_array[1]);
MAG_y = (short)((MAG_Data_array[2] << 8) + MAG_Data_array[3]);
MAG_z = (short)((MAG_Data_array[4] << 8) + MAG_Data_array[5]);
```

- V přerušení UART pro GPS modul jsou periodicky přijímány textové zprávy NMEA. Pokud přijde celá jedna zpráva, je nastaven příznak a jejich parsování probíhá dle popisu (kapitola 3.2.4).
- Při přerušení časovače TIM3 (perioda 1ms) je nastaven příznak pro vyčtení dat akcelerometrů. Pokud je příznak nastaven dojde v hlavní smyčce k vyčtení všech funkčních ADC:
 1. Všem najednou ADC je zaslán najednou příkaz k vyčtení vzorkovaných dat (RDATA [34, p. 33]). RDATA je synchronizační příkaz, který umožní vyčíst vzorky ADC, ve stejném diskretním čase. Když jsou data jednotlivých převodníků připravena k vyčtení. Každý jednotlivý ADC nataví hodnotu pinu \overline{DRDY} do hodnoty low. Jakmile se tak stane program postupně emituje SPI hodiny pro každý jednotlivý ADC zvlášť, a to postupně, jak přicházejí přerušení od \overline{DRDY} . Při emitaci hodinového tiku SPI každý vybraný ADC odpovídá postupně svými datovými byty dat. Pro každý kanál každého převodníku jsou v přerušení SPI1 přijaty 4 byty dat. K výběru ADC používá program piny \overline{CS} .
 2. Každou jednu sekundu se přepne kanál všech ADC na kanál 2, aby bylo možné vyčíst kanál teploty. Po změně kanálu je třeba počkat 64 cyklů DRS (8 ms – dle TIM5) [34, p. 36]. Vyčtení teploty probíhá stejně jako v bodě 1. Po vyčtení teploty se kanál znovu nastaví na kanál 1.

3. Kroky přepínání kanálu se opakují v průběhu celého běhu programu. Pokud některý z převodníků dostatečně dlouhou dobu (min 32 ms) nereaguje na příkazy, jsou všechny převodníky i periferie znovu nastaveny dle kroku 1 až 4.
4. Interpretace dat, přijatých po SPI, probíhá dle následujícího kódu. Hodnotu proměnné ADS1282_32bit_value je možné přepočíst na výsledná data pomocí HSCA.

```
int ADS1282_32bit_value;
unsigned char ADS1282_data_bytes[4];
((unsigned char *)& ADS1282_32bit_value)[0]= ADS1282_data_bytes[0];
((unsigned char *)& ADS1282_32bit_value)[1]= ADS1282_data_bytes [1];
((unsigned char *)& ADS1282_32bit_value)[2]= ADS1282_data_bytes [2];
((unsigned char *)& ADS1282_32bit_value)[3]= ADS1282_data_bytes [3];
```

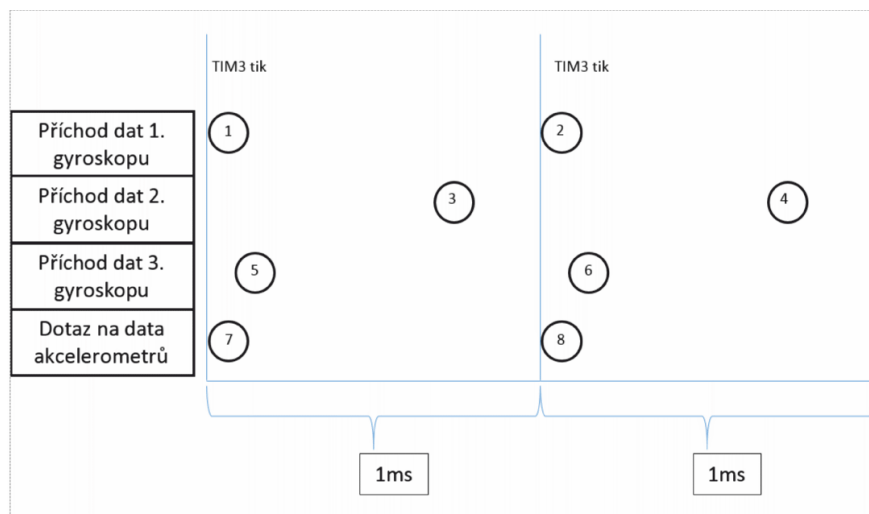
- Při přerušení TIM3 (perioda 1ms) je nastaven flag pro provedení korekce deterministických chyb, filtraci a nastavení dat do výstupní datové struktury pro CAN:
 1. Nejprve jsou data zrychlení ve voltech upravena z hlediska teplotních závislostí (kapitoly 2.2.2 a 3.3.1). Dále jsou teplotně korigovaná data zrychlení převedena hrubým scale factorem na hodnotu v g (kapitola 3.2.1) na těchto datech je provedena korekce dle SEM akcelerometrů (kapitola 0). Takto upravená data jsou připravena do pole dat zrychlení pro filtraci FIR.
 2. Data gyroskopů jsou upravena dle SEM gyroskopů (kapitoly 2.2.2 a 3.3.10) a jsou nastavena do pole pro filtraci dat.
 3. Data akcelerometrů a gyroskopů jsou filtrována FIR a decimována faktorem 10 (kapitola 2.2.1). Filtrovaná data jsou nastavena pro odesílání po CAN.
- Data jsou po sběrnici CAN odesílána každých 10 ms (100 Hz). V přerušení CAN při prázdném výstupním bufferu je nastavena zpráva, která ještě nebyla odeslána a je připravena k odeslání. Popis CAN komunikace je popsán v kapitole (3.4.3).

3.4.2 Synchronizace akcelerometrů a gyroskopů

V rámci sběru dat inerciálních senzorů je nutné řešit jejich synchronizaci. Musí být zaručeno, že měřená, filtrovaná a odesílaná data gyroskopů a akcelerometrů jsou získána ve stejnou periodu měření. Synchronizace dat gyroskopů mezi sebou není možná, výrobce udává, že výstupní frekvence dat je 1 kHz, to bylo experimentálně ověřeno pomocí časovače. Dále je popsáno, že start výstupu proběhne do 5 ms [36] od zapnutí napájení. Není možné s jistotou říci, že gyroskopy budou vysílat data ve stejný okamžik. Je ale možné tvrdit, že každá nová data jsou poskytována v rámci jedné periody měření tj. 1

ms. Obr. 34 ukazuje možnou posloupnost příchodu dat gyroskopů a akcelerometrů. Data prvního gyroskopu přicházejí v časovém okamžiku⁵ 1 a 2, druhého gyroskopu 3 a 4, třetího gyroskopu 5 a 6, vždy po 1 ms od předchozího vzorku. V rámci každé 1 ms tedy přijdou všechna data všech gyroskopů.

Synchronizační událost popsaná výše, může být naznačena na Obr. 34 jako časový okamžik 1. Tím začíná celý cyklus měření inerciálních dat. Start synchronizačního časovače TIM3 probíhá ihned při synchronizační události, tím je časovač synchronizován na příchod dat 1. gyroskopu. Při tiku TIM3 je vyslán požádavek o vzorkování dat ADC pro akcelerometry. To znamená, že data 1. gyroskopu jsou synchronizována se všemi akcelerometry. Data ostatních gyroskopů přijdou do 1 ms od dat 1. gyroskopu.



Obr. 34: princip synchronizace sběru dat inerciálních senzorů

3.4.3 Výstupní komunikační protokol jednotky sběru dat

Měřená a matematicky upravená data jednotky sběru dat jsou periodicky každých 10 ms odesílána pomocí CAN sběrnice do jednotky navigace. CAN je nastaven na bitovou rychlost 1 Mbit/s. Pro komunikaci obou jednotek jsou použité CAN zprávy vždy se standardním CAN ID a s 8 datovými byty. CAN periferie μ C obstarává komunikaci na sběrnici a automaticky vyhodnocuje správnost přijatých dat na základě CRC, které je popsáno v [28]. Tab. 10 popisuje obsah jednotlivých CAN zpráv.

⁵ Časové okamžiky nejsou v měřítku časové jednotky, jen naznačují start dané události.

