



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

INERCIÁLNÍ NAVIGACNÍ SYSTÉM

INERTIAL NAVIGATION SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

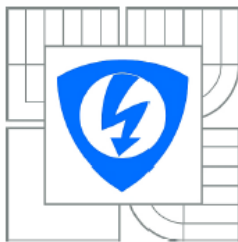
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN HOMOLKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. LENKA TEJMLOVÁ

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Martin Homolka

ID: 134496

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Inerciální navigační systém

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem činnosti a komunikace modulů GPS, kompasu a akcelerometru. Vyberte vhodnou komerčně dostupnou kombinaci těchto modulů. Dále vyberte vhodný řídicí obvod a navrhnete obvodové schéma tak, aby vznikl systém schopný ve vhodném formátu zapisovat aktuální polohu zařízení na paměťovou kartu, a to i v případě, že nelze přijímat GPS signál.

Navržený systém realizujte a vytvořte firmware řídicího obvodu, díky kterému budou data zapisována na paměťové médium. Doplněte možnost vykreslit trasu systému do map na internetu. Měřením v různých podmínkách ověřte funkčnost a přesnost systému.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FARRELL, J., BARTH, M. The Global Positioning System and Inertial Navigation. New York: McGraw-Hill Professional, 1998.

[2] GREWAL, M. S., WEILL, L. R., ANDREWS, A. P. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration. Danvers: John Wiley & Sons, 2004.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 31.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Lenka Tejmlová

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem inerciálního navigačního systému složeného z modulů GPS, kompasu, gyroskopu a akcelerometru. Zkoumá komunikaci a činnost mezi nimi a řeší návrh řídicího obvodu v podobě jednočipového mikrokontroléru. Z dostupných produktů na trhu vybere vhodnou kombinaci modulů, ke kterým navrhne obvodové zapojení, doplněné o přenosové paměťové médium. Tím vznikne inerciální navigační systém, schopný po nahrání firmwaru zapisovat aktuální polohu na přenosné paměťové médium i v případě, kdy dojde k výpadku GPS signálu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Inerciální navigační systém, GPS systém, akcelerometr, elektronický kompas, gyroskop, mikrokontrolér, mapa, záznam polohy, paměť, inerciální měřicí jednotka.

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with project of inertial navigation system, composed of modules, GPS, compass, gyroscope and accelerometer. It explores communication and action between them and solves the control circuit design in the form of single-chip microcontroller. After that, appropriate combination of modules will be selected from available products and circuit connections will be proposed, supplemented by portable storage medium. After loading the firmware, this creates an inertial navigation system, which is able to write the current position to portable storage medium, even in the case of GPS signal failure.

KEY WORDS

Inertial navigation system, GPS system, accelerometer, electronic compass, gyroscope, microcontroller, map, entry position, memory, inertial measurement unit.

Homolka M. Inerciální navigační systém. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. 35 s., 2 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Lenka Tejmlová.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma inerciální navigační systém jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujícího zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Lence Tejmlové za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Obsah	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Úvod.....	1
1 Inerciální navigační systém	2
2 Co je to GPS?	2
2.1 Vývoj	2
2.2 Základní služby	3
2.3 GPS segmenty	3
2.3.1 Kosmický segment	3
2.3.2 Řídící segment.....	4
2.3.3 Uživatelský segment	4
2.4 Navigační signály.....	4
2.5 Metody určování polohy.....	5
2.5.1 Dálkoměrná metoda	6
2.6 Kartézský a geodetický systém	7
2.7 Přijímač GPS	8
2.8 Time To First Fix	9
2.9 Protokol NMEA 0183	9
3 Micro Electro Mechanical Systems	12
3.1 Akcelerometr	12
3.2 Gyroskop	14
3.3 Magnetometry	16
4 Výběr vhodných modulů a řídicího obvodu.....	17
4.1 Modul GPS	17
4.1.1 GPS modul PA6B	19
4.2 Modul akcelerometru, gyroskopu a kompasu.....	20
4.3 Řídící obvod.....	22
4.3.1 Řídící jednotka ATmega16L.....	22

4.3.2	I ² C.....	22
4.3.3	SPI.....	24
4.3.4	USART.....	24
4.3.5	RS-232	25
4.4	Paměťové médium.....	25
5	Blokové a obvodové zapojení.....	27
5.1	Blokové schéma	27
5.2	Obvodové zapojení	29
5.3	Návrh plošného spoje	30
5.4	Programování.....	32
5.4.1	Blokové schéma programu pro ATmega16L.....	34
6	Zpracování výsledků.....	35
6.1	Zpracování dat v Matlabu	36
Závěr	43
Literatura		44
Seznam zkratk		48
Seznam příloh		50

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1:	Názorné rozmístění navigačních družic kolem země, převzato z [8].....	3
Obr. 2.2:	Názorný model geoidu, elipsoidu a země, převzato z [11].....	7
Obr. 2.3:	Znázornění geoidu, převzato z [12].	8
Obr. 3.1:	Struktura piezorezistorového akcelerometru, převzato z [41].....	13
Obr. 3.2:	Struktura kapacitního akcelerometru, převzato z [41].....	14
Obr. 3.3:	Měřené osy gyroskopu, převzato z [42].	14
Obr. 3.4:	Struktura MEMS gyroskopu, převzato z [42].....	15
Obr. 3.5:	Názorné měření úhlové rychlosti, převzato z [42].....	15
Obr. 3.6:	Princip Hallova jevu, převzato z [43].....	16
Obr. 3.7:	Vektory magnetického pole.....	17
Obr. 4.1:	Modul PA6B, převzato z [23].	19
Obr. 4.2:	Blokové schéma GPS modulu PA6B, převzato z [23].	19
Obr. 4.3:	Modul MinIMU-9 V2 a osy směru měření, převzato z [25].	20
Obr. 4.4:	Připojení zařízení slave a master k I ² C sběrnici, převzato z [23].....	23
Obr. 4.5:	Připojení zařízení slave k masteru SPI sběrnici, převzato z [33].	24
Obr. 4.6:	Paměť SST25VF032B a její vstupní a výstupní piny.	26
Obr. 5.1:	Blokové schéma navrhovaného inerciálního navigačního systému.	27
Obr. 5.2:	Blokové schéma zapojení inerciálního navigačního systému.....	29
Obr. 5.3:	Část obvodového schéma inerciálního navigačního systému.	30
Obr. 5.4:	Osazovací výkres stana TOP, v měřítku 1:1 (27 x 80 x 120 mm).....	31
Obr. 5.5:	DPS strana TOP, v měřítku 1:1 (27 x 80 x 120 mm)	32
Obr. 5.6:	Blokové schéma programu mikrokontroléru.....	34
Obr. 6.1:	Importované data v programu Microsoft office Excel.....	36
Obr. 6.2:	Hlavní funkce v programu Matlab Chyba! Záložka není definována.	
Obr. 6.3:	Změřená trasa v zeměpisných a absolutních souřadnicích	37
Obr. 6.4:	Graf jednotkového vektoru severu a jeho korekce	38
Obr. 6.5:	Graf jednotkového vektoru severu v souřadnicích INS	39
Obr. 6.6:	Graf jednotkového vektoru směru pohybu vůči světovým stranám.....	39
Obr. 6.7:	Grafy zrychlení v čase pro jednotlivé osy	40

Obr. 6.8: Grafy rychlosti v čase pro jednotlivé osy	41
Obr. 6.9: Graf rekonstrukce trasy v Matlabu	42
Obr. 6.10: Vykreslení trasy v mapovém podkladu na internetu.....	42

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1:	Přehled signálů GPS, převzato z [3].	5
Tab. 2.2:	Obecné parametry komunikace NMEA 0138, převzato z [17].	9
Tab. 2.3:	Výběr vět NMEA používaných v GPS systému, převzato [18].....	10
Tab. 2.4:	Detailní popis jednotlivých položek věty \$GPRMC, převzato z [3].	11
Tab. 2.5:	Detailní popis jednotlivých položek věty \$GPGGA, převzato z [3].	11
Tab. 4.1:	Parametry vybraných GPS modulů, dostupné na [22], [23] a [24].	18
Tab. 4.2:	Výpis jednotlivých pinů modulu PA6B, převzato a přeloženo z [23].	19
Tab. 4.3:	Výpis pinů modulu MinIMU-9 V2 a jejich význam, převzato z [25].	21
Tab. 4.4:	Výpis parametrů modulu MinIMU-9 V2 a jejich význam, převzato z [25]...	21
Tab. 4.5:	Logické úrovně a odpovídající napětí v RS-232, převzato z [33].	25
Tab. 4.6:	Popis pinů paměti SST25VF032B, převzato a přeloženo z [23].	26
Tab. 5.1:	Tabulka přenášených rámců.	33

ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem inerciálního navigačního systému (INS) složeného z modulů GPS, kompasu a akcelerometru. Zkoumá činnost a komunikaci mezi těmito moduly a řeší návrh řídicího obvodu. Následně je navrženo obvodové zapojení těchto komponentů doplněné o řídicí jednotku a paměťové médium pro vznik INS.

Následující text je možno rozdělit do sedmi základních částí. První tři kapitoly jsou zaměřeny na teoretický rozbor jednotlivých článků INS a pochopení určování polohy pomocí GPS modulu, určení změny rychlosti podle modulu akcelerátoru a směru pohybu podle modulu magnetometru. V kapitole čtvrté jsou popsány parametry vybraných komponentů pro INS. Blokové a obvodové schéma INS je představeno v kapitole páté, spolu s popisem firmwaru a skriptech zpracovávajících data. V posledních dvou kapitolách jsou zobrazeny výsledky měření a pojednání o jejich významu.

1 INERCIÁLNÍ NAVIGAČNÍ SYSTÉM

Inerciální navigační systém představuje soběstačnou navigaci obsahující pohybové senzory (akcelometry) a snímače otáčení (gyroskop, kompas). Řídící jednotka (například mikrokontrolér) zpracovává a vyhodnocuje data (rychlost a směr) z externích periférií, z nichž vypočte změnu polohy od počátečního stavu, který získáme z jiného zdroje určující polohu, v tomto případě globálního pozičního systému GPS - NAVSTAR (Global Positioning System - NAVigation Satellite Timing And Ranging), dále jen GPS [1].

Následující část práce se zabývá základní problematikou při realizaci inerciálního navigačního systému. Značná část je věnována systému GPS, podkapitoly se zabývají určováním polohy, přijímači či komunikací v GPS systémech. V následujících kapitolách je probrána problematika akcelerometrů pro měření rychlosti a zrychlení a elektronických kompasů pro určování azimutu.

Využití inerciální navigace má mnoho využití [2]:

- Pro svoji odolnost od externího rušení je vhodná pro navigaci řízených střel. Tento záměr byl také prvotní myšlenkou při počátcích vývoje.
- Jako pomocná navigace se používá pro letadla, ponorky, kosmické lodě.
- Další využití se nachází v navigaci pozemní dopravy, kdy například auto vjede do tunelu a tím ztratí svoji polohu danou GPS systémem.

2 CO JE TO GPS?

Systémy jako je evropský GALILEO, ruský GLONAS, čínský Compass a americký GPS, jsou obecně nazývány jako globální navigační satelitní systémy GNSS (Global Navigation Satellite System). GPS byl vyvinutý a provozovaný ministerstvem obrany DOD (Department of Defence). GPS umožňuje uživatelům na moři, ve vzduchu či na zemi určit jejich trojrozměrnou polohu, rychlost a čas kdykoli v průběhu 24 hodin, v jakémkoli počasí, kdekoli na světě a s daleko větší přesností než u jiných navigačních systémů dostupných dnes nebo v blízké budoucnosti [3].

2.1 Vývoj

Začátky GPS systému se datují na konec 20. století, kdy byl vyvíjen primárně pro americkou armádu. V letech 1978 – 1985 došlo k vypuštění vývojových družic Bloku 1. Během období studené války pak došlo k nešťastnému sestřelení civilního letadla korejských aerolinek ve vzdušném prostoru SSSR, kam se z neznámých důvodů odchýlilo od své pravidelné dráhy mezi U.S. a Jižní Koreou [4]. Na základě této události vydal americký prezident Ronald Reagan povolení využít GPS systém i k civilním

účelům. Následovalo vypuštění družic Bloku 2 a v roce 1993 byla vyhlášena počáteční operační schopnost s 24 funkčními družicemi. Plná provozní způsobilost systému GPS byla až v roce 1995 [5]. V současné době jsou vysílány na oběžnou dráhu družice z Bloku 3.

2.2 Základní služby

Přesná poloha navigace PPS (Precision Positioning Service) je k dispozici jen uživatelům s licenci, kterou vydává americká vláda.

Standardní služba navigace SPS (Standart Positioning Service) je naopak přístupná všem uživatelům, ale s menší přesností než u PPS. Tato služba byla navíc do roku 2000 záměrně ovlivňována selektivní dostupností SA (Selective Availability), pro zájmy americké armády. To znamenalo, že přesnost navigačních údajů dosahovala stovky metrů. Dne 1. května 2000 vydal americký prezident Bill Clinton prohlášení o deaktivování SA a následně bylo americkou vládou SA vypnuto [6].

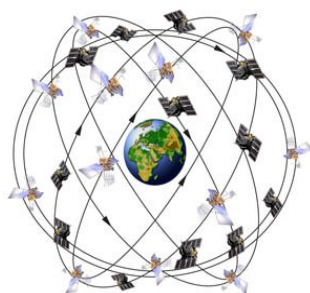
Další služby začaly být k dispozici s příchodem novějších družic Bloku 2 a Bloku 3, který je v současnosti budován.

2.3 GPS segmenty

GPS segmenty se rozdělují na tři části: kosmický, řídicí a uživatelský segment. Následující podkapitoly se soustředí na seznámení s těmito částmi [7].