Číslo bytu	1	2	3	4	5	6	7	8
ID zprávy								
331 (0x14B)	Akcelerace v ose X [g]				Akcelerace v ose Y [g]			
332 (0x14C)	Akcelerace v ose Z [g]				Úhlová rychlost v ose X [°/s]			
333 (0x14D)	Úhlová rychlost v ose Y [°/s]				Úhlová rychlost v ose Z [°/s]			
334 (0x14E)	0	TYPE [-]	0	0	get_data(TYPE) [TYPE_jednotka]			
335 (0x14F)	Čas běhu jednotky [ms]							
336 (0x150)	Magnetická indukce ose x [mGauss]				Magnetická indukce ose y [mGauss]			
337 (0x151)	Magnetická indukce ose z [mGauss]				Magnetická indukce ose z [mGauss]			

Tab. 10 :identifikátory CAN rámců jednotky JSD a jejich význam

Akcelerace, úhlové rychlosti a magnetické indukce jsou datového typu *float*, datová reprezentace má 4 byty. Čas běhu jednotky je datového typu *uint64_t*, který má velikost 8 bytů.

Zpráva s ID 334 je využívána pro zasílání dat, které jsou odesílány s nižší frekvencí než je 100Hz. V této zprávě se posílají data GPS (frekvence 5 Hz) a teploty akcelerometrů (frekvence 1Hz), jen pokud jsou k dispozici, tím se snižuje vytížení sběrnice CAN. TYPE je identifikátor významu bytů 5 až 8. funkce *get_data(TYPE)* vrací na základě označení TYPE hodnotu: GPS data, nebo data teploty akcelerometrů.

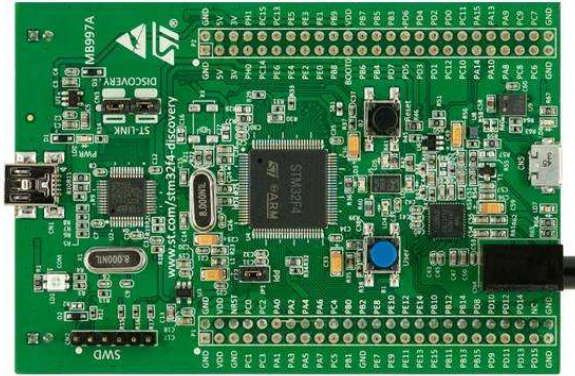
2. Byte zprávy s ID 334 (TYPE)	Význam 5. až 8. bytu (<i>get_data(TYPE)</i>)
121	Teplota akcelerometru v ose X [°C]
122	Teplota akcelerometru v ose Y [°C]
123	Teplota akcelerometru v ose Z [°C]
1	GPS čas [hhmm.ss ⁶]
2	GPS latitude[°]
4	GPS longitude [°]
8	GPS altitude [m]
16	GPS speed [m/s]

Tab. 11: identifikátor datových obsahu zprávy ID 334

3.5 Popis funkce výpočetní jednotky – jednotky navigace

Tato kapitola se zabývá popisem programu a funkce jednotky navigace. Účelem jednotky navigace je úprava získaných dat senzorů pro navigační úlohu a výpočet navigační úlohy. Jednotka poskytuje výstupní navigační a inerciální data po sběrnici RS-232, či po virtuální sériové lince (Virtual COM Port – VCP) prostřednictvím USB (Universal Serial Bus), jejíž knihovna pro STM32F4 je k dispozici z [44]. Jako jednotka sběru dat je využit μC , který je součástí vývojového kitu STM32F4-discovery kit na Obr. 35 [45].

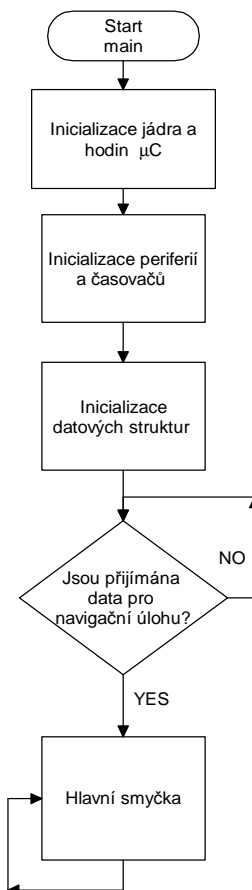
⁶ Hh – hodina, mm – minuta, ss - sekunda



Obr. 35: STM32F4-Discovery [45]

Ověřený algoritmus navigační úlohy EKF z kapitoly 2.1.3 byl implementován v prostředí Matlab v rámci vývoje a výzkumu laboratoře Leteckých Informačních Systémů. Tento algoritmus byl v rámci této práce uzpůsoben pro jazyk C a implementován pro μC .

3.5.1 Popis programu jednotky navigace



Obr. 36: vývojový diagram main pro JN

Po zapnutí napájení jednotky navigace se načte hlavní program (main) μC , který je zde popsán. Hlavní struktura programu je vidět na Obr. 36. Na začátku programu jsou nastaveny základní parametry jádra procesoru, zapnutí FPU koprocesorů a je nastaven hodinový takt a rozvod hodin pro periferie μC za pomoci PLL. Taktéž je nastaven takt hlavního systémového časovače (SysTick, [43]) na 100 Hz. Tik SysTick určuje takt výpočtů, synchronizace přijatých a odesílaných dat a určuje frekvenci odesílání výstupů jednotky.

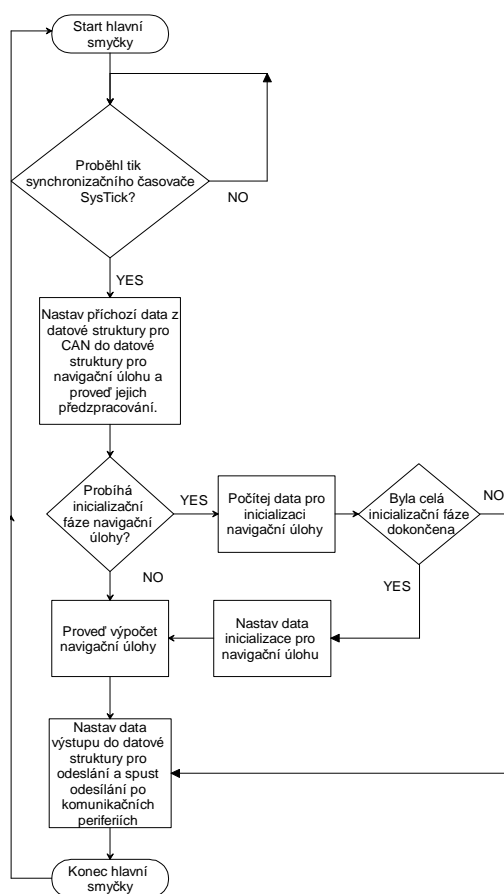
V rámci inicializace periferií jsou nastaveny komunikační periferie μC . Pro příjem dat senzorů je nastaven CAN1 a pro odesílání dat jsou nastaveny periferie USB jako VCP a také USART1. V rámci celého běhu programu jsou prostřednictvím výstupních komunikačních periferií odesílány informační zprávy (popis níže kapitola 3.5.2). Jednotka tak informuje o svém stavu, či o událostech, které jsou detekovány.

CAN1 je nastaven na komunikační rychlost 1 Mbit/s pro piny ([26]) PD0 (pin příjmu dat) a PD1 (pin vysílání dat). Rychlost CAN1 a přerušování jsou nastaveny stejně jako v případě jednotky sběru dat (kapitola 3.4.1). V přerušování příjmu CAN1 jsou získávány data senzorů z JSD dle komunikačního protokolu CAN (kapitola 3.4.3). Na základě CAN ID je určeno o jaká data se jedná, ty jsou poté uloženy do datové struktury pro příjem CAN dat.

USART1 je nastaven jako asynchronní pro piny μC PA9 a PA10 ([26]). USART1 je nastaven na rychlost 115 200 baud/s a délku rámce 8 bitů, 1 stop bit, bez paritního bitu. Je také nastaveno přerušení pro příjem a přerušení volného výstupního bufferu (vyrovnávací paměti) pro vysílání dat. V přerušení pro vysílání jsou nastavovány byty dle komunikačního protokolu popsaného níže v (kapitola 3.5.2).

USB virtuální sériový port (VCP) je nastaven tak, aby emuloval sériovou komunikaci po RS-232 o rychlosti 115 200 baud/s a délku rámce 8 bitů, 1 stop bit, bez paritního bitu. Veškeré nastavení USB periferie a virtuálního sériového portu je provedeno v rámci knihovny, v práci je využíváno jen rozhraní pro nastavení USB, odesílání a přijímání dat. Pomocí tohoto komunikačního rozhraní jednotka odesílá zprávy dle kapitoly 3.5.2.

V rámci inicializace datových struktur jsou nastaveny velikosti vyrovnávacích pamětí a defaultní hodnoty jejich obsahu. Také jsou spočítány konstanty pro navigační úlohy. Následně je jednotka uvedena do stavu aktivního čekání a případný nadřazený systém (např. VLINS) je o tom informován textovou zprávou z kapitoly 3.5.2. Tento stav je přerušen teprve, když je zahájen příjem dat ze senzorů po CAN, tím jsou jednotky synchronizované a v každém 100 Hz cyklu přijdou všechna data senzorů. Následuje hlavní smyčka programu a je odeslána informační zpráva o typu připojeného systému, která určuje pořadí, datový typ a jednotku dat (kapitola 3.5.2).



Obr. 37: hlavní smyčka programu JN

V hlavní smyčce, jejíž struktura je patrná na Obr. 37 je nejprve očekáván synchronizační tik časovače SysTick na 100 Hz. V rámci celého programu jsou v přerušení kontrolovány komunikační sběrnice. Při příchodu požadavku je odeslána příslušná odpověď.

Po tiky SysTick se nastaví příchozí data senzorů z datové struktury pro CAN do datové struktury pro navigační úlohu. Data senzorů jsou předzpracována pro navigační úlohu, to znamená matematické zarovnání do navigační soustavy (kapitola 2.1.2). Inicializační fáze navigační úlohy je nastavena na 60 sekund. Tato doba je určena pro počítání počátečních biasů dat senzorů, testování dostupnosti dat GPS, výpočet počáteční pozice a polohy. Po dokončení inicializační fáze navigačního algoritmu jsou počáteční data nastavena jako iniciální stav navigační úlohy.

Dále probíhá cyklus výpočtu navigační úlohy dle kapitoly 2.1.3. Na konci výpočtu navigační úlohy se data pozice

z navigační soustavy přepočítají do zeměpisných souřadnic LLA. Následně se výstupní data navigačního algoritmu a data senzorů nastaví pro odeslání po výstupních komunikačních perifériích a odesílání je spuštěno.

Výstupními daty JN jsou: čas běhu jednotky [ms], 3 osy zrychlení [g], 3 osy úhlových rychlostí [°/s], 3 osy magnetické indukce [mGauss], pozice LLA [°, °, m], tři osy rychlostí [m/s], 3 polohové úhly (θ – roll, φ – pitch, ψ – yaw) [°]. Pozice rychlosti a polohové úhly jsou výstupem navigační úlohy. Komunikační protokol odesílání informačních a datových zpráv je popsán níže.

3.5.2 Výstupní datový formát jednotky navigace

V rámci řešení TG-INS byl navržen a implementován komunikační protokol po RS-232. V této kapitole je popsán formát výstupních dat, informačních a datových zpráv. Textové zprávy TG-INS i VLINS začínají vždy znaky „\$\$“. Datové zprávy začínají znaky „##“. Následuje počet bytů zprávy. Dále pokračuje identifikátor v případě textové zprávy. Nastavovací a dotazovací zprávy od nadřazeného systému (PC, VLINS) mají vždy lichý tříčíslicový identifikátor. Naproti tomu informační textové zprávy TG-INS mají sudé identifikátory. Jako oddělovač informací ve zprávě je použit znak „;“. X je (textově) počet bytů obsahu zprávy, počítáno od prvního bytu po „X;“ až po znak „;“ před ch.

Formát textové zprávy:

```
$$;X;id;text_zpravy;dalsi_informace_konkretni_zpravy;ch;\r\n
```

Formát datová zpráva:

```
##;X;jednotlive_byty_zpravy;ch;\r\n
```

Následuje obsah zprávy označen tučně s podtržením. Všechny zprávy mají před zakončením řádku „\r\n“ odeslán ještě kontrolní součet *ch* (checksum). Je to jeden byte. Výpočet *ch* je prováděn na datech zpráv – obsahu zprávy před kontrolním součtem *ch*, po úvodních znacích a po sekci velikosti (tučná, podtržená sekce) Počet znaků obsahu zprávy je označen jako $|zpráva|$. Označení $zpráva(i)$ udává *i*-tý znak obsahu dané zprávy. Dále $hodnotaASCII(zpráva(i))$ označuje číselnou hodnotu znaku z ASCII tabulky. Kontrolní součet je počítán dle (28).

$$ch = modulo \left(\sum_{i=1}^{|zpráva|} hodnotaASCII(zpráva(i)), 256 \right) \quad (28)$$

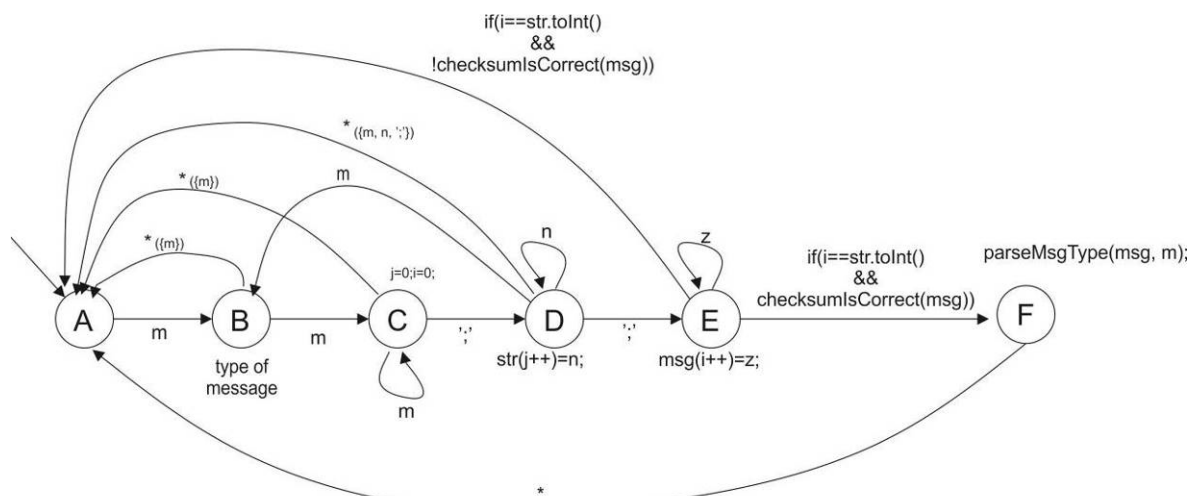
V případě, že u některé zprávy odesílané na požadavek není odpověď přijata, nebo není správně checksum, je požadavek odeslán znovu.

Na straně μC i na straně VLINS je implementován rozšířený stavový automat zobrazený na Obr. 38. Automat přijímá a kontroluje v rámci svých stavů jazyk přijímaných zpráv nad abecedou *ALPHA* o 256 hodnotách, z nichž některé jsou tisknutelné znaky ASCII [42]. Stav A je startovací stav. Hrany jsou

označeny znakem, nebo funkcí, která umožní přechod do dalšího stavu, jedná se o přechodovou funkci (29)

$$NewState = \delta(OldState, q, f); q \in ALPHA \quad (29)$$

Z aktuálního stavu (*OldState*) se automat dostane do nového stavu (*NewState*) pokud, je aktuálně čten některý znak z množiny *q*, nebo je splněna podmínka hrany *f*. Označením 'x' je myšlen, jeden konkrétní znak x abecedy *ALPHA*. Označení *, ' a ,z' představují jakýkoliv znak abecedy *ALPHA*. Notace $W_{(R)}$ označuje přechod na znak, či množinu znaků *W*, kromě znaků z množiny *R*. Notace $m' \in \{\$, \#\} \subset ALPHA$ označuje, zda je zpráva informační – textová ($m = \$$), nebo datová ($m = \#$). Notace $n \in \{0, 1, \dots, 9\} \subset ALPHA$, označuje jen znaky číslic z ASCII [42]. Označení *str* a *msg* jsou textové řetězce nad abecedou *ALPHA*, a notace *str(j)* a *msg(i)* označují znaky abecedy v textovém řetězci na pozici *i* a *j*. V grafu jsou zapsány i některé funkce, jsou to zjednodušené zápisy složitějších funkcí. Funkce *str.toInt()* převádí textový řetězec čísel na přirozené kladné číslo. Funkce *checksumIsCorrect(msg, m)* vrací booleovú hodnotu „true“, pokud je přijatý checksum rovný checksumu, který je spočítán ze zprávy *msg*. Pokud je podmínka přechodu ze stavu E do stavu A vyhodnocena kladně, je vyslán požadavek o opakování zprávy. Funkce *parseMsgType(msg, m)* vyhodnotí údaje přijaté zprávy dle *m* a u informačních – textových zpráv i dle identifikátoru.