2.3.1 Kosmický segment

Kosmický segment se skládá z konstelací družic, které vysílají neustále rádiové signály uživatelům. Tuto konstelaci řídí americké vzdušné síly a zajišťují minimálně 95. procentní dostupnost alespoň 24 operačních družic GPS.



Obr. 2.1: Názorné rozmístění navigačních družic kolem země, převzato z [8].

Pohybují se v šesti středních kruhových drahách MEO (Medium Earth Orbit – střední oběžná dráha). Přesněji ve výšce 20200 km nad zemí a s periodou oběhu 12 hodin. 24 družic je rozmístěno na oběžné dráze tak, aby měl uživatel kdekoli na zemi přístup

alespoň k šesti z nich. Pro určení polohy uživatele je obvykle zapotřebí čtyř družic, viz kapitola 2.5.1.

Družice obsahují celou řadu vysílacích a přijímacích antén, hlavní z nich jsou určeny pro komunikaci s řídicím segmentem, dalšími GPS družicemi a pro vysílání k uživatelskému segmentu. Pro komunikaci s řídicím segmentem využívají GPS družice kanál ve VHF nebo S pásmu. Pro vysílání navigačních signálů pro uživatelský segment se využívá pásmo L.

2.3.2 Řídicí segment

Řídicí segment se skládá z hlavní pozemní stanice v Colorado Springs, dále pět monitorovacích stanic a tři pozemní antény jsou rozmístěny po celém světě tak, aby bylo možno monitorovat celý kosmický segment. Monitorovací stanice přijímají radiové signály od všech GPS družic a posílají je do hlavní pozemní stanice, kde se vypočítávají velmi přesně dráhy jednotlivých družic a opravují se navigační data. Opravená data se zpětně vysílají do jednotlivých GPS družic přes pozemní antény, následně se distribuují do uživatelského segmentu [3],[8].

2.3.3 Uživatelský segment

Uživatelský segment využívají všichni uživatelé nebo systémy s GPS přijímači, které přijmou z kosmického segmentu radiové signály, zpracují je a poskytnou zpětně informace o své poloze, rychlosti a času, ve formě navigační zprávy, protokolu NMEA viz níže kapitola 2.1.

Tyto získaná data zpracovávají GPS aplikace, které můžeme využít pro [8]:

- Zemědělství (například zemědělské plánování, mapování pole, koncentrace biomasy atd.)
- Letectví (řízení a monitorování letů, atd.)
- Železnice (například zabraňování kolizím, plynulost provozu, efektivní vytížení železniční sítě, atd.)
- Silniční aplikace (například navigace, elektronické mýtné, sledování podnikových vozidel, atd.)
- Zeměměřičství a kartografie (např. projektování, mapy, atd.)
- Volný čas (např. geocaching, neboli hledání ukrytých pokladů, více na [9])

2.4 Navigační signály

Jádrem družice jsou atomové hodiny, které určují základní kmitočet 10,23 MHz. Od této frekvence jsou odvozeny všechny ostatní. GPS družice pro navigační signály využívají v pásmu L tyto nosné frekvence:

- Nosná frekvence L1 = 1575,42 MHz (154 násobek základního kmitočtu)

slouží pro přenos civilní služby SPS a vojenské služby PPS.

- Nosná frekvence L2 = 1227,60 MHz (120 násobek základního kmitočtu) je využívána pro vojenské služby PPS.
- Nosná frekvence L5 = 1381,05 MHz (115 násobek základního kmitočtu) je určena pro civilní služby SPS.
- Nosná frekvence L4 = 1841,40 MHz (180 násobek základního kmitočtu) je určena k měření ionosférického přídavného zpoždění.
- Nosná frekvence L3 = 1381,05 (135 násobek základního kmitočtu) slouží k detekci jaderných výbuchů a dalším vojenským nenavigačním účelům.

V současné době přijde uživatel s GPS přijímačem do styku se dvěma signály a to základní civilní C/A signál a přesný vojenský P signál. Existují nebo se plánují i další signály, jak vojenské, tak civilní, viz tabulka 2.1 níže. P(Y) signál je přenášen ve dvou pásmech L1 a L2, skládá se z veřejně známé sekvence P násobené šifrovacím kódem, tím vznikne signál Y. Dekódovací sekvenci znají jen licencovaní uživatelé. V následující upravené tabulce podle [3] jsou zobrazeny navigační signály družic GPS.

Tab. 2.1: Přehled signálů GPS, převzato z [3].

Pásmo	Signál	Nosná [MHz]	Služba	Min. přijímaný výkon [dBm]
L1	C/A	1575,42	SPS	-158,5
	P(Y)		PPS	-161,5
	M			Neudán
	L1C-d			-163
	L1C-p			-158,3
L2	L2C	1227,6	SPS	-160
	P(Y)		PPS	-164,5
	M			Neudán
L5	L5I	1176,45	SPS	-158
	L5Q			-158

2.5 Metody určování polohy

Pro získání trojrozměrné polohy přijímače se využívají následující metody:

- Úhломěrná metoda
- Dopplerovská metoda
- Interferometrická metoda

- Metoda založená na měření fáze a nosné
- Dálkoměrná

Následující podkapitola je věnována dálkoměrné metodě [3], protože tento způsob určování polohy využívá právě systém GPS.

2.5.1 Dálkoměrná metoda

Měříme vzdálenost mezi družicí a přijímačem. Využíváme k tomu měření časového zpoždění signálu vyslaného od družice k přijímači. To reprezentuje následující vzorec:

$$d_i = \tau_{di} \cdot c, \quad (1)$$

kde d_i představuje vzdálenost mezi přijímačem a i -tou družicí a τ_{di} je změřené zpoždění navigačního signálu na vzdálenosti d_i . Rychlost šíření elektromagnetické vlny je konstanta c .

Známe-li souřadnice (x_i, y_i, z_i) využívaných družic a jejich vzdálenosti, respektive časové zpoždění od přijímače, můžeme řešit tři rovnice o třech neznámých (x, y, z) , které určují polohu přijímače.

$$d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}, \quad (2)$$

kde (x_i, y_i, z_i) jsou souřadnice i -té družice a (x, y, z) jsou neznámé souřadnice přijímače.

Souřadnice jednotlivých družic se přenáší ve formě efemerid v navigační zprávě, kapitola 2.8, spolu s korekčními signály. Tyto hodnoty si může přijímač zapamatovat. Po jeho zapnutí dokáže predikovat polohu družic, díky těmto informacím a vlastním hodinám, které neustále běží. Tento proces se nazývá teplý start a urychluje určení polohy od spuštění.

Jak už bylo zmíněno, obecně přijímač obsahuje hodiny, díky kterým lze měřit zpoždění navigační zprávy. V ideálním případě by hodiny přijímače měly být stejně přesné a synchronizované s atomovými hodinami na palubě družice, což by bylo velmi nákladné a neefektivní. Dnešní přijímače obsahují hodiny na bázi krystalu křemíku, které se rozcházejí s atomovým hodinovým normálem v družici. Vzniká tak chyba měření, avšak stejně velká pro všechny délky d_i , tím se nám do výpočtu zahrne další neznámá a pro její řešení musí přijímač změřit další zpoždění navigační zprávy v pořadí již ze čtvrté družice. Dostaneme tedy čtyři rovnice o čtyř neznámých:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} + c \cdot t, \quad (3)$$

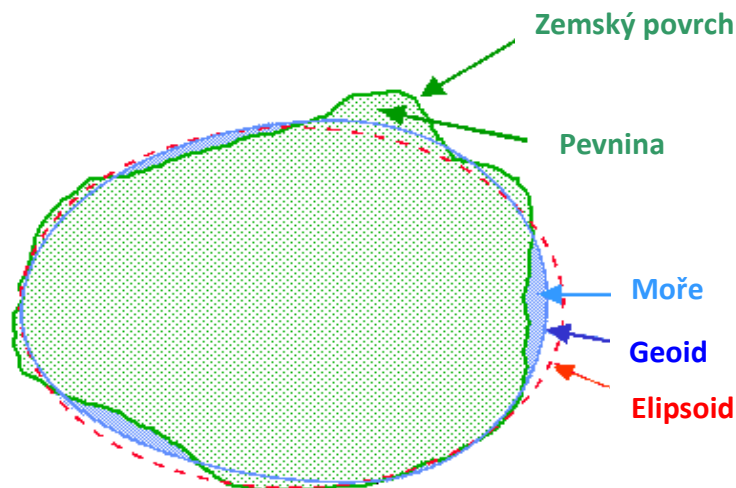
kde t reprezentuje čtvrtou neznámou a časovou odchylku mezi hodinami v přijímači a atomovými hodinami v družici. Využíváme čtyři družice, tedy $i = 1, 2, 3, 4$ a pro přesnější výpočet využíváme kombinaci čtveřic družic všech družic, které máme k dispozici. Výsledné hodnoty průměrujeme a získáme tak souřadnice (x, y, z) v kartézské soustavě, následně musíme převést tyto souřadnice do geodetického systému, kapitola 2.6.

Pro správnou funkci musí být zajištěna synchronizace časových základů kosmického segmentu, všech družic. Družice obsahují velmi přesné atomové normály

a o jejich vzájemnou synchronizaci se stará řídicí segment, který odchylky monitoruje a koriguje. I družice se navzájem „hlídají“ a informují přijímače o odchylkách pomocí efemeridu v navigačních zprávách [3].

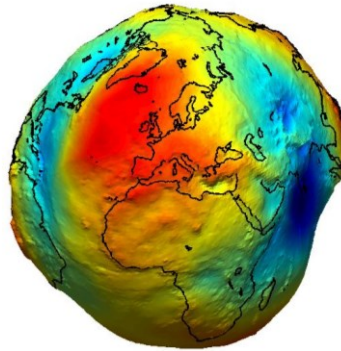
2.6 Kartézský a geodetický systém

Nejjednodušší nahrazení naší planety jiným tělesem je rotační těleso koule. Při bližším zkoumání zjistíme, že je země zploštělá na pólech a její přesnější tvar je tedy dán rotační elipsoidem, který získáme rotací elipsy kolem své kratší osy. Povrch země je dosti členitý, nehomogenní a působí zde gravitační a rotační síly. Tyto vlastnosti zahrnuje fyzikální těleso zvané geoid, které je definováno jako plocha tvořená klidnou střední hladinou moří, protažená pomyslně pod kontinenty a zároveň ve všech bodech je tato plocha kolmá k zemské tíži, [10].



Obr. 2.2: Názorný model geoidu, elipsoidu a země, převzato z [11].

Geoid je tedy velmi nepravidelné viz obrázek 2.2, členité a na výpočty složité těleso. Proto ho aproximujeme a nahrazujeme jednodušší referenční plochou, v našem případě elipsoidem. Existují mnohé druhy těchto elipsoidů, v České republice je používán například elipsoid Besselův pro civilní a WGS 84 pro vojenské účely. A právě tento elipsoid WGS 84 ve stejnojmenném systému WGS 84 (Word Geodetic System 1984 – světový geodetický systém 1984) využívá GPS systém [13].



Obr. 2.3: Znáornění geoidu, převzato z [12].

Pro výpočty je tedy vhodné pracovat v kartézském souřadnicovém systému a výslednou polohu nakonec převést do geodetického souřadnicového systému a nakonec zkorigovat výšku.

2.7 Přijímač GPS

Základem přijímače je anténa pracující v pásmu L, čip (SIFR, MediaTek) pro zpracování přijaté navigační zprávy a křemíkové hodiny, které nám určují časovou základnu pro měření zpoždění. Největší podíl na přesnosti přijímače má zvolený typ čipu. Nejnovější typy čipů od různých výrobců mají obdobné parametry.

Rozdělení typů GPS přijímačů podle užití:

- OEM moduly (Original Equipment Manufacturer, obchodní termín OEM označuje výrobek určený pro využití v jiných přístrojích reprezentující se pod jinou výrobní značkou [14])
- Přijímače pro leteckou navigaci
- Přijímače pro lodní navigaci
- Navigační přijímače pro ruční navigaci
- Přijímače pro kosmickou navigaci
- Přijímače pro mapování
- Měřické přijímače
- Přijímače přesného času
- Referenční přijímače

Dalším parametrem přijímače je údaj o tom, kolik kanálů obsahuje, neboli kolik družic může současně sledovat:

- Jednokanálové

- Vícekanálové
- Hybridní

2.8 Time To First Fix

Time To First Fix, dále jen TTFX, představuje dobu potřebnou k určení polohy od zapnutí GPS přijímače. Přijímač může obsahovat informace o polohách jednotlivých družic, takzvané efemeridy a almanach. Pojmy jsou vysvětleny v následujícím odstavci. V důsledku přítomnosti nebo nepřítomnosti těchto informací mohou nastat tři způsoby TTFX:

- **Studený start** (přijímač neobsahuje almanach, nebo jej musí částečně opravit)
- **Teplý start** (přijímač obsahuje kompletní almanach, ale musí získat efemeridy družic)
- **Horký start** (přijímač obsahuje kompletní almanach i efemeridy družic)

Almanach představuje jednu ze složek navigační zprávy GPS. Všechny družice vysílají stejný almanach, který nese data o poloze všech družic GPS na oběžné dráze. Kompletní získání almanachu je možné až po přijmutí celé navigační zprávy, zatímco efemeridy jsou sice také součástí navigační zprávy, ale jsou v navigační zprávě implementovány vícekrát. Obsahují velmi přesná data o poloze dané družice, která ji vysílá. Jsou vytvářeny hlavním řídicím střediskem GPS, které je průběžně vypočítává na základě sledování drah družic pozemními stanicemi. Přibližně jednou za hodinu jsou aktualizované efemeridy vysílány jednotlivým družicím, které je zahrnují do svých navigačních zpráv. Platnost efemerid trvá nanejvýše čtyři hodiny [15], [16].