Obr. 38: stavový automat přijímající jazyk zpráv jednotky navigace

Informační zpráva a dotaz na typ jednotky a formát dat

Po zapnutí jednotky jsou po UART a VCP vyslány textové informace, které umožňují dekódovat typ jednotky a formát výstupních dat. Informační zpráva je také odeslána na základě požadavku:

```
$$;25;001;GET info about UNIT!;hodnota_byte(111);\r\n
```

Kde „\$\$;“ je počátek textové zprávy, 25 je počet bytů obsahu zprávy, „001“ je identifikátor zprávy, „GET info about UNIT!“ je textová informace, číslo 111 je checksum (hodnota bytu od 0 do 255) a „\r\n“ je zakončení řádku zprávy.

Sekce zprávy v odpovědi na požadavek jsou rozděleny jen pro přehlednost v Tab. 12. Při odesílání jsou jednotlivé sekce posílány v pořadí 0 až 44 za sebou bez jakéhokoliv dalšího znaku.

Číslo sekce zprávy	Textová data sekce	Číslo sekce zprávy	Textová data sekce
0	\$\$;257;	-	-
1	002;	-	-
2	TG-INS_v1.00;	-	-
3	19;	-	-
4	4;	24	time[ms];
5	5;	25	ACCx[g];
6	5;	26	ACCy[g];
7	5;	27	ACCz[g];
8	5;	28	GYRx[deg/s];
9	5;	29	GYRy[deg/s];
10	5;	30	GYRz[deg/s];
11	5;	31	MAGx[mGauss];
12	5;	32	MAGy[mGauss];
13	5;	33	MAGz[mGauss];
14	5;	34	LAT[deg];
15	5;	35	LON[deg];
16	5;	36	ALT[m];
17	5;	37	SPEEDx[m/s];
18	5;	38	SPEEDy[m/s];
19	5;	39	SPEEDz[m/s];
20	5;	40	ROLL[deg];
22	5;	41	PITCH[deg];
23	5;	42	YAW[deg];
-	-	43	hodnota_byte(21);
-	-	44	\r\n

Tab. 12: sekce informační zprávy o typu jednotky

Kde „\$\$;“ je počátek textové zprávy, „257“ je počet bytů obsahu zprávy, „002“ identifikátor zprávy, „TG-INS v1.00“ je textová informace o typu jednotky. Dále zpráva pokračuje informací o počtu dat v každé datové zprávě „19“. Následně je odesláno 19 hodnot oddělených „;“, které určují identifikátor datového typu (IDT – Tab. 13). Následuje 19 textových názvů měřené, či počítané veličiny spolu s jednotkami daných veličin. Sekcí 42 končí samotný obsah textové zprávy, následuje kontrolní součet (jeden byte), který je počítán na sekcích 1 až 42.

Identifikátor datového typu	Datový typ	Velikost [byte]
1/6	Unsigned char / signed char	1
2/7	Unsigned short / signed short	2
3/8	Unsigned int / signed int	4
4/9	Unsigned long long / signed long long	8
5	Float (single precision)	4

Tab. 13: tabulka identifikátorů datového typu pro výstupní formát JN

Stavová informační zpráva

Stavová zpráva oznamuje nadřazenému systému stav jednotky TG-INS. Má strukturu textové zprávy. Identifikátor zprávy je zvolen jako „004“. V následující tabulce jsou ukázky obsahu zpráv tohoto typu a jejich význam.

Textová zpráva	Událost pro odeslání
„Waiting for data of sensors“	Před startem hlavní smyčky, při čekání na první data z JSD
„Start init 60 second“	Při startu hlavní smyčky – inicializační fáze navigačního alg.
„EKF start“	Při startu navigační úlohy typu EKF
„CF start“	Při startu navigační úlohy typu CF
„Sensor data lost – reset unit“	Při ztrátě komunikace s JSD

Tab. 14: stavové informační zprávy

Dotazovací textová zpráva pro získání stavové informační zprávy má formát informační textové zprávy s identifikátorem ID 003. Její textová část obsahuje: „GET status“.

Binární formát datových zpráv

Tento formát minimalizuje počet odesílaných bytů a zároveň zachovává přesnost daného datového typu. Obsah zprávy jsou za sebou seřazené byty, bitové reprezentace navigačních a inerciálních dat. Pořadí dat je dáno pořadím v informační zprávě. Počet bytů datové reprezentace dat je dáno datovým typem v informační zprávě dle Tab. 13. Například odesílání time[ms] bude začínat na pozici 0-tého bytu obsahu datové zprávy a počet bytů bude 8, což je velikost datového typu s identifikátorem 4. Obsah zprávy vyznačen tučně s podtržením má velikost $X=85$, je to součet počtu bytů všech dat k odeslání plus 1 byte ukončovacího znaku ‘;’.

```
##;X;X bytů dat;ch;\r\n
```

Získání bitové reprezentace jednotlivých datových typů lze provést pro float dle následujícího kódu:

```
const uint8_t size_float = sizeof(float);
uint8_t i;
uint8_t byte_representation_float[size_float];
float a=10.5f;
for(i = 0; i < size_float; ++i){
    byte_representation_float[i]=((uint8_t *)&a)[i];
}
```

3.6 Vizualizační a logovací program VLINS

Program VLINS je vizualizační a logovací software pro INS. Byl navržen a implementován v jazyce C# pro operační systém Windows 7 a novější. Zpracovává data dle komunikačního formátu z kapitoly 3.5.2, které jsou získávány po sériové lince. Data interpretuje dle významu, zobrazuje je jako číselné hodnoty a vizualizuje polohu a pozici TG-INS, či jiné INS, která využívá navržený datový formát. Data jsou ukládány do souboru Matlab pro další zpracování a analýzu. Uložená data je možné znovu vizualizovat pomocí funkce „replay“ jako simulaci v reálném čase. Dále umožňuje parsovat data z textových záznamů sériové linky, pokud splňují výše uvedený datový formát. Parsování textových dat je užitečné pokud jsou data zaznamenávány např. na SD kartu.

VLINS se skládá ze tří hlavních oken. První je okno „Controll Window“ na Obr. 39, které poskytuje funkce připojení a čtení komunikačního portu COM (reprezentující sériovou linku). Dále umožňuje vybrat soubor pro vizualizaci nalogovaných dat a také parsování záznamu komunikace po sériové lince. Toto okno slouží také pro zobrazení informačních zpráv, stavu systému a přichozích navigačních a inerciálních dat v reálném čase.



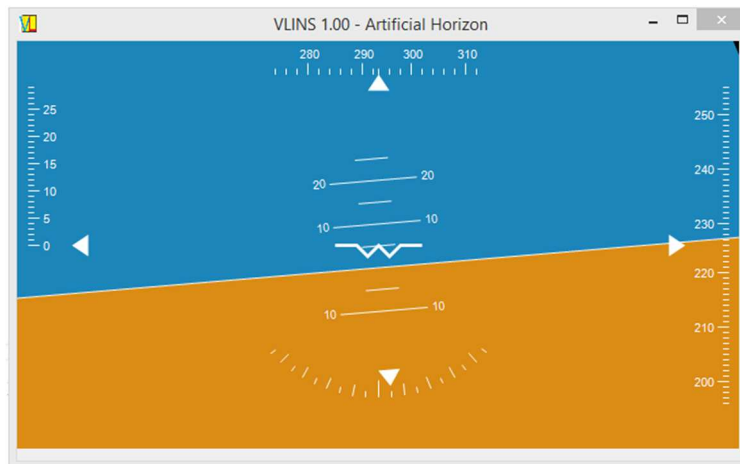
Obr. 39: „Controll Window“ programu VLINS

Dalším oknem je okno „Google Earth position visualization window“ na Obr. 40, které pomocí Google Earth API (Application Programming Interface) [46] zobrazuje aktuální pozici INS dle zeměpisných souřadnic v reálném čase.



Obr. 40: „Google Earth position visualization window“ VLINS

Dalším oknem VLINS je okno „Artificial Horizon“ na Obr. 41, které na základě třech polohových úhlů a nadmořské výšky vizualizuje polohu INS v reálném čase. Toto okno využívá knihovnu vytvořenou Janem Papajem v rámci jeho bakalářské práce [15].



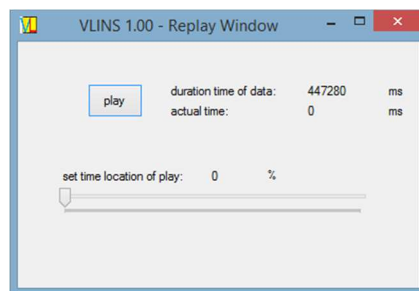
Obr. 41: „Orientation visualization window“ VLINS

Popis funkce real-time vizualizace a logování dat: Po zapnutí VLINS a připojení INS je možné kliknutím na tlačítko „Refresh COM“ načíst dostupné COM porty. Dále pomocí „Choose COM“ vybrat požadovaný COM a tlačítkem „Connect to COM“ se připojit k jednotce. Tím se odešle dotaz na typ jednotky. VLINS nastaví parametry pro záznam a vizualizaci dat. Text tlačítka „Connect to COM“ se změní na „Disconnect“. Po skončení měření je možné kliknout na „Disconnect“ a tím uložit data do formátu Matlab. Vzniklý soubor je pojmenován dle následujícího formátu:

```
log_YYYY-mm-dd_hhmmss.mat
```

, kde „YYYY“ je rok, „mm“ je měsíc, „dd“ je den, „hh“ je hodina, „mm“ je minuta a „ss“ je sekunda aktuálního času, kdy byl zahájen záznam dat.

Popis funkce přehrávání „Replay data“: Po kliknutí na tlačítko „Replay data“ se zobrazí dialogové okno pro výběr souboru Matlab se záznamem dat. Při úspěšném výběru souboru se zobrazí okno „Replay Window“ na Obr. 42, ve kterém je možné spuštění záznamu datového souboru tak, jako by záznam právě probíhal a také umožňuje přepnutí na jiný časový okamžik v záznamu dat. Je to v podstatě funkce simulace na základě vstupních dat. Tato funkce je přidána zejména pro prezentaci funkce programu.



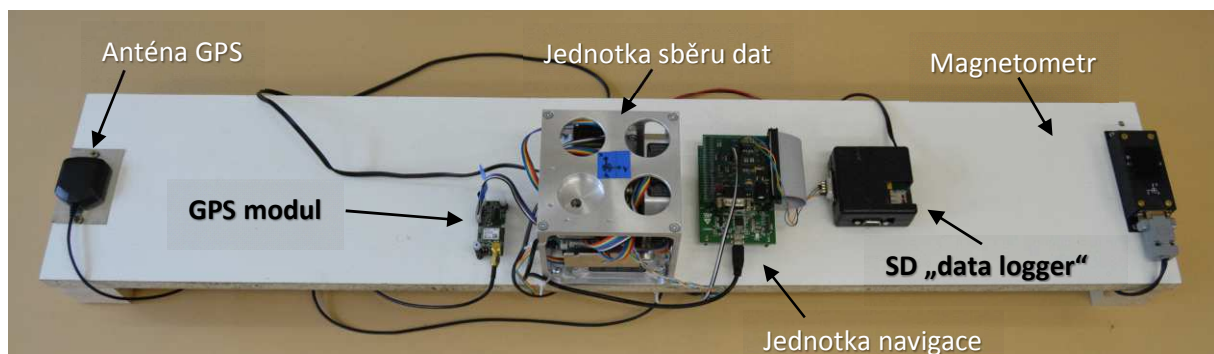
Obr. 42: „Replay Window“ VLINS

Popis funkce přehrávání „Parse data“: Po kliknutí na tlačítko „Parse data“ se zobrazí dialogové okno pro výběr souboru se záznamem dat sériové linky. Soubor je čten jako binární a je parsován programem a uložen do souboru Matlab ve stejném formátu jako při real-time vizualizace a logování dat. Tato funkce slouží pro získávání dat ze záznamu sériové linky při komunikaci s INS.

VLINS požaduje .NET 4 a Google Earth 7.1 a vyšší verze těchto programů. Pro vývoj VLINS bylo použito vývojové prostředí MS Visual Studio 2012.

3.7 Měření s navigačním systémem

Navigační systém je pro testování umístěn na platformu, která je vidět na Obr. 43. Pro experimenty mimo laboratoř, je přidán navíc systém pro záznam dat na SD kartu, který zaznamenává data JSD po CAN i data JN po RS-232. Napájení systému je stanoveno na 16 V pro JSD, která dále napájí JN a GPS modul. Pro napájení magnetometru a systému pro záznam dat je stanoveno 12 V napájení.



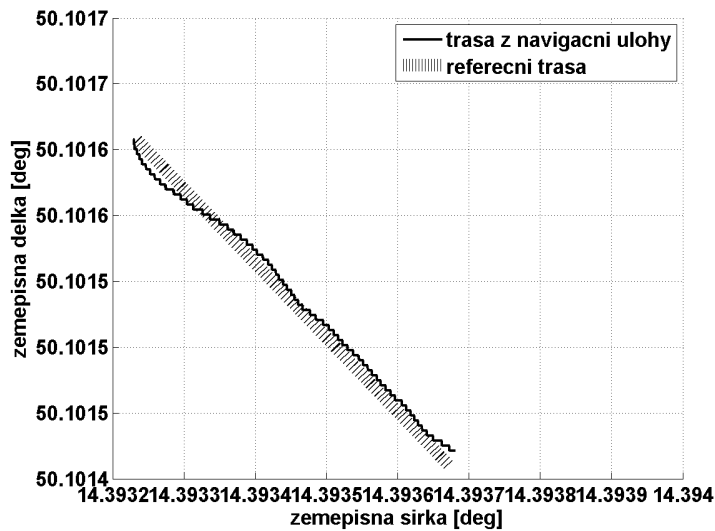
Obr. 43: platforma pro navigační systém

V rámci testování navigační SW jednotky TG-INS bylo provedeno několik experimentů. Testovala se funkčnost odhadu pozice a kurzu vůči referenční trase z mapy. Na Obr. 44 je vyznačena trasa dle skutečných dat v průběhu jednoho z experimentů. Tmavá trasa je dána hodnotami zeměpisných souřadnic z GPS a světlá je výstupem navigačního algoritmu TG-INS.



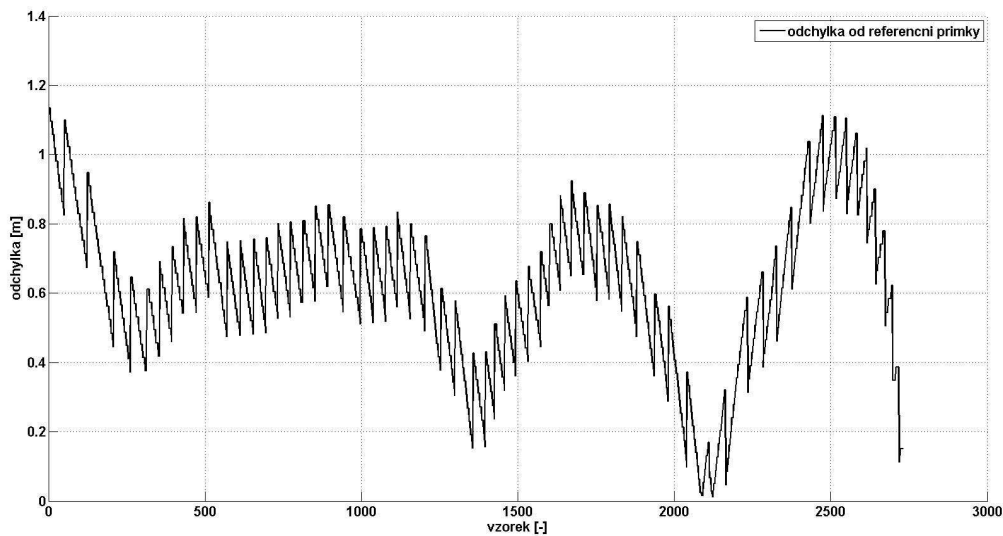
Obr. 44: ukázka trasy experimentu

Na Obr. 45 je vidět referenční trasa, která je spočítána z mapy a trasa dle výstupu navigační úlohy TG-INS na zkoumaném úseku z Obr. 44.