2.9 Protokol NMEA 0183

Po zpracování navigačních zpráv z družice se na výstupu přijímače vytváří formát, takzvané zprávy NMEA. Za vývojem protokolu NMEA 0183 stojí americké sdružení National Marine Electronics Association, odtud tedy zkratka NMEA. Původně byl určen pro námořní komunikační a navigační rozhraní. V průběhu času byl tento protokol standardizován a využívá se obecně v globálních navigačních systémech neboli GNSS.

V protokolu se využívá sériové rozhraní s následujícími parametry:

Tab. 2.2: Obecné parametry komunikace NMEA 0138, převzato z [17].

Přenosová rychlost	4800 bit/s (i vyšší)
Počet datových bitů	8
Stop bit	1 (nebo více)
Parita	bez

Protokol NMEA je textově orientovaný, to znamená, že vysílaná zpráva je jako řetězec znaků definované z ANCIIL tabulky. Pro různorodé informace jsou předem definované takzvané věty, například informace o aktuální poloze, rychlosti, času najdeme v jedné a té samé větě, která se s určitým cyklem aktualizuje.

Každá věta obsahuje počáteční znak '\$' a zakončující znaky CR (Carriage Return - návrat na začátek věty) a LF (Line Feed – odřádkování). Délka jednotlivých vět nesmí překročit 80 znaků včetně znaků '\$', CR a LF. Obecný formát věty:

\$ttsss,d₁,d₂,d₃,,,.....,d_n*<CSUM><CR><LF>

Prvních 5 znaků za počátečním znakem '\$' určuje typ a zdroj zprávy. Následují jednotlivé navigační data **d**, jsou od sebe oddělené čárkou a index n je různý od nuly. Jestliže jsou některé informace nedostupné, zapíše se pouze příslušná čárka. Dva znaky **tt** představují zdroje zprávy (Talker Identifier). Následující tři znaky **sss** identifikují typ věty (Sentence Identifier). **CSUM** nám představuje exkluzivní součet XOR všech datových **d** položek ve větě, tento údaj je nepovinný. Za poslední navigační informaci je vložen symbol '*'. Jednotlivý formát vět je předem definovaný, ale existují i věty, které si může výrobce přijímače nadefinovat sám.

Tab. 2.3: Výběr vět NMEA používaných v GPS systému, převzato [18].

Identifikátor věty	Název	
RMC	Recommended minimum data	Doporučená minimální navigační zpráva
GGA	Fixed Information	Základní stav
ALM	Almanach Data	Almanach
GSA	Overall Satellite Data	Celková informace o družicích
GSV	Detaile Satellite Data	Detailní informace o družicích
A další...		

V následujících dvou tabulkách jsou detailně popsány příklady vět typu **\$GPRMC** (doporučená minimální navigační věta) a **\$GPGGA** (věta o základním stavu). Z těchto vět později budeme pracovat a získávat z nich informace o poloze. Doporučená minimální navigační věta na výstupu GPS přijímače a její rozbor, tabulka 2.4:

\$GPRMC,150900.233,A,4913,8788,N,01634.7124,E,0.00,,060512,,*75

Tab. 2.4: Detailní popis jednotlivých položek věty \$GPRMC, převzato z [3].

d_n	Formát	Hodnota	Význam
1	hhmmss.nnn	150900.833	Čas UTC 15:09:00 a 833 ms
2	char	A	Status (A= v pořádku, V = varování)
3	ssmm.mmmm	4913.8788	Zeměpisná šíře (49°13,8788´)
4	char	N	Polokoule severní = N a jižní = S
5	ssmm.mmmm	01634.7124	Zeměpisná délka (016°34,7124´)
6	char	E	Polokoule východní E a západní W
7	u.uu	0.00	Rychlost v horizontální rovině v uzlech
8	kk.kk	312.11	Kurz pohybu [°]
9	ddmmrr	060512	Datum (06. 05. 12)
10	d.d	není	Magnetická deklinace
11	char	není	Směr mag. deklinace na východ E, na západ W
12	*xx	75	Kontrolní součet

Věta o základním stavu na výstupu GPS přijímače a její rozbor v tabulce 2.5:

\$GPGGA,150900.233,4913,8788,N,01634.7124,E,1,09,0.9,337.1,M,,,,0000*0D

Tab. 2.5: Detailní popis jednotlivých položek věty \$GPGGA, převzato z [3].

d_n	Formát	Hodnota	Význam
1	hhmmss.nnn	150900.833	Čas UTC 15:09:00 a 833 ms
2	ssmm.mmmm	4913.8788	Zeměpisná šíře (49°13,8788´)
3	char	N	Polokoule severní = N a jižní = S
4	ssmm.mmmm	01634.7124	Zeměpisná délka (016°34,7124´)
5	char	E	Polokoule východní E a západní W
6	d	1	Indikátor kvality (0 – nelze určit pozici, 1 – pozice určena, 2 – pozice určena DGPS)
7	dd	09	Počet viditelných satelitů
8	d.d	0.9	HDOP (horizontální činitel zhoršení přesnosti)
9	d.d	337.1	Výška antény nad geoidem
10	char	M	Jednotka výšky (M – metr)
11	d.d	není	Rozdíl mezi WGS-84 zemským elipsoidem a střední úrovní moře
12	char	M	Jednotka rozdílu předchozího (M – metr)

13	d.d	není	Stáří poslední aktualizace DGPS v [s]
14	dddd	0000	ID referenční DGPS
15	*xx	0D	Kontrolní součet

3 MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEMS

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems – mikro elektromechanické systémy) jsou nedílnou součástí 21. století a tendence miniaturizace integrovaných obvodů, systému, součástek. Tato technologie se zabývá fyzikálními vlastnostmi materiálů, materiálových struktur a fyzikálních či biochemickými principy v mikrosvětě. Umožňuje například vyrobit senzor akcelerometru, obrázek 3.1, z monolitického substrátu křemíku a skleněnou podložkou, pomocí objemového mikroobrábění [42].

3.1 Akcelerometr

Akcelerometr představuje elektromechanické zařízení, které měří zrychlení. Měřené zrychlení můžeme rozdělit na statické, určující například náklon zařízení, a dynamické, které je způsobeno například změnou rychlosti pohybujícího se přístroje.

U statického měření tíhového zrychlení g , které je přibližně rovno $9,81 \text{ m/s}^2$, lze určit úhel vychýlení od zemského povrchu. Tíhové zrychlení zahrnuje v sobě složku jak gravitačního zrychlení, tak odstředivého zrychlení. Hodnota tíhového zrychlení není konstantní na celé zemi, liší se v důsledku různých odstředivých zrychlení ve srovnání na pólu a na rovníku země, nehomogenitou země, nadmořskou výškou nebo působení vesmírných těles jako je měsíc. Z dynamického měření zrychlení lze určit směr pohybu zařízení [19].

Vztah (4), který definuje zrychlení,

$$a = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial^2 x}{\partial^2 t^2}, \quad (4)$$

kde a je zrychlení v $[\text{m/s}^2]$. Integrací zrychlení a podle času t [s] získáme rychlost v $[\text{m/s}]$. Jestliže integrujeme rychlost, získáme tak délku x [m].

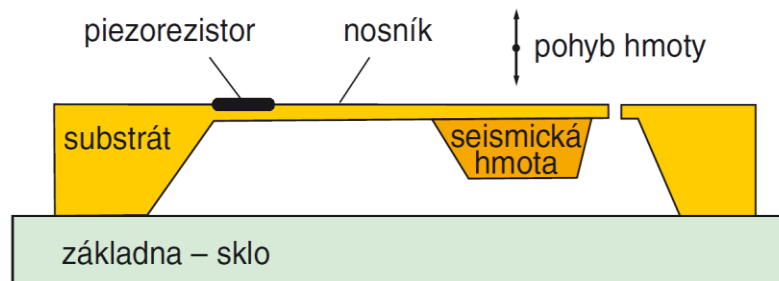
Využití akcelometrů v technice je velmi různorodé, zde jsou uvedeny některé příklady [20]:

- Měření sklonu, naklonění, zrychlení a brzdění zařízení
- Detekce a monitorování nárazů a vibrací
- Měření a předpovídání seizmické aktivity
- Trakční a bezpečnostní systémy automobilů

- Inerciální navigační systémy

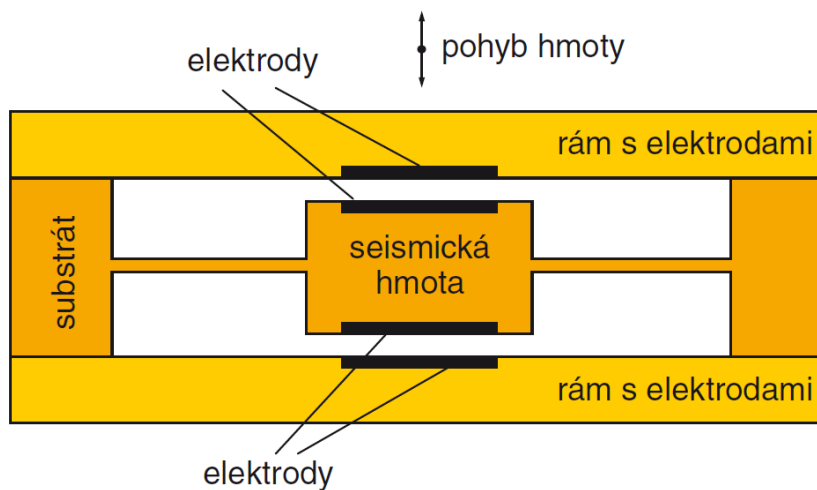
Zrychlení je neelektrická veličina a akcelerometr měří veličinu elektrickou, která je tedy nepřímo úměrná zrychlení, následujícími způsoby:

- **Piezelektrické** akcelerometry využívají piezelektrického jevu, který spočívá v tom, že vlivem zrychlení dochází k vychýlení seisecké hmoty měřidla a tím k mechanickému namáhání a deformaci piezokrystalu, piezorezistoru (například krystal křemene) obrázek 3.1. Na povrchu krystalu vznikají náboje, které se uvolňují do přiložených elektrod. Náboj je konvertován na napěťový výstup. Tento typ měření neumožňuje měřit statická zrychlení. Hlavními výhodami je jednoduchost a vysoká citlivost s malým šumem, hodící se pro měření systémů s rychlými kmity a chvěním.



Obr. 3.1: Struktura piezorezistorového akcelerometru, převzato z [41].

- **Kapacitní** akcelerometry jsou založeny na principu změny kapacity v důsledku zrychlení. Senzor se skládá z pevné části, která představuje jednu desku kondenzátoru, a z pohyblivé části (seismická hmotnost), jako druhá deska kondenzátoru, obrázek 3.2. Struktura kapacitního senzoru představuje diferenciální zapojení kondenzátoru a umožňuje měřit kladná i záporná, statická a dynamická zrychlení.

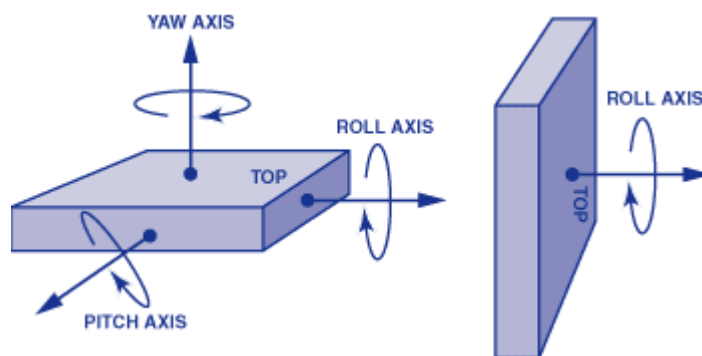


Obr. 3.2: Struktura kapacitního akcelerometru, převzato z [41].

- A další [21].

3.2 Gyroskop

Gyroskopy jsou zařízení měřící úhlovou rychlost ω v jednotkách $[\text{°/s}]$. Rotaci lze měřit k jedné z os x, y, z , které jsou nazývány, obrázek 3.3, jako podélná osa (roll axis), příčná osa (pitch axis) a svislá osa (yaw axis).



Obr. 3.3: Měřené osy gyroskopu, převzato z [42].

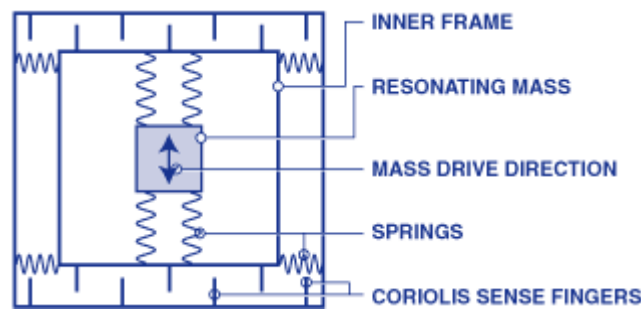
Příklady možného využití gyroskopu:

- Detekce a měření rotačního pohybu
- Stabilizační jízdní systémy automobilů
- Zpřesňování pozice systémů GPS
- Stabilizace obrazu a předmětů
- Zjišťování změny polohy, detekce pohybu
- Měření setrvačnosti

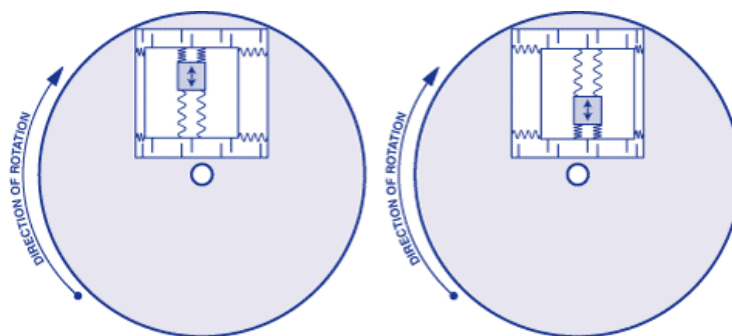
- Měření náklonu

Podle způsobu měření úhlové rychlosti můžeme rozdělit gyroskopy do tří kategorií:

- **Rotační gyroskopy**, patří k nejstarším typům
- **Vibrační gyroskopy**, dnes jsou nejvíce používány a jsou stále ve vývoji. V integrovaných gyroskopech se využívá technologie MEMS pro vytvoření elektrických a mechanických mikrosoučástí na jednom čipu, obrázek 3.3. Základem je periodicky se pohybující (mechanicky rezonující) struktura přesně dané hmotnosti upevněná pomocí pružin v rámu. Směr pohybu (Mass drive direction) musí však vždy být kolmý ke směru otáčení, aby vznikala Coriolisova síla působící na hmotnou pohybující se část snímače. Velikost síly je úměrná velikosti úhlové rychlosti otáčení. Ta způsobuje stlačení vnějších pružin rámu a způsobí vzájemný posuv měřících plošek (Coriolis sense fingers) fungujících jako elektrody vzduchových kondenzátorů, obrázek 3.4. Výstup je tedy změna kapacity úměrná úhlové rychlosti otáčení [$^{\circ}/s$] [42].