Obr. 45: referenční trasa a trasa dle navigační úlohy

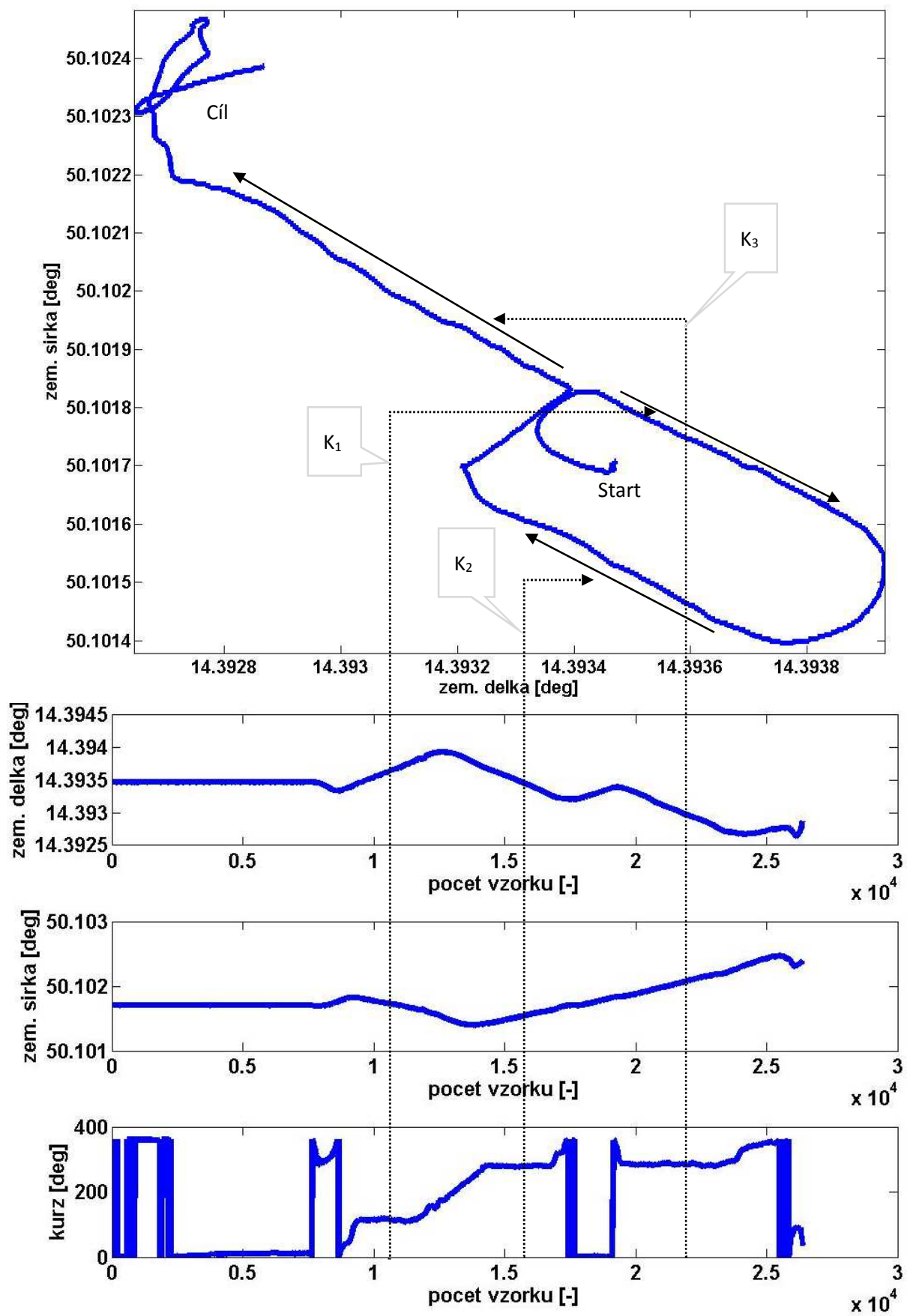
Pro analýzu přesnosti byly na zkoumaném úseku spočítány odchylky dat od referenční trasy. Odchylky byly počítané jako vzdálenosti měřených dat od přímky dané referenční trasou ve stupních zeměpisných souřadnic a následně přepočítané na metry. Na Obr. 46 jsou tyto odchylky zobrazeny a jsou menší než 1,2 m.



Obr. 46: odchylka pozice navigační úlohy od reference

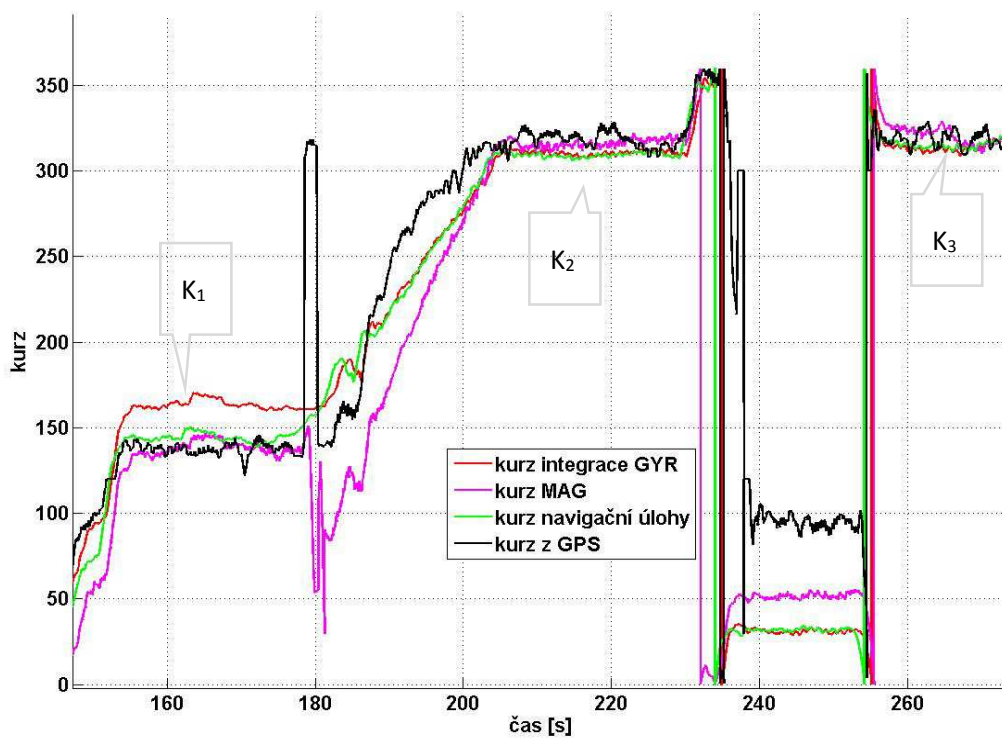
Na Obr. 47 je znovu zobrazena celá trasa experimentu, zem. délka, zem. šířka a kurz (0° ; 360°). K jednotlivým úsekům trasy byl vztažen kurz (K_1, K_2, K_3) z výstupu navigační úlohy. Pro porovnání s referenčním kurzem z mapy:

- Kurz $K_1 = 130,6586^\circ$, referenční kurz z mapy byl určen na $K_{1ref} = 130,5^\circ$
- Kurz $K_2 = 309,1133^\circ$, referenční kurz z mapy byl určen na $K_{2ref} = 309,7^\circ$
- Kurz $K_3 = 314,7938^\circ$, referenční kurz z mapy byl určen na $K_{3ref} = 313,7^\circ$



Obr. 47: ukázka kurzu vůči trase experimentu

Na Obr. 48 je vizualizován kurz z navigační úlohy, dále dle výpočtu z magnetometru, dle integrace gyroskopů a dle výpočtu pomocí GPS.



Obr. 48: porovnání kurzů různých zdrojů

4 Závěr

Cílem této diplomové práce byl návrh, vývoj a implementace SW pro inerciální navigační systém (INS), který využívá inerciální senzory kategorie „Tactical grade“, magnetometr a GPS přijímač. Pro měřicí jednotku sběru dat byl navržen a implementován princip sběru a digitálního zpracování dat a jejich synchronizace. Byla provedena teplotní kalibrace akcelerometrů a kalibrace akcelerometrů a gyroskopů z pohledu deterministických chyb. Odhadnuté chybové modely senzorů, byly implementovány do programu měřicí jednotky. Dále byl navržen a implementován komunikační protokol výstupu prostřednictvím sběrnice CAN. Měřicí jednotka je schopna pracovat jak v režimu předzpracování dat pro jednotku výpočetní, tak i v samostatném režimu jako IMU tedy pouze pro měření dat z inerciálních senzorů, magnetometru a GPS. Pro výpočetní jednotku navigace byl implementován algoritmus odhadu pozice, rychlosti a orientace v prostoru. Výpočty byly optimalizovány z důvodů časové efektivity. Dále byl pro výpočetní jednotku navržen a implementován komunikační protokol prostřednictvím RS-232 a USB virtuálního COM portu. Zrealizovaný navigační systém byl testován při venkovních experimentech, kdy byla ověřena funkčnost jeho všech součástí a určena jeho základní přesnost. Dále byl navržen a implementován program VLINS pro PC, který je schopen jak navigační data vizualizovat a ukládat při přímé komunikaci, tak je zobrazovat i z uloženého záznamu.