Obr. 3.4: Struktura MEMS gyroskopu, převzato z [42].



Obr. 3.5: Náznorné měření úhlové rychlosti, převzato z [42].

- **Optické gyroskopy**, jsou řazeny mezi dvě předcházející skupiny svými specifickými vlastnostmi. Jsou velice přesné, ale i finančně nákladnější.

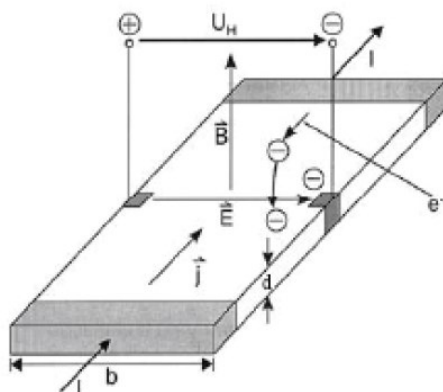
3.3 Magnetometry

Podle principu měření magnetického pole můžeme rozdělit magnetometry do kategorií [43]:

- Principy **magneto-galvanické** využívající Lorenzovy síly, Hallův jev, polovodičové magnetorezistory. Patří k nejpoužívanější metodě měření magnetického pole. Senzory využívají Hallova jevu - vznik příčného napětí U_H (řádově v desítkách mV) v polovodiči vystaveném magnetickému poli B , které je kolmé na protékající proud I zapříčiňuje Lorenzovu sílu působící na nosiče náboje q . Ze základní vztahu (5) a obrázku 3.6 je patrné, že Hallovo napětí je závislé na magnetickém poli.

$$U_H = \frac{R_H}{d} \cdot B \cdot I = \frac{3 \cdot B \cdot I}{8 \cdot n \cdot q \cdot d}, \quad (5)$$

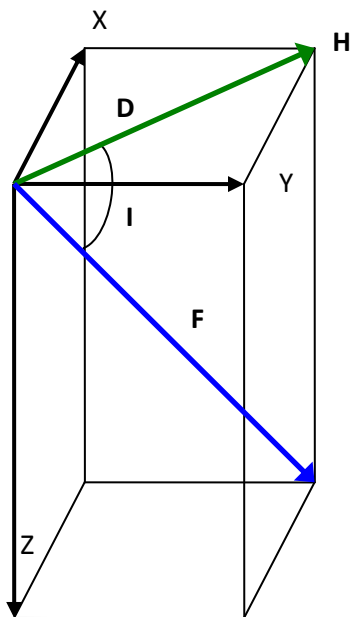
kde B je indukce [T], I představuje proud [A], q značí elementární náboj, R_H určuje Hallovu konstantu, d je tloušťka materiálu a n je počet nosičů náboje.



Obr. 3.6: Princip Hallova jevu, převzato z [43].

- Principy **magnetorezistivní** využívají magnetorezistivního jevu ve feromagnetických materiálech (AMR – Anizotropní magnetorezistory)
- **Indukční** magnetometry využívají Faradayova indukčního zákona.
- A další.

Magnetometr měří celkovou intenzitu vektoru magnetického pole. Pro výpočet azimutu, tedy odchylky směru pohybu od severního pólu, jsou použity následující vzorce a názornost vektorů v obrázku 3.7:



- **F** celková intenzita magnetického pole
- **H** horizontální složka vektoru magnetického pole
- **Z** vertikální složka magnetického pole
- **X** složka vektoru ve směru k severu
- **Y** složka vektoru ve směru k východu
- **D** magnetická deklinace, definována jako úhel mezi směrem k severu a horizontální komponentou měřenou po směru hodinových ručiček
- **I** magnetická inklinace, definována jako úhel měřený od horizontály, směrem dolů nabývá pozitivních hodnot

Obr. 3.7: Vektory magnetického pole.

$$F = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad H = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad D = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right), \quad I = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{Z}{H}\right), \quad (6),(7),(8),(9)$$

D a I mají jednotku ve stupních [°], ostatní složky v Teslách [T]. Některé magnetometry měří v gaussech (1 gauss = 10⁻⁴ T).

V České republice lze říct, že inklinace I je rovna 65° a deklinace D je rovna 0°, [47].

4 VÝBĚR VHODNÝCH MODULŮ A ŘÍDÍCIHO OBVODU

V této kapitole je rozebrána problematika výběru vhodných komponentů pro inerciální navigační systém. Zohledňuje se zde například velikost napájení, odběru proudu, dostupnost, cena, velikost. Následně zvolená konstelace komponentů a konfigurace řídicího obvodu je popsána a implementovaná do navrhovaného inerciálního navigačního systému.

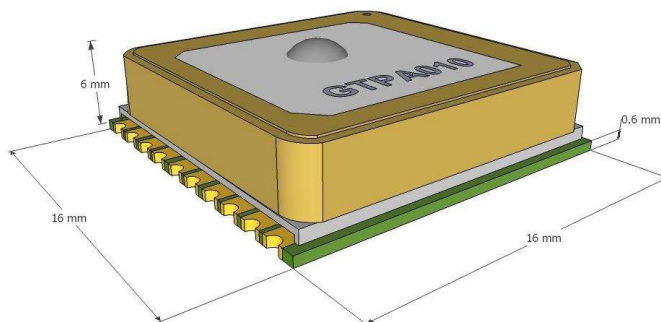
4.1 Modul GPS

Sortiment OEM GPS modulů je sice na českém trhu omezen, ale je dostačující. Výběr modulu byl podřízen různým faktorům. V první řadě byla rozhodující cena a přesnost přijímače a možnost komunikace. Setkáváme se zde nejvíce s čipy od SiRFu, MediaTeku a Skytraqu, jež jsou ve stejné cenové relaci parametricky srovnatelné. V následující tabulce 4.1 jsou představeny parametry třech modulů GPS od třech výrobců. Z nich byl vybrán pro realizaci inerciálního navigačního systému modul typu PA6B od výrobce GlobalTop, využívající čip MT3329 a s příznivou cenou.

Tab. 4.1: Parametry vybraných GPS modulů, dostupné na [22], [23] a [24].

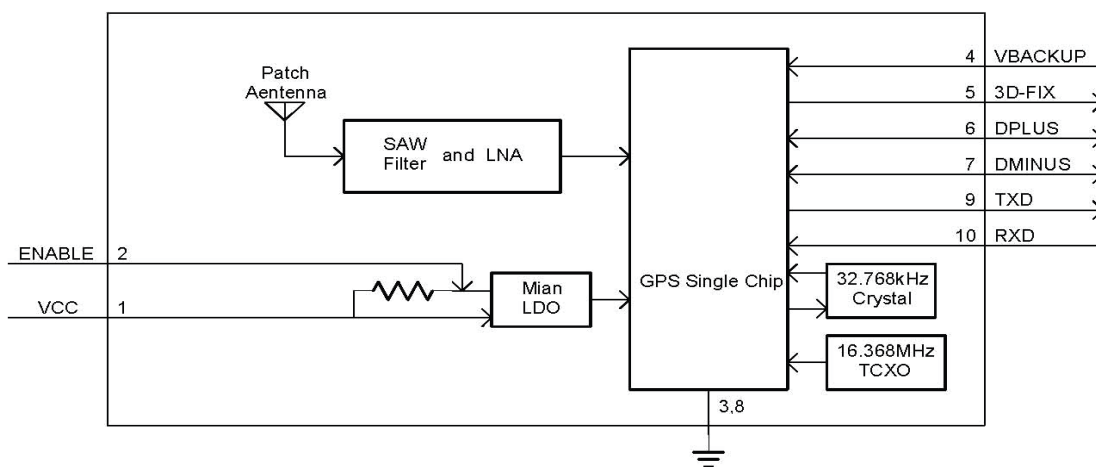
Typ	UP-501R	PA6B	LR9552
Výrobce	Fastrax	GlobalTop	Leadtek
Cena	1000 Kč	705 Kč	855 Kč
Čip	MediaTek MT3329	MediaTek MT3329	SiRFStarIII
Počet kanálů	66	66	20
Napájení	3,0 – 4,2 V	3,2 – 5 V	3,2 – 5,0 V
Proudový odběr	40 mA ve fázi hledání satelitů, 28 mA při 3,0V	48 mA při hledání satelitů, 37 mA navigace	55 mA při 3,3 V
Nastavitelná obnova stavu	Až 10 Hz	Až 10 Hz	1 Hz
Citlivost:	-148 dBm (studený start) -165 dBm (navigace)	-148 dBm (studený start) -165 dBm (navigace)	-142dBm (studený start) -158 dBm (navigace)
Rozměry [mm]	22 x 22 x 8	16 x 16 x 6	25 x 25 x 8,9
Vestavěná anténa	Ano	Ano	Ano
Formát	NMEA 0183	NMEA 0183	NMEA 0183, SiRF Binary
Komunikace	RS232	USB, USART (TTL)	RS232
Podpora	WAAS, EGNOS	DGPS (WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN)	WAAS
Přesnost pozice	Až 3 m (2D-RMS) Až 2,5 (2D-RMS) s DPGS	Až 3 m (2D-RMS) Až 2,5 (2D-RMS) s DPGS	5 m (2D-RMS) 2,5 (2D-RMS) s WAAS
Přesnost rychlosti	Až 3 m (2D-RMS) Až 2,5 (2D-RMS) s DPGS	0,1 m/s 0,05 m/s s DGPS(SBAS)	0,1 m/s
Studený/ teplý/ horký start	33/33/1 s	35/34/1 s	42/38/1 s

4.1.1 GPS modul PA6B



Obr. 4.1: Modul PA6B, převzato z [23].

Jádrum tohoto modulu, obrázek 4.1, je čip MK3329 od MediTeku. Systémové blokové schéma s označením pinů č. 1 – 10 je na obrázku 4.2. Modul dále obsahuje integrovanou pasivní patch anténu, filtr SAW (Surface Acoustic Wave – filtr s povrchovou akustickou vlnou) pro získání vysoké selektivity, LNA (Low Noise Amplifier – nízkošumový zesilovač), regulátor napájecího napětí LDO (Low-DropOut) a křemíkové oscilátory. TCXO značí teplotně kompenzovaný krystalový oscilátor.



Obr. 4.2: Blokové schéma GPS modulu PA6B, převzato z [23].

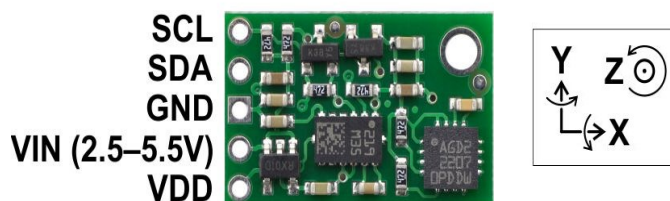
Modul umožňuje vysílat data po sériové USART lince v úrovních TTL, kapitola 4.3.4, která je kompatibilní s USART linkou mikrokontroléru ATmega16L, který byl vybrán jako řídicí jednotka systému kapitola 4.3.1. K GPS modulu PA6B pro správnou funkci musí být připojena 3 V baterie, která není součástí modulu. Zapojení nalezneme v katalogovém listu výrobku [23]. Baterie slouží k uchování přijatého almanachu s eferemidy i po vypnutí hlavního napájení. Tím se značně urychlí TTFX, viz kapitola 2.8, po následném zapnutí GPS modulu. V níže uvedené tabulce 4.2 jsou popsány a vysvětleny funkce jednotlivých pinů.

Tab. 4.2: Výpis jednotlivých pinů modulu PA6B, převzato a přeloženo z [23].

Č. pinu	Název pinu	Pin I/O	Popis
1	VCC	PI	Vstupní napájení (3,0 – 5,0 V)
2	ENABLE	I	V nízké úrovni vypne modul (0 – 0,25 V), ve vysoké úrovni je modul zapnut (1,8 V – VCC).
3	GND	P	GND
4	VBACKUP	PI	Záložní napájení (2,0 - 4,3 V)
5	3D-FIX	O	3D-fix identifikátor
6	DPLUS	I/O	USB port D+
7	DMINUS	I/O	USB port D-
8	GND	P	GND
9	TXD	O	Výstupní sériová data ve formátu NMEA
10	RXD	I	Vstupní sériová data pro aktualizování firmwaru

4.2 Modul akcelerometru, gyroskopu a kompasu

Pro realizaci byla vybrána kombinace modulů umístěna na jedné desce plošných spojů DPS s označením MinIMU-9 V2 obrázek 4.3 [25]. Tato měřící inerciální jednotka IMU (Inertial Measurement Unit) obsahuje digitální tříosý gyroskop L3GD20, digitální tříosý akcelometr LSM303DLHC a digitální tříosý magnetometr. Jednotlivé moduly jsou propojeny sběrnicí I2C, která je vyvedena na vývody desky. Součástí DPS je i regulátor napětí a pracovní napájení je od 2,5 V do 5,5V.



Obr. 4.3: Modul MinIMU-9 V2 a osy směru měření, převzato z [25].

U obrázku 4.3 jsou vedle DPS znázorněny jednotlivé směry měřených os a rotací. V následující tabulce 4.3 jsou vysvětleny vstupní a výstupní piny DPS.

Tab. 4.3: Výpis pinů modulu MiniIMU-9 V2 a jejich význam, převzato z [25].

Pin	Popis
SCL	Hodinový signál (HIGH je VIN, LOW je 0 V).
SDA	Datový přenos (HIGH je VIN, LOW je 0 V).
GND	GND (zem) musí mít společnou s řídicí jednotkou I ² C.
VIN	Napájecí napětí 2,5 – 5,5 V.
VDD	Výstup regulátoru napětí 3,3, které je nezávislé na VIN slouží jako nízko úroňové logické napájení. Pokud je napájení VIN větší než 3,3 V, může napájet externí komponenty do 150 mA. V systému s logikou do 3,3 V může být pin VIN odpojen a hlavní napájení pak bude připojeno na VDD. Jestliže je VIN připojen nemůže být napájen pin VDD.

Podrobný popis modulu gyroskopu L3GD20 a modulu akcelometru, magnetometru LSM303DLHC, který tato IMU obsahuje, nalezneme v příslušném katalogovém listě, Pro gyroskop [26] a pro akcelerometr, manometr [27]. Základní parametry IMU jsou uvedeny v tabulce 4.4. Jsou zde uvedeny slave adresy pro komunikaci na sběrnici I²C, rozsahy a citlivosti měření.

Tab. 4.4: Výpis parametrů modulu MiniIMU-9 V2 a jejich význam, převzato z [25].

Parametry MiniIMU-9	
Rozměry	20 x 13 x 3 mm
Provozní napětí	2,5 – 5,5 V
Napájecí proud	10 mA
Výstupní formát I ² C	
Gyroskop	16 bitové čtení na jednu osu
	Slave adresa: 1101011
Akcelerometr	16 bitové čtení na jednu osu
	Slave adresa: 0011001
Magnetometr	16 bitové čtení na jednu osu
	Slave adresa: 0011110
Rozsah citlivosti (nastavitelné)	
Gyroskop	± 250, ± 500, ± 2000 °/s
Akcelerometr	± 2, ± 4, ± 8, ± 16 g
Magnetometr	± 1,3, ± 1,9, ± 2,5, ± 4,0, ± 4,7, ± 5,6, ± 8,1 gauss

4.3 Řídící obvod

4.3.1 Řídící jednotka ATmega16L

Jako řídící jednotka byl vybrán jednočipový mikrokontrolér ATmega16L od firmy AVR z důvodu dostupnosti na škole s vývojovou deskou AVR STK500, viz [44], a předchozích zkušeností. K vývojové desce, obsahující mikrokontrolér, lze snadno připojit externí periferie na jednotlivé porty a piny mikrokontroléru. Dále lze připojit i LCD displej, který může posloužit při vývoji, například k zobrazení aktuální polohy a podobně.

Základní parametry mikrokontroléru ATmega16L, výpis z katalogového listu [42]:

- 8-mi bitová RISC architektura
- Paměť programu: 16kB Flash, až 10 000 programovacích cyklů
- Napájecí napětí: 2,7 – 5,5V
- Taktovací kmitočet: 0 – 8MHz, vnitřní oscilátor
- Programovací a ladící rozhraní ISP, JTAG
- 32 programovatelných I/O linek
- Rozhraní USART
- Rozhraní I²C
- Sériové master/slave SPI rozhraní

K mikrokontroléru jsou připojeny tyto externí periferie:

- Modul tříosého akcelerometru měřící lineární zrychlení
- Modul tříosého gyroskopu pro zkoumání rotace systému
- Modul tříosého magnetometru pro určení směru pohybu, odchylku od magnetického severního pólu.
- GPS modul
- Sériová flash paměť pro zaznamenávání získaných dat
- LCD displej pro zobrazování aktuální dat v mikrokontroléru, využíváno při ladění programovací části programu

4.3.2 I²C

Sběrnice I²C (Inter-Integrated Circuit) je považována za celosvětový standart, který je implementován do tisíců integrovaných obvodů od různých výrobců.

Charakteristiky sběrnice jsou:

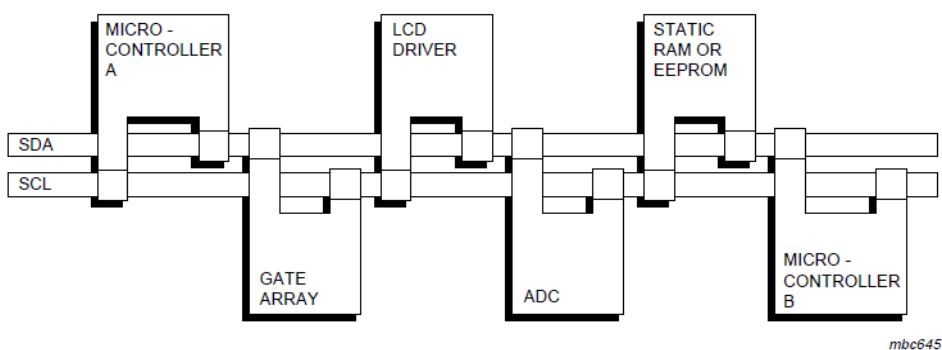
- Jednoduchost na realizaci pro externí zařízení, které mají v sobě implementovanou I²C sběrnici.
- Adresování je čistě softwarové.

- Je tvořena pouze dvou vodičovým vedením, a to datovým (SDA) a hodinovým (SCL). Každý vodič obsahuje pull-up rezistor pro zajištění vysoké úrovně signálu v klidovém stavu.
- Umožňuje připojení až 128 zařízení. Počet přijatelných integrovaných obvodů je ale omezen maximální kapacitou sběrnice a to 400 pF.
- Na sběrnici může být přidáno nebo odebráno zařízení, bez jiné změny na sběrnici.

Každé zařízení připojené na tuto sběrnici má svoji jedinečnou identifikační adresu, v našem případě 7 bitovou. Sběrnici řídí master a komunikuje se tak, že master vysílá pro slave zařízení, nebo master přijímá od slave zařízení. Sériová 9 bitově orientovaná komunikace je ve standardním módu přenášena 100 kbit / s. Rychlost lze zvýšit až na 400 kbit / s a výše.

Jsou zde podporovány dva typy zařízení a to **master** zařízení, které zahajuje, řídí a ukončuje komunikaci na sběrnici. Také generuje hodinový signál SCL. Druhý typ zařízení je **slave**, které komunikuje se sběrnici, je-li zavolané svoji adresou a řízené hodinovým signálem.

Zahájení komunikace probíhá start bitem (Start Condition), za kterým následují 9 bitů adresního paketu (7 bitů adresa, jeden potvrzovací bit a jeden řídicí bit pro zápis nebo čtení). Potvrzovací bit zasílá slave zařízení, které rozpozná svoji adresu na sběrnici. Posléze jsou odesílány datové pakety po velikosti 9 bitů (8 bitů data a jeden potvrzovací bit). Nejvýznamnější bit MSB je vždy vysílán jako první. Konec rámce a komunikace zajišťuje stop bit (Stop Condition).



Obr. 4.4: Připojení zařízení slave a master k I²C sběrnici, převzato z [23].

Obrázek 4.5 zobrazuje sběrnici I²C v režimu multi-master. Jestliže mikrokontroléry A a B začnou řídit sběrnici ve stejný čas, přijde na řadu rozhodovací řízení, které rozhodne o pořadí a tím nevznikne na sběrnici případná kolize. Sběrnice může obsahovat i více masterů. Hodinový signál je vždy generován řídicím masterem [28], [29].

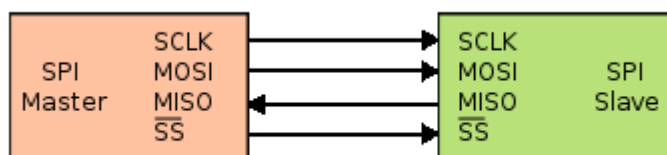
Podrobnější informace ohledně sběrnice I²C lze nalézt na webových stránkách [28]

firmy NXP Semiconductors (Philips), která stojí za vývojem sběrnice I²C.

4.3.3 SPI

Sběrnice SPI (Serial Peripheral Interface) představuje sériové rozhraní mezi přístroji, nejčastěji je jeden master (mikrokontrolér) a jeden či více slave zařízení (EEPROM, A/D převodník, displej a další). Synchronní provoz na sběrnici je zajištěn čtyřmi vodiči viz obrázek 4.6. Generování hodinového signálu SCLK zajišťuje zařízení typu master. Adresování je zde realizováno pomocí vodiče přivedený na negovaný pin SS nebo pin CS. Master nastaví log. 0 na pin SS toho zařízení, se kterým chce komunikovat. Pomocí vodičů MISO (Master In, Slave Out) a MOSI (Master Out, Slave In) se obousměrně (full duplex) přenáší data. Přenos dat začíná obvykle od MSB po LSB, v mnoha případech lze volit.

Napěťové úrovně jednotlivých signálů rozhraní SPI jsou dané použitou technologií. Sběrnice SPI pracuje jako kruhové zapojení mezi posuvným registrem master a posuvným registrem slave a posun je řízen hodinovým signálem. Přičemž maximální frekvence hodinového signálu je 2 MHz [30], [31], [32].



Obr. 4.5: Připojení zařízení slave k masteru SPI sběrnici, převzato z [33].

4.3.4 USART

USART může být naprogramován jako:

- **Asynchronní (full duplex)** – Tento mód je nakonfigurován jako duplexní asynchronní systém, který může komunikovat s perifériemi jako jsou např. CRT terminály, osobní počítače (PC) atd..
- **Synchronní (half duplex)** – Mód poloduplexní synchronní systém, který může komunikovat např. s perifériemi jako jsou A/D a D/A převodníky, sériová EEPROM atd.

Synchronní mód používá hodinovou a datovou linku a v asynchronním módu využívá jednu linku pro vysílání a jednu pro příjem, proto operace mohou probíhat nezávisle na sobě.

USART (asynchronní mód) vysílá data na pinu značený jako Tx (Transmit) a na pinu Rx (Receive) data přijímá. V synchronním módu se přenáší hodinový signál. Pokud mikrokontrolér generuje hodinový signál, pracuje v režimu master. Pokud hodinový signál přijímá, nachází se v režimu slave.

Vysílání je zahájeno start bitem změnou klidové úrovně signálu log. 1 na log. 0 po dobu jednoho bitu. Vysílaná data jsou od nejméně důležitého datového bitu (LSB). Za posledním nejvýznamnějším datovým bitem následuje stop bit, který má opět úroveň log. 1. Po odvysílání stop-bitu může začít přenos dalšího bajtu, podrobněji zpracované v [39].

4.3.5 RS-232

Standart RS-232 se využívá jako komunikační duplexní rozhraní mezi dvěma zařízeními. Bity jsou přenášeny sériově, postupně za sebou po jednom páru vodičů v každém směru. RS-232 je realizována vodičem TXD pro vysílání dat, vodičem RDX pro přijímání dat a společným vodičem představující GND. Komunikace se zabývá pouze bezkolizní fyzickou vrstvou přenosu. Modulační rychlost přenosu je konstantní a lze ji nadefinovat na obvyklé hodnoty jako 4800 [bd/s], 9600 [bd/s] a další. Jednotka [bd/s] [baud/s] představuje počet změn stavu za jednu sekundu. V RS-232 je 1 [bd/s] je roven [1bit/s] [35].

Přenos je asynchronní, není řízen hodinovým signálem. Vysílač vždy vyšle sekvenci obsahující jeden start bit, klidová logická hodnota na lince se zneguje, následují datové byty, jejichž velikost je volitelná, typicky 7, 8, 9 bitů. Po datových bitech následuje nepovinný paritní bit a jeden nebo několik stop bitů. Přijímač přijme sekvenci, při níž dojde k synchronizaci.

Data jsou vysílána od nejméně významného bytu (LSB) po bit nejvýznamnější (MSB). Logické úrovně a jejich odpovídající úrovně jsou vyčteny v tabulce 4.5. RS-232 pracuje se dvěma různými úrovněmi napětí, například +5 V a -5 V [33], [34].

Tab. 4.5: Logické úrovně a odpovídající napětí v RS-232, převzato z [33].

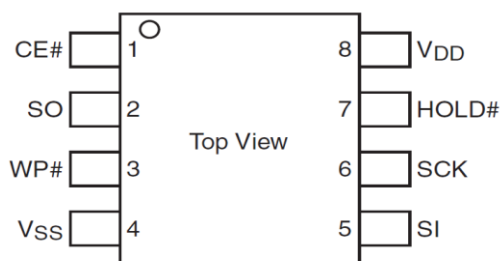
Úroveň	Vysílač	Přijímač
Log. 0	+5 V až -5 V	+3 V až +25 V
Log. 1	-5 V až +5 V	-3 V až -25 V
Nedefinováno	-3 V až +3 V	

Pro připojení obvodu využívající logiku TTL nebo CMOS na linku RS-232 musí dojít k napěťovému přizpůsobení. Existují konvertory napětí, které toto přizpůsobení zajistí, například MAX232 od firmy MAXIM.

4.4 Paměťové médium

Pro zjednodušení systému bylo vybráno jako paměťové médium sériová flash paměť, konkrétněji s označením SST25VF032B, od firmy SST respektive od firmy Microchip. Jednotlivé piny součástky, viz obrázek 4.7, jsou popsány v tabulce 4.6. Vybrané vlastnosti paměti:

- Kapacita 32 Mbit
- Napájecí napětí 2,7 – 3,6 V
- Podporuje komunikaci SPI mód 0 a 3
- Smazání celé paměti za 18 ms
- Naprogramování bajtu za 7 μ s
- Udržení dat minimálně 100 let
- Spotřeba typicky 10 mA, při mazání až 35 mA



Obr. 4.6: Paměť SST25VF032B a její vstupní a výstupní piny.