Seznam obrázků

OBR. 1: PŘÍKLAD ORIENTACE A POZICE V REFERENČNÍ VZTAŽNÉ SOUSTAVĚ	3
OBR. 2: ČLENĚNÍ INERCIÁLNÍCH JEDNOTEK DLE VÝSTUPŮ [4]	4
OBR. 3: KATEGORIE PŘESNOSTI GYROSKOPŮ	5
OBR. 4: KATEGORIE PŘESNOSTI AKCELEROMETRŮ	5
OBR. 5 UKÁZKA SOUŘADNICOVÝCH SOUSTAV	6
OBR. 6: ISO NORMA URČUJÍCÍ OSY SOUSTAVY VŮČI NAVIGOVANÉMU OBJEKTU [3]	6
OBR. 7: BLOKOVÉ SCHÉMA EKF	7
OBR. 8: BLOKOVÉ SCHÉMA DECIMACE A UKÁZKA ZMĚNY ŠÍŘKY PÁSMÁ	9
OBR. 9: FREKVENČNÍ ODEZVA FILTRU	10
OBR. 10: POLOHY PRO KALIBRAČNÍ MĚŘENÍ [20]	11
OBR. 11: UKÁZKA NEORTOGONALIT OS SENZORŮ	12
OBR. 12: TYPICKÝ PRŮBĚH ALLAN VARIANCE [1]	14
OBR. 13: ROZVOD HODIN μC STM32Fxx	15
OBR. 14: BLOKOVÉ SCHÉMA JEDNOTKY TG-INS	18
OBR. 15: PRINCIP USPOŘÁDÁNÍ SENZORU JEDNOTKY TG-INS	18
OBR. 16: AKCELEROMETR INN-204	19
OBR. 17: ZPŮSOB PŘIPOJENÍ INN-204 K ADC	19
OBR. 18: AVAR ANALÝZA AKCELEROMETRŮ	20
OBR. 19: GYROSKOP KVH DSP-3100	21
OBR. 20: AVAR ANALÝZA GYROSKOPŮ	22
OBR. 21: HMR-2300	22
OBR. 22: DATA ZRYCHLENÍ V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ SENZORU	25
OBR. 23: KŘIVKA ODCHYLEK ZRYCHLENÍ OD REFERENČNÍ HODNOTY V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ	26
OBR. 24: UKÁZKA TEPLOTNÍ KOMPENZACE (KALIBRACE)	26
OBR. 25: KALIBRAČNÍ DATASET AKCELEROMETRŮ	27
OBR. 26: SFÉRA DANÁ KALIBRAČNÍM DATASETEM AKCELEROMETRU	28
OBR. 27: ODCHYLKY VELIKOSTI VEKTORU ZRYCHLENÍ OD REFERENČNÍ HODNOTY	29
OBR. 28: KALIBRAČNÍ DATASET GYROSKOPŮ	30
OBR. 29: SFÉRA DANÁ KALIBRAČNÍM DATASETEM GYROSKOPŮ	31
OBR. 30: ODCHYLKY VELIKOSTI VEKTORU ÚHLOVÝCH RYCHLOSTÍ OD REFERENČNÍ HODNOTY	32
OBR. 31: VÝVOJOVÝ DIAGRAM MAIN PRO JSD	33
OBR. 32: VÝVOJOVÝ DIAGRAM INICIALIZACE SENZORŮ PRO JSD	34
OBR. 33: VÝVOJOVÝ DIAGRAM HLAVNÍ SMYČKY JSD	36
OBR. 34: PRINCIP SYNCHRONIZACE SBĚRU DAT INERCIÁLNÍCH SENZORŮ	39
OBR. 35: STM32F4-DISCOVERY	41
OBR. 36: VÝVOJOVÝ DIAGRAM MAIN PRO JN	41
OBR. 37: HLAVNÍ SMYČKA PROGRAMU JN	42
OBR. 38: STAVOVÝ AUTOMAT PŘIJÍMAJÍCÍ JAZYK ZPRÁV JEDNOTKY NAVIGACE	44
OBR. 39: „CONTROLL WINDOW“ PROGRAMU VLINS	47
OBR. 40: „GOOGLE EARTH POSSITION VISUALIZATION WINDOW“ VLINS	47
OBR. 41: „ORIENTATION VISUALIZATION WINDOW“ VLINS	48
OBR. 42: „REPLAY WINDOW“ VLINS	48
OBR. 43: PLATFORMA PRO NAVIGAČNÍ SYSTÉM	49
OBR. 44: UKÁZKA TRASY EXPERIMENTU	49
OBR. 45: REFERENČNÍ TRASA A TRASA DLE NAVIGAČNÍ ÚLOHY	50
OBR. 46: ODCHYLKA POZICE NAVIGAČNÍ ÚLOHY OD REFERENCE	50
OBR. 47: UKÁZKA KURZU VŮČI TRASE EXPERIMENTU	51
OBR. 48: POROVNÁNÍ KURZŮ RŮZNÝCH ZDROJŮ	52

Seznam tabulek

TAB. 1: KATEGORIE SENZORŮ A JEJICH VLASTNOSTI [5]	5
TAB. 2: PARAMETRY FIR FILTRU	9
TAB. 3: TYPY ŠUMŮ A JEJICH PARAMETRY V ALLAN VARIANCE	14
TAB. 4: UKÁZKA ZRYCHLENÍ NĚKTERÝCH OPTIMALIZOVANÝCH FUNKCÍ V C	17
TAB. 5: SEKVENČNÍ PŘÍKAZY PRO NASTAVENÍ HMR-2300	23
TAB. 6: NASTAVOVACÍ ZPRÁVY U-BLOX MODULU	23
TAB. 7: FUNKCE TEPLTNÍ KOMPENZACE PRO KAŽDÝ AKCELEROMETR	27
TAB. 8: PARAMETRY SEM AKCELEROMERŮ	28
TAB. 9: PARAMETRY SEM GYROSKOPŮ	31
TAB. 10 :IDENTIFIKÁTORY CAN RÁMCŮ JEDNOTKY JSD A JEJICH VÝZNAM	40
TAB. 11: IDENTIFIKÁTOR DATOVÝCH OBSAHU ZPRÁVY ID 334	40
TAB. 12: SEKCE INFORMAČNÍ ZPRÁVY O TYPU JEDNOTKY	45
TAB. 13: TABULKA IDENTIFIKÁTORŮ DATOVÉHO TYPU PRO VÝSTUPNÍ FORMÁT JN	46
TAB. 14:STAVOVÉ INFORMAČNÍ ZPRÁVY	46

Obsah CD

Význam	Cesta
Text diplomové práce	\TEXT
Obrázky	\OBRAZKY
Kódy:	-
Keil μ Vision projekt – jednotka sběru dat	\SW\JEDNOTKA_SBERU_DATA-MERICI_JEDNOTKA_keil
Keil μ Vision projekt – jednotka navigace	\SW\JEDNOTKA_NAVIGACE-VYPOCETNI_JEDNOTKA_keil
Visual studio projekt – vizualizační program	\SW\VLINS-VIZUALIZACNI_A_LOGOVACI_PRO-GRAM_INS_VS

Bibliografie

- [1] IEEE, „IEEE Standard for Inertial Sensor Terminology,“ listopad 2001. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=7672>. [Přístup získán březen 2015].
- [2] J. Čižmár, „SOUČASNOST A BUDOUCNOST INERCIÁLNÍCH MEMS SENZORŮ,“ [Online]. Available: <http://www.roznovskastredni.cz/dwnl/pel2011/06/cizmar.pdf>. [Přístup získán duben 2015].
- [3] P. Gazdík, „Měřicí jednotka navigačního systému pro bezpilotní prostředky,“ 2011. [Online]. Available: http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/zaverecne_prace/DP_2011_Gazdik_locked.pdfhttp://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/zaverecne_prace/DP_2011_Gazdik_locked.pdf. [Přístup získán duben 2015].
- [4] M. Soták, M. Sopata, R. Bréda, J. Roháč a L. Váci, Integrácia navigačných systémov, Košice: Bréda Róbert, 2006.
- [5] E.-H. Shin, „Accuracy Improvement of Low Cost,“ prosinec 2001. [Online]. Available: http://www.ucalgary.ca/engo_webdocs/NES/01.20156.EHShin.pdf. [Přístup získán 2 březen 2015].
- [6] J. Roháč, „MODERN SENSORS IN AIDED NAVIGATION SYSTEMS - Habilitační práce,“ 2013. [Online]. Available: <http://www.vrfel.cz/20140115/1HRprednaska-Rohac/HP.pdf>. [Přístup získán duben 2015].
- [7] „Coordinate system,“ 2014. [Online]. Available: <http://www.basicairdata.eu/coordinate-system.html>. [Přístup získán 17 březen 2015].
- [8] C. Guowei, C. B. M. a L. T. Heng, „Unmanned Rotorcraft Systems, Advances in Industrial Control,“ 2011. [Online]. Available: <https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&ved=0CEUQFjAH&url=http%3A%2F%2Fwww.springer.com%2Fcd%2Fcontent%2Fdocument%2Fcd%2Fdownload%2Fdocument%2F9780857296344-c2.pdf%3FSGWID%3D0-0-45-1143141-p174116371&ei=a4IMVemWCMfraMaEgvgI&usq=AFQjCNE>. [Přístup získán březen 2015].