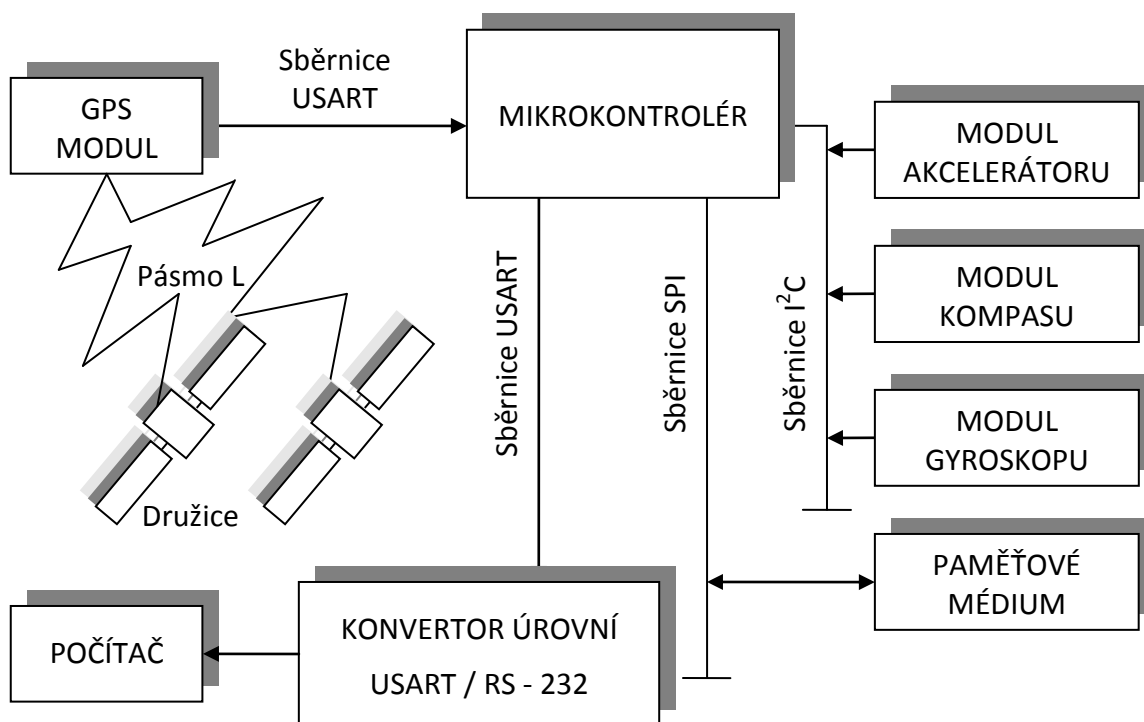
Tab. 4.6: Popis pinů paměti SST25VF032B, převzato a přeloženo z [23].

Č. pinu	Název pinu	Název pinu	Popis
1	CE#	Sériové hodiny	Zařízení je aktivní změnou z vysoké úrovně na nízkou.
2	SO	data Sériová výstupní data	Sériový přenos výstupních dat ze zařízení. Data jsou posunována s padající hranou hodinového signálu.
3	WP#	Ochrana zápisu	Znemožňuje zápis do paměti při nízké úrovni.
4	V _{SS}	GND (zem)	
5	SI	Sériová vstupní data	Přenos příkazů, adres a dat do zařízení. Vstup je řízen s náběžnou hranou hodinového signálu.
6	SCK	Sériové hodiny	Vstup pro hodinový signál od řídicího zařízení.
7	HOLD#	Přerušení	Dočasně zastaví komunikaci s SPI sběrnici, je-li v nízké úrovni. Nedojde k resetování zařízení.
8	V _{DD}	Napájecí napětí	Vstupní napájení (2,7 – 3,6 V)

5 BLOKOVÉ A OBVODOVÉ ZAPOJENÍ

5.1 Blokové schéma

V následujících odstavcích je popsána základní struktura navrhovaného inerciálního navigačního systému, obrázek 4.7.



Obr. 5.1: Blokové schéma navrhovaného inerciálního navigačního systému.

GPS modul pomocí svojí implementované antény přijímá navigační zprávy od družic v radiovém pásmu L, které zpracovává. Určí z nich svoji polohu, rychlost, výšku, kvalitu signálu, přesný čas a další informace, které nejsou pro tento systém důležité (například HDOP, počet viditelných satelitů, polokoule, atd.). Takto zpracované a vypočítané informace vysílá modul po sériové lince UART ve formátu podle NMEA 0183, kapitola 2.9.

Mikrokontrolér přijímá věty NMEA 0183 po sériové lince. Uvnitř mikrokontroléru je firmware, který řídí chod systému a zpracovává data. Z dat od GPS modulu vybere větu **\$GPRMC** (doporučená minimální navigační věta), která obsahuje souřadnice polohy, aktuální čas, rychlost, kurz pohybu a kvalitu signálu. Data jsou roztržena na tyto jednotlivé informace a poskládaná do rámce, který je poslán na sběrnici SPI k zápisu na paměťové médium. Mezi jednotlivé informace je přidáván znak reprezentující tabulátor a na konci každého rámce znak je prezentující konec řádku. Tyto speciální znaky z ASCII tabulky slouží k oddělování informací do buněk při importu dat do Microsoft Office Excel. Více o speciálních znacích a ASCII tabulce na [45].

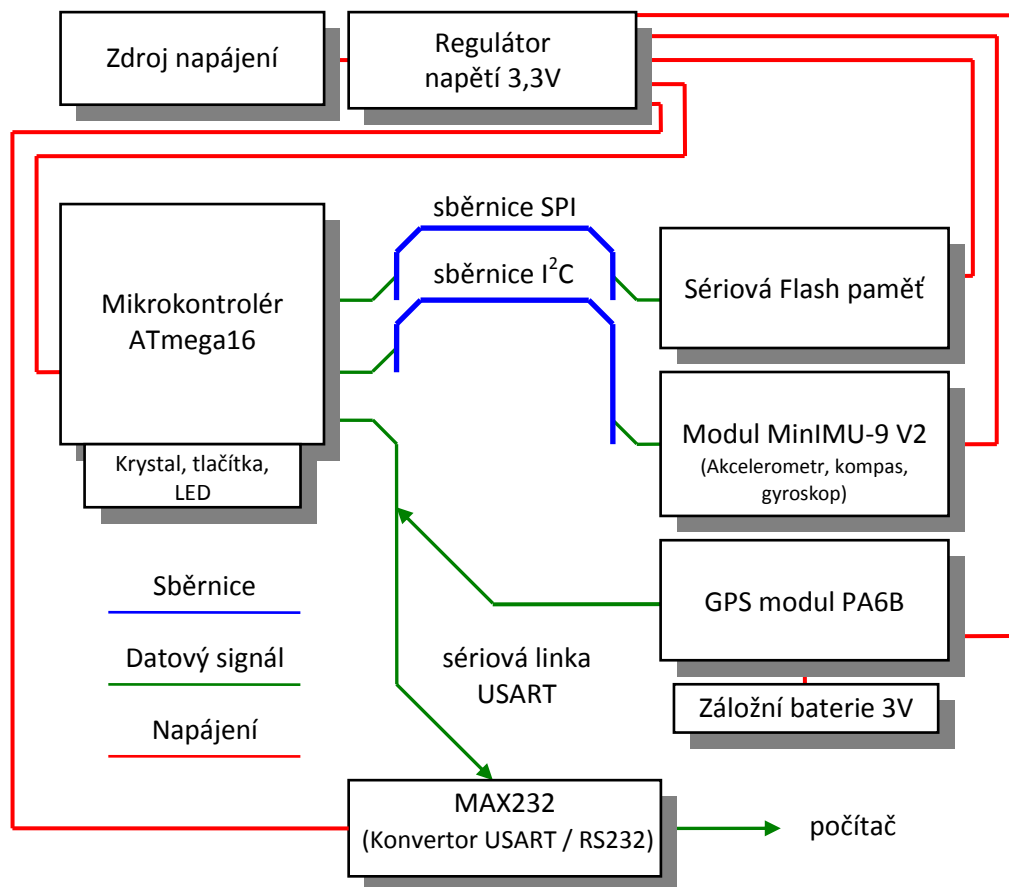
Mikrokontrolér zjišťuje stav navigačních vět přijímaných modulem GPS, který říká, jestli jsou, nebo nejsou k dispozici aktuální informace. Při stavu, kdy nejsou k dispozici potřebné informace, se do rámce ukládá pouze informace o času.

Na sběrnici I²C je zapojen modul minIMU-9 v2, který obsahuje akcelerátor, gyroskop a magnetometr. Akcelerátor, gyroskop a magnetometr mají svojí jedinečnou slave adresu přes kterou se k nim přistupuje. Modul měří vždy ve třech osách (x, y, z), tím vznikne rámec obsahující 9 hodnot. Každá hodnota je reprezentována 16 bity dvojkovým doplňkem, to po převodu znamená hodnota od -32768 do 32767. Jednotlivé hodnoty jsou čteny mikrokontrolérem v příslušných registrech, viz katalogové listy [26],[27]. Rámec je obohacen o speciální znaky a poslán na sběrnici SPI pro záznam na paměťové médium.

Informace naměřené senzory jsou vysílány do mikrokontroléru s frekvencí 5 Hz a GPS modul vysílá svoji polohu s frekvencí 1 Hz. Chronologický děj je takový, že nejprve získáme polohu z GPS modulu, kterou uložíme na paměťové médium a zbylý čas, než bude k dispozici další aktuální poloha, je vyplněn čtením hodnot z inerciální měřící jednotky. Získáme tak pět sad měření s devíti hodnotami (3 senzory s 3 osami) na jednu získanou polohu z GPS modulu.

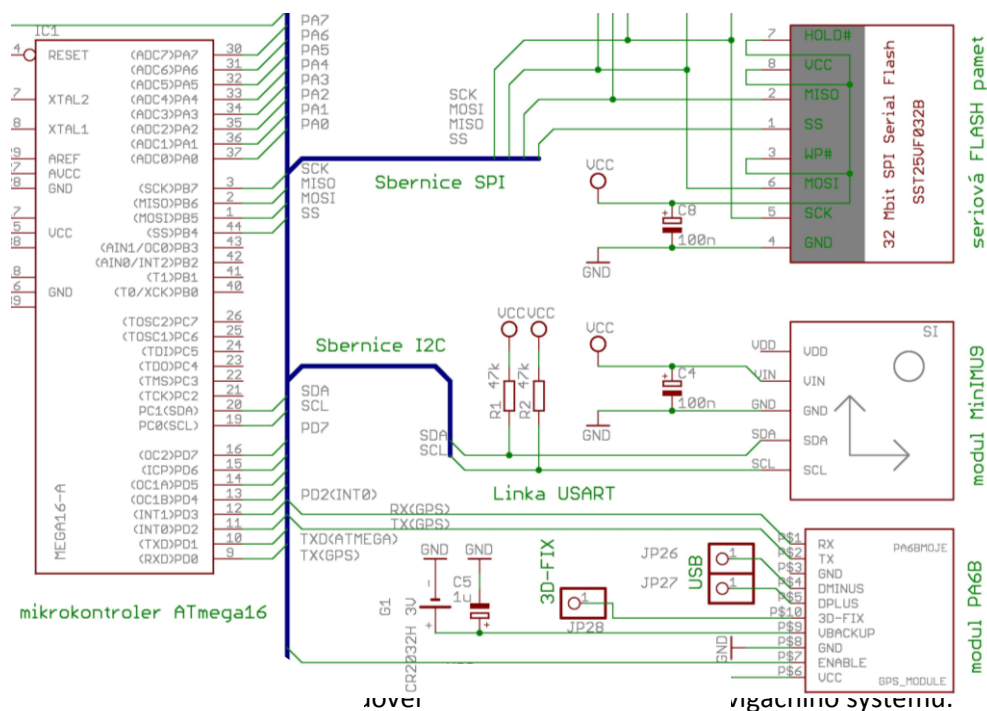
Po ukončení měření trasy systému, připojíme INS do počítače přes sériovou linku RS – 232, případně lze využít RS – 232 / USB konvertor, jestliže počítač sériovou linku nemá. Následně jsou přenesena data, uložená na paměťovém médiu, z inerciálního navigačního systému do počítače. Získáme tak zpětně data o poloze systému a můžeme je dále zpracovávat a zobrazit v mapě na internetu.

5.2 Obvodové zapojení



Obr. 5.2: Blokové schéma zapojení inerciálního navigačního systému.