- [9] Department of defence of USA, NIMA, „World Geodetic System 1984,“ 3 leden 2000. [Online]. Available: <http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tr8350.2/wgs84fin.pdf>. [Přístup získán březen 2015].
- [10] EUROCONTROL; IFEN, „WGS 84 IMPLEMENTATION MANUAL,“ leden 1998. [Online]. Available: <http://www.icao.int/safety/pbn/Documentation/EUROCONTROL/Eurocontrol%20WGS%2084%20Implementation%20Manual.pdf>. [Přístup získán březen 2015].
- [11] J. Šimánek, Analysis of suboptimal models for INS/GPS navigation algorithms, Praha, 2011.
- [12] A. Nemra a N. Aouf, „Robust INS/GPS Sensor Fusion for UAV Localization Using SDRE Nonlinear Filtering,“ 4 duben 2010. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5427255&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5427255. [Přístup získán březen 2015].
- [13] M. S. Grewal a A. P. Andrews, „Kalman Filtering: Theory and Practice,“ 2001. [Online]. Available: http://is.muni.cz/el/1456/jaro2009/PMAPEM/Kalman_filtering/Grewal__Andrews._Kalman_filtering._theory_and_practice_using_MATLAB__2ed.__Wiley__2001_410s_.pdf. [Přístup získán květen 2015].
- [14] R. E. KALMAN, „A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems,“ 1960. [Online]. Available: <https://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/media/pdf/Kalman1960.pdf>. [Přístup získán květen 2015].

- [15] J. Papaj, „Analýza dat z magnetometru - Bakalářská práce,“ 2011. [Online]. Available: http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/zaverecne_prace/BP_2011_Papaj_locked.pdf. [Přístup získán duben 2015].
- [16] T. Wescott, „Sampling,“ leden 2015. [Online]. Available: <http://www.wescottdesign.com/articles/Sampling/sampling.pdf>. [Přístup získán březen 2015].
- [17] R. Sedláček, „Základy metody číslicového zpracování signálu a obrazu,“ 2015. [Online]. Available: http://measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A4M38AVS/2015/prednasky/AVS_prednasky_2_2015.pdf. [Přístup získán 2015].
- [18] „Návrh FIR filtr,“ [Online]. Available: http://www.kiv.zcu.cz/~mautner/Azs/Azs8_Cislicova_filtrace_1_FIR.pdf. [Přístup získán 2015].
- [19] T. Kaur, „APPROACH FOR DESIGN OF FIR FILTER USING KAISER WINDOW,“ 2014. [Online]. Available: http://www.istp.org.in/papers/spec_issue/iocrsem14/IOCRSEM_EC_38.pdf. [Přístup získán 2015].
- [20] J. Mackley a S. Nahavandi, „Active temperature compensation for an accelerometer based angle measuring device,“ 2004. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1438684&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D1438684. [Přístup získán 2015].
- [21] J. Šimánek, J. Roháč a M. Šipoš, „Calibration of the Low-cost Triaxial Inertial Sensors,“ Praha.
- [22] M. MARINOV a Z. PETROV, „ALLAN VARIANCE ANALYSIS ON ERROR CHARACTERS OF LOW-COST MEMS ACCELEROMETER,“ 2014. [Online]. Available: http://www.afahc.ro/ro/afases/2014/mecanica/marinov_petrov_allan.pdf. [Přístup získán duben].
- [23] L. VÁCHA, „STABILIZAČNÍ 2D PLOŠINA PRO DIGITÁLNÍ OBRAZOVÝ SNÍMACÍ SYSTÉM - Diplomová práce,“ 2012. [Online]. Available: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52834. [Přístup získán duben 2015].
- [24] N. El-Sheimy, H. Hou a X. Niu, „Analysis and Modeling of Inertial Sensors Using Allan Variance,“ 2008. [Online]. Available: http://www.researchgate.net/profile/Naser_El-Sheimy/publication/3094132_Analysis_and_Modeling_of_Inertial_Sensors_Using_Allan_Variance/links/00463531e7c919ae2e000000.pdf. [Přístup získán duben 2015].
- [25] „STM32F407 reference manual,“ STMicroelectronics, [Online]. Available: http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/reference_manual/DM00031020.pdf.
- [26] „STM32F405xx, STM32F407xx datasheet,“ STM, 2015. [Online]. Available: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf>. [Přístup získán 2015].
- [27] ARM, „Cortex-M4 Devices Generic User Guide,“ 2014. [Online]. Available: <http://infocenter.arm.com/help/index.jsp>. [Přístup získán 5 březen 2015].
- [28] Bosch, „CAN with Flexible Data-Rate,“ duben 2012. [Online]. Available: http://www.bosch-semiconductors.de/media/pdf_1/canliteratur/can2spec.pdf. [Přístup získán březen 2015].
- [29] STMicroelecronic, 2015. [Online]. Available: <http://www.st.com/web/en/home.html>. [Přístup získán duben 2014].
- [30] „AMBA Specifications,“ ARM, [Online]. Available: <http://www.arm.com/products/system-ip/amba-specifications.php>. [Přístup získán 2015].
- [31] E. Ashfield, P. H. Ian Field, S. Houlihane, W. Orme a S. Woodhouse, „Serial Wire Debug and the CoreSight,“ [Online]. Available: http://www.arm.com/files/pdf/Serial_Wire_Debug.pdf. [Přístup získán březen 2015].

- [32] „IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic,“ IEEE, 2008. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=4610935&filter%3DAND%28p_Publication_Number%3A4610933%29. [Přístup získán duben 2015].
- [33] „Quartz Accelerometer INN-204,“ InnaLabs, 2014. [Online]. Available: <http://www.crlsensors.com/datasheets/INN-204.pdf>. [Přístup získán 2015].
- [34] „ADS1282,“ Texas Instruments, [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/ads1282>.
- [35] „ADS1282 High-Resolution Analog-To-Digital Converter,“ Texas Instruments, 2015. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1282.pdf>. [Přístup získán duben 2015].
- [36] I. KVH Industries, „DSP-3100, Fiber Optic Gyro,“ 2008. [Online]. Available: <http://www.kvh.com/Commercial-and-OEM/Gyros-and-Inertial-Systems-and-Compasses/Gyros-and-IMUs-and-INS/Fiber-Optic-Gyros/DSP-3100.aspx>. [Přístup získán 2 březem 2015].
- [37] Honeywell, „Smart Digital Magnetometer HMR2300,“ [Online]. Available: <http://www.farnell.com/datasheets/1744119.pdf>. [Přístup získán březem 2015].
- [38] „u-blox 6 Receiver Description,“ u-blox, [Online]. Available: http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/u-blox6_ReceiverDescriptionProtocolSpec_%28GPS.G6-SW-10018%29.pdf. [Přístup získán březem 2015].
- [39] „u-blox NEO-6 GPS Modules,“ u-blox, [Online]. Available: http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf. [Přístup získán březem 2015].
- [40] „u-center GNSS evaluation software for Windows,“ u-blox, 2015. [Online]. Available: <http://www.u-blox.com/en/evaluation-tools-a-software/u-center/u-center.html>. [Přístup získán duben 2015].
- [41] K. Betke, „The NMEA 0183 Protocol,“ 2001. [Online]. Available: <http://www.tronico.fi/OH6NT/docs/NMEA0183.pdf>. [Přístup získán duben 2015].
- [42] „American Standard Code for Information Interchange, ASA X3.4-1963,“ American Standards Association, 1963. [Online]. [Přístup získán duben 2015].
- [43] „System Timer (SysTick),“ ARM, 2015. [Online]. Available: <http://infocenter.arm.com/help/index.jsp?topic=/com.arm.doc.dai0179b/ar01s02s08.html>. [Přístup získán 2015].
- [44] „Library 24- Virtual COM Port (VCP) for STM32F4,“ 2014. [Online]. Available: <http://stm32f4-discovery.net/2014/08/library-24-virtual-com-port-vcp-stm32f4xx/>. [Přístup získán duben 2015].
- [45] „Discovery kit for STM32F407,“ STMicroelectronics, leden 2014. [Online]. Available: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/DM00039084.pdf. [Přístup získán duben 2015].
- [46] „Google Earth API,“ Google, 2014. [Online]. Available: <https://developers.google.com/earth/documentation/>. [Přístup získán duben 2015].
- [47] M. Bílý, Zpracování signálu a obrazu procesorem STM32F405, Praha, 2012.