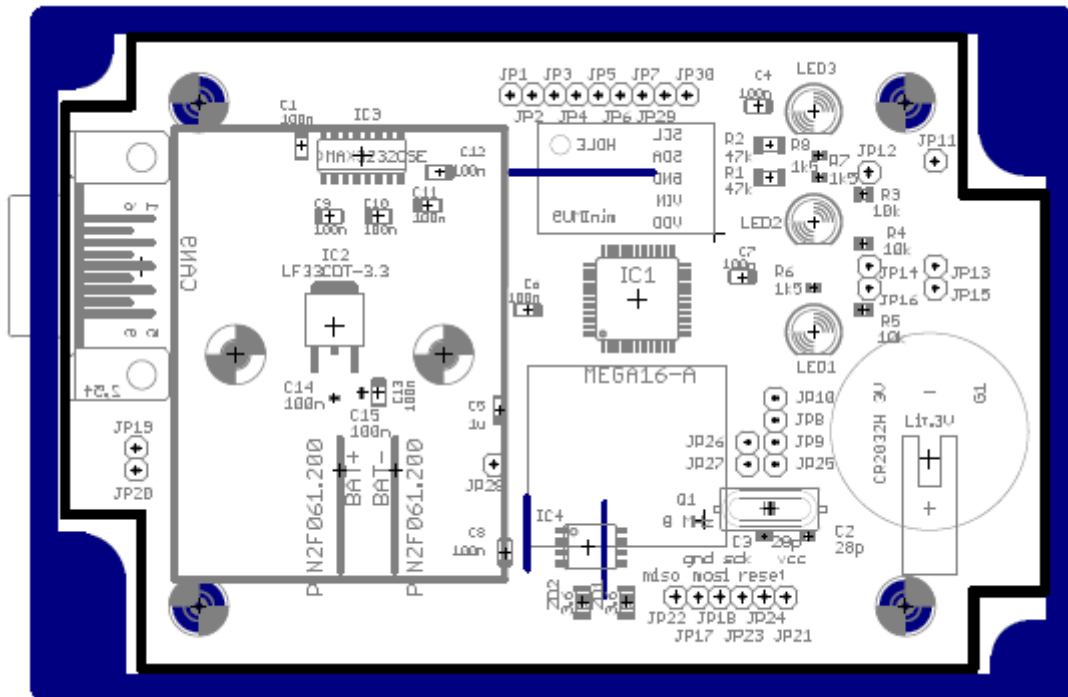
Na obrázku 4.8 je znázorněno obvodové schéma zapojení. Zdrojem napětí jsou tři tužkové baterie typu AAA o celkovém napětí 4,5 V. Lze například připojit i napájení z 5 V USB zdroje autoadaptéru připojený do cigaretového zapalování u automobilů. Za zdrojem následuje stabilizátor na 3,6 V a poté jsou napájeny, zde červenými čarami, všechny komponenty. Datové a signálové vodiče značí zelená barva a sběrnice je reprezentována barvou modrou. Obvodové zapojení je částečně zobrazeno na obrázku 4.9, kde se nachází zapojení GPS modulu, modulu miniIMU-9 v2 a sériové flash paměti k mikrokontroléru ATmega16L. Úplné obvodové schéma se nachází v příloze A.2.



5.3 Návrh plošného spoje

Spolu s návrhom DPS pro inerciální navigační systém byl zhotoven i programátor ISP (In - System Programming), který umožňuje programovat Atmel mikrokontroléry, a jim podobné, uvnitř elektronického obvodu.

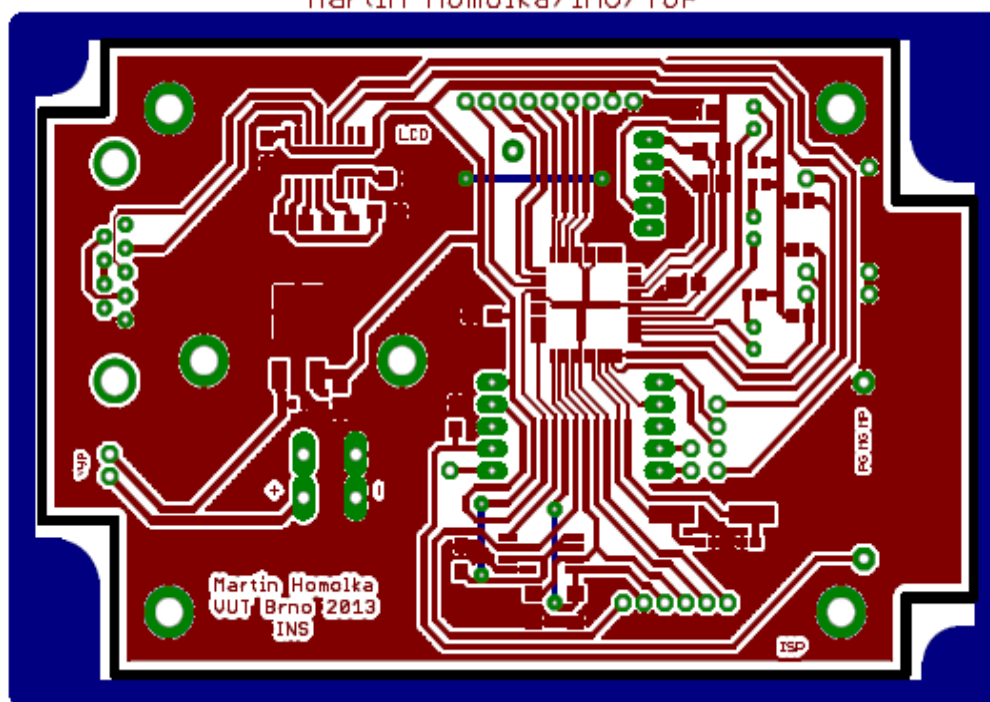
Návrh desky plošných spojů, dále jen DPS, byl realizován v programu EAGLE 6.1.0 ve studentské verzi. Jednotlivým obvodovým součástkám byla přidělena nebo vytvořena reálná pouzdra, která jsou uspořádána podle obrázku 5.4, který představuje osazovací výkres DPS. Většina součástek je typu SMD, kromě konektorů, LED diod, pouzdra na plochu baterii a modulů GPS a IMU. Při návrhu DPS byl kladen důraz na jednoduchost (jednostranná DPS bez prokovů), odolnost (blokovací kondenzátory), vhodné rozmístění konektorů, modulů a v neposlední řadě na malý rozměr a požadavky pro výrobu DPS na Ústavu radioelektroniky VUT (Vysoké Učení Technické).



Obr. 5.4: Osazovací výkres stana TOP, v měřítku 1:1 (27 x 80 x 120 mm)

Modré lemování v obrázku 5.4 zobrazuje rozměry krabičky a úložného prostoru v ní. Krabička má v každém rohu díru pro přichycení víka šroubky. Černá čára v obrázku představuje okraj DPS a vnitřní modré čáry reprezentují drátové propojky. Ve středu DPS se nachází mikrokontrolér ATmega16L. Ze strany BOTTOM se nachází nad mikrokontrolérem modul GPS a modul IMU, v dolní části je konektor pro komunikaci s LCD displejem. V pravé části je umístěna knoflíková baterie, externí krystal mikrokontroléru, konektor pro ISP programování a výstupy pro přepínání pomocí propojek. Vyšše jsou umístěny tři LED diody a tři výstupy pro tlačítka. V levé části od mikrokontroléru je namontovaný držák na 3 AAA tužkové baterie spolu s konektorem RS232, který je vyveden ven z krabičky. Pod držákem ze strany TOP se nachází stabilizátor napětí a integrovaný obvod MAX232. DPS je přichycena ke krabičce čtyřmi šroubky, v každém rohu krabičky.

Na obrázku 5.5 jsou vidět plošné spoje a plošky pro SMD součástky vyznačeny červenou barvou. Díry pro drátové součástky jsou vyznačeny zelenou barvou. Šířka plošného spoje je převážně zvolena 0,6 mm, od plošek integrovaných obvodů jsou plošné spoje vedené šířkou 0,4 mm a v krajním případě 0,3 mm. Napájecí plošné spoje jsou místy vedeny šířkou 0,8 mm. Zem (GND) je rozlita po celé DPS polygonem s izolací 0,6 mm. Výkres pro výrobu DPS v měřítku 1:1 se nachází v příloze A.1.



Obr. 5.5: DPS strana TOP, v měřítku 1:1 (27 x 80 x 120 mm)

Po vyleptání byla DPS osazena všemi součástkami a konektory kromě modulu GPS a IMU. Před přivedením napájení z laboratorního zdroje s proudovou ochranou, byly na desce zkontrolovány vodivosti cest a případné nežádoucí zkraty. Následně se zkontrolovaly napěťové úrovně v celé desce a nakonec se připojily zbývající moduly. V mikrokontroléru se přes ISP konektor nastavily pojistky ATmegy16L pro externí oscilátor a posléze do ATmegy16L nahrál program, který otestoval funkčnost všech bloků.

5.4 Programování

Tato kapitola je rozdělena na dvě části. První z nich je zaměřena na programování firmwaru mikrokontroléru a druhá část nás seznámí s exportem dat z inerciálního měřicího systému do programu Matlab a následným zpracováním. Pro programování mikrokontroléru bylo využito prostředí AVR Studia.

V prvním kroku byla k programování mikrokontroléru využívána vývojová deska AVR STK500 od firmy Atmel s mikrokontrolérem ATmega16L. Tato deska umožňuje připojení externích periférií k mikrokontroléru a obsahuje sadu LED a tlačítek. Přes AVR Studio lze komunikovat s STK500 a tím nastavovat softwarově napěťové úrovně, frekvenci oscilátoru a jiné parametry. Po připojení GPS modulu a LCD displeje k mikrokontroléru byl napsán program, který měl za úkol přijímat data z GPS modulu po sériové lince USART, následně je rozebrat na jednotlivé užitečné informace. Tyto informace vhodně poskládat a zobrazit na LCD v reálném čase.

Mezitím byla vyvinuta DPS, kapitola 5.3, a po osazení součástkami byl inerciální navigační systém soběstačný. Spolu s DPS byl vyroben ISP programátor BiProg [48], který nahradil vývojovou desku STK500. Programátor umožňuje využívat stejné programové prostředí jako u STK500.

V kroku druhém byla data z GPS modulu ve vhodném formátu posílána do počítače přes sériovou linku USART s tím, že INS obsahuje konvertor napěťových úrovní TTL / RS232. Následně pomocí externího převodníku RS232 / USB je INS připojen k USB počítače. Data jsou odchyťována a zobrazeny v reálném čase v programu Hyperterminál, který komunikuje s příslušným virtuálním COM portem (sériový port). Byly napsány funkce pro komunikaci se sériovou pamětí po SPI sběrnici a následně se mohla přijatá a rozříděná data z GPS modulu ukládat na paměť. Zpětně byla tato data posílána přes USART do počítače. Nakonec byla zprovozněna komunikace po sběrnici I₂C s gyroskopem, akcelerometrem a magnetometrem. Data z devíti os byla možno ukládat na paměť a zpětně zobrazovat.

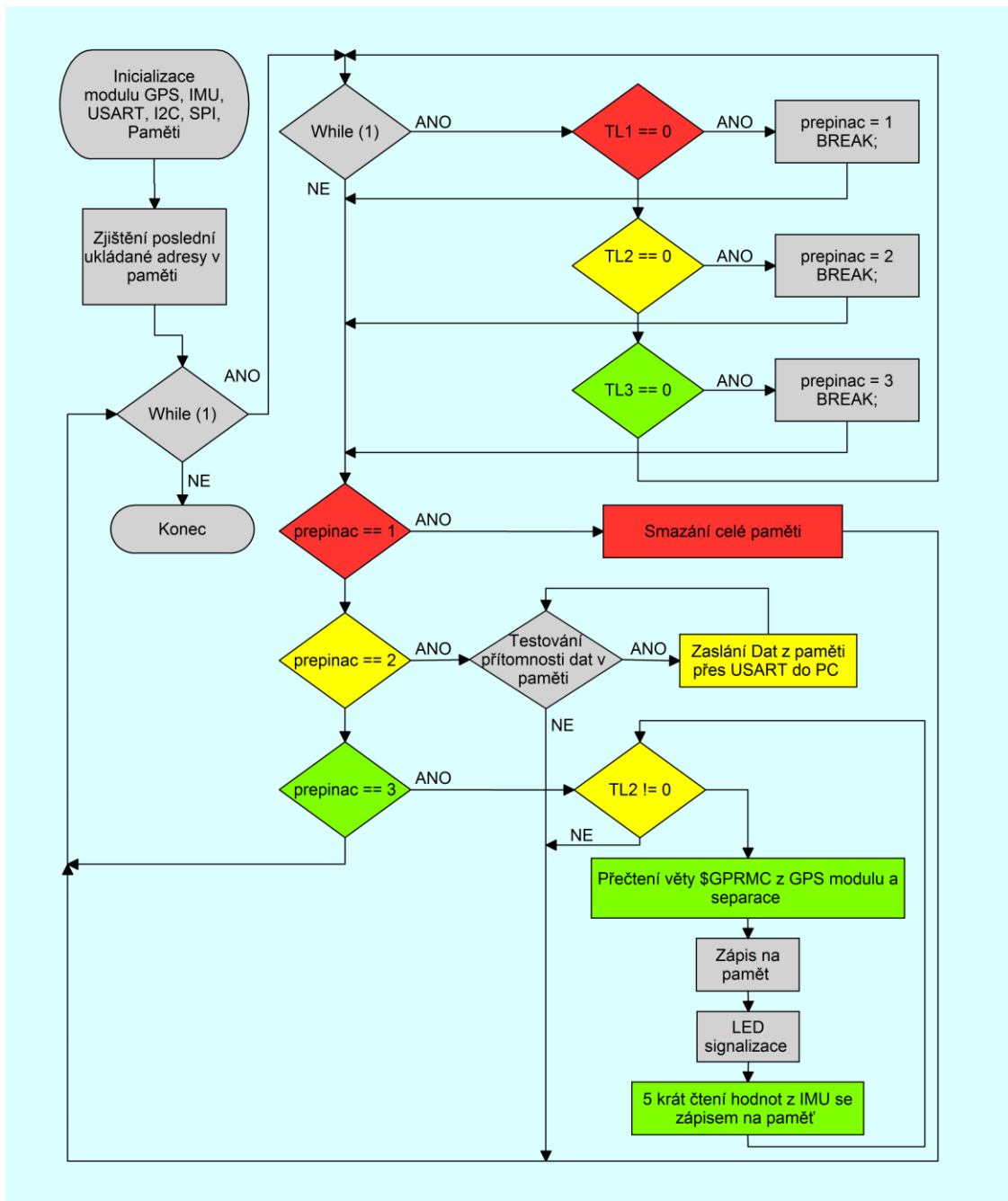
Ve finální verzi programu byly tyto jednotlivé bloky programu poskládány tak,

že v každé sekundě se zaznamenává poloha z GPS modulu a následně se čtou data z IMU. Mezi jednotlivé informace jsou vkládány speciální znaky z ASCII tabulky reprezentující tabulátory a na konec každého rámce je vložen speciální znak odřádkování. Tyto rámce se ukládají na paměť. Formáty rámců od modulů jsou uvedené v tabulce 4.5. Rámce s číslem 1 a 5 pocházejí od GPS modulu s tím, že první z nich je ukládán na paměť v případě, že je k dispozici poloha. V opačném případě se na paměť uloží rámeček číslo 5. Velikosti informací v rámci jsou různé, viz kapitola 2.9. Rámce 2 až 4 jsou v pořadí od gyroskopu, akcelerometru a magnetometru. Každý přenáší až 16 bitovou hodnotu z jednotlivých měřících os x, y, z.

Tab. 5.1: Tabulka přenášených rámců.

Číslo rámce	GPS:	Čas	Zeměpisná šířka	Polokoule	Zeměpisná délka	Polokoule	Kurz pohybu
1.							
2.	G	x	y	z			
3.	A	x	y	z			
4.	M	x	y	z			
5.	GPS:	Čas					

5.4.1 Blokové schéma programu pro ATmega16L



Obr. 5.6: Blokové schéma programu mikrokontroléru

Po zapnutí inerciálního navigačního systému dojde k jeho inicializaci. Zde se nastavují jednotlivé porty a jejich piny (vstupní pro tlačítka, jinak výstupní), přepne se GPS modul do provozního stavu a dále se inicializuje IMU, kde se nastavují rozsahy senzorů, obnovovací frekvence a povolení jednotlivých měřících os. Následuje inicializace jednotlivých sběrnic, nastavení jejich přenosových rychlostí, pracovního módu a formátu přenosu. V posledním kroku se inicializuje paměť a zjistí se adresa

posledního uloženého bajtu, aby byla známá adresa, od které je možno zapisovat data.

Následují dva nekonečné cykly za sebou. První je cyklem programu a v druhém nekonečném cyklu jsou testována tlačítka na stisk. Po stisku tlačítka je příslušná hodnota tlačítka uložena do přepínače a následně dojde k vyskočení z nekonečného cyklu. Na řadu přichází switch (přepínač), který podle hodnoty přepínače vykoná danou posloupnost úkonů.

Jednotlivá tlačítka jsou reprezentována v blokovém schématu příslušnou barvou, obrázek 5.6. Tlačítko TL1 červené barvy má za úkol vymazání celé sériové Flash paměti, doprovázené signalizací červenou LED. Po vymazání paměti se program vrátí do cyklu s volbou tlačítka. Druhé tlačítko TL2 s barvou žlutou slouží k zaslání všech dat z paměti do PC přes sériovou linku doprovázené signalizací žluté LED. Program se navrací do cyklu volby tlačítkem. Poslední tlačítko TL3 se zelenou barvou spouští záznam polohy a dat. Nejprve se zkoumají data, která neustále proudí z GPS modulu. Jednotlivé typy vět přichází s periodou 1 sekunda. Po přijetí NMEA věty \$GPRMC je věta roztržena na užitečné informace a ty jsou uloženy na paměť. V případě, že GPS modul nemá signál, uloží se na paměť pouze čas. Ve zbývajícím čase jsou čteny hodnoty všechny z IMU a uloženy na paměť a to celkem pětkrát. Následuje získání a zapsání polohy z GPS modulu, a vše se opakuje dokud nestiskneme tlačítko TL2. Pro signalizaci stavů se využívají všechny tři LED. Při záznamu z GPS modulu na paměť bliká zelená LED. Po stisknutí tlačítka pro záznamu dat se rozsvítí červená LED a svítí, dokud není uložena alespoň jedna platná poloha z GPS modulu. Poslední žlutá LED svítí kdykoli není k dispozici platná poloha z GPS modulu. Program se navrací do cyklu volby tlačítkem.

6 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

Za účelem získání dat pro zpracování byla absolvována projížďka Brnem v automobilu, přičemž INS byla podložena a umístěna na palubní desku v ose automobilu. Měření probíhalo za běžného provozu a trvalo přibližně sedm minut.

Po připojení zařízení INS k počítači s využitím převodníku RS232 / USB a stisknutím příslušného tlačítka, jsou přeneseny sériově všechna data uložená v paměti INS do počítače. Data jsou reprezentována znaky z ASCII tabulky a v počítači jsou zachytávány do textového souboru přes program Hyperterminál. V tomto programu se před spuštěním přenosu dat nastavuje číslo virtuálního COM portu, ke kterému je převodník připojen, symbolová rychlost 4800 Bd / s, přenos 8 datových bitů bez parity a jeden stop bit. Zvolí se zachytávání textu do textového souboru. Nyní lze realizovat přenos dat, jehož doba je závislá na velikosti objemu dat.

	A	B	C	D	E	F	G	H	K	L	M
1	Pro GPS:	Čas	Zeměpisná šířka	Polokoule	Zeměpisná délka	Polokoule	Rychlost	Kurz	Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka	Čas (upraveno)
2	Pro IMU:	x	y	z					[°]	[°]	SELC
3	GPS:	155653	4912.9793	N	1636.3029	E	0	162.74	49.21632167	16.80504833	17:56:53
4	G:	11	33	8							
5	A:	-64	-64	7808							
6	M:	-13	128	-161							
7	G:	-2	28	-10							
8	A:	-256	320	8064							
9	M:	-13	128	-148							
10	G:	3	-3	-19							
11	A:	0	-64	7872							
12	M:	-13	127	-148							
13	G:	12	14	-20							
14	A:	-384	128	7936							
15	M:	-13	128	-150							
16	G:	-4	-11	-255							
17	A:	64	64	7872							
18	M:	-14	125	-150							
19	GPS:	155654	4912.9793	N	1636.3029	E	0	162.74	49.21632167	16.80504833	17:56:54
20	G:	-22	-12	-4							
21	A:	-448	256	8192							
22	M:	-14	125	-149							
23	G:	-10	26	-2							
24	A:	128	-64	7744							
25	M:	-13	123	-149							
26	G:	9	48	-2							
27	A:	-64	256	8128							
28	M:	-13	125	-148							
29	G:	17	26	-8							
30	A:	-192	384	8256							
31	M:	-10	124	-147							
32	G:	-1	-12	-9							
33	A:	0	0	7872							
34	M:	-14	124	-148							
35	GPS:	155655	4912.9793	N	1636.3029	E	0	162.74	49.21632167	16.80504833	17:56:55
36	G:	0	40	-4							
37	A:	64	64	7808							

Obr. 6.1: Importované data v programu Microsoft office Excel

Pro roztřídění informací z textového souboru byl vytvořen soubor v Microsoft Office Excel, do kterého se data importují. Po otevření souboru je automatická výzva k aktualizaci importovaných dat, kde se zvolí příslušný textový soubor. Po importu jsou v souboru převedeny zeměpisné šířky a délky na stupně a čas z GPS modulu na středoevropský letní čas obrázek číslo 6.1. Jeden listu v Excelu obsahuje 65536 řádků, to znamená přibližně 68 minut záznamu dat na list.

6.1 Zpracování dat v Matlabu

V následujících řádcích je vypsán hlavní funkce zdrojového kódu z Matlabu:

```
function [] = IMU_Matlab ()
%%Hlavní program
%%Volani vseh funkcí
%%Zadne vstupy vypupy

[data] = INS_data_import; % nacteni dat z excelu
[GPS,IMU] = Zpracovani_data (data); % separace dat z GPS a IMU

[matg] = Vykresleni_GPS_m (GPS); % vykresleni GPS v grafu
[azimut_smeru] = Vykresleni_M (IMU); % vykresleni mag. v grafu

[draha_vect,data_akcel] = Vykresleni_A_m (IMU); % vykresleni a a v v grafu
% Vykresleni_trasy_am (draha_vect,azimut_smeru); % zkouska
[zemepisna_sirka_export] = Vykresleni_trasy_gam...
(GPS,matg,azimut_smeru,data_akcel); % rekonstrukce

end
```

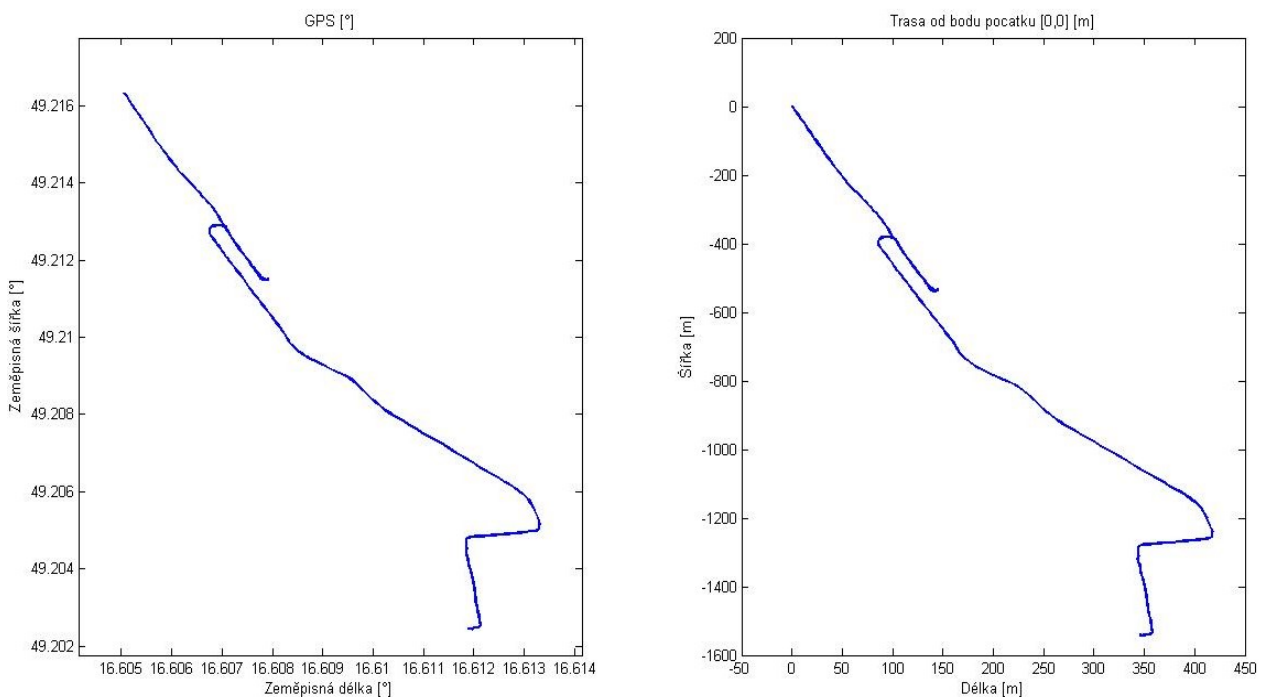
Postupně za sebou jsou spouštěny vnitřní funkce, které vracejí hodnoty proměnných v hranatých závorkách [] a jejich vstupní parametry jsou v kulatých

závorkách ().

V první řadě jsou importována data z Excelu. Matlab sice umožňuje snadný přístup k jednotlivým buňkám, ale pro rychlejší zpracování se importují všechny data. Pro tento účel slouží funkce „Zpracování_dat_data“, její výstup jsou všechny data z Excelu.

Následuje funkce „Zpracování_data“ se vstupním parametrem z předchozí funkce. Výstupem této funkce jsou dvě proměnné. První z nich „GPS“ obsahuje všechny hodnoty týkající se GPS modulu. Druhá proměnná pak obsahuje data z IMU modulu.

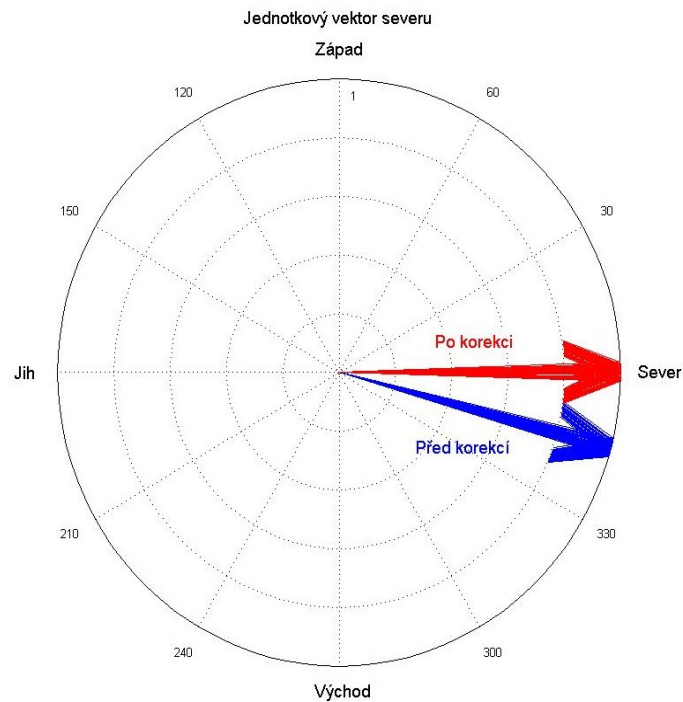
Již z názvu další funkce „Vykreslení_GPS_m“ je zřejmý její účel. Vstupní parametrem jsou hodnoty z GPS modulu. Funkce vynesou dva grafy s GPS souřadnicemi, obrázek 6.3, které jsou téměř totožné, liší se pouze v měřítkách os. První graf vlevo má osy ve stupních a druhý graf má osy v metrech s tím, že počáteční bod je v bodě [0,0]. Pro určení konstant pro převod zeměpisné šířky a délky na metry byla využita přesná kalkulačka pro výpočet vzdálenosti mezi dvěma GPS souřadnicemi [49]. Chybu dané metodu lze pro lokální měření považovat za nevýznamnou. Výstupem je proměnná obsahující pouze GPS souřadnice.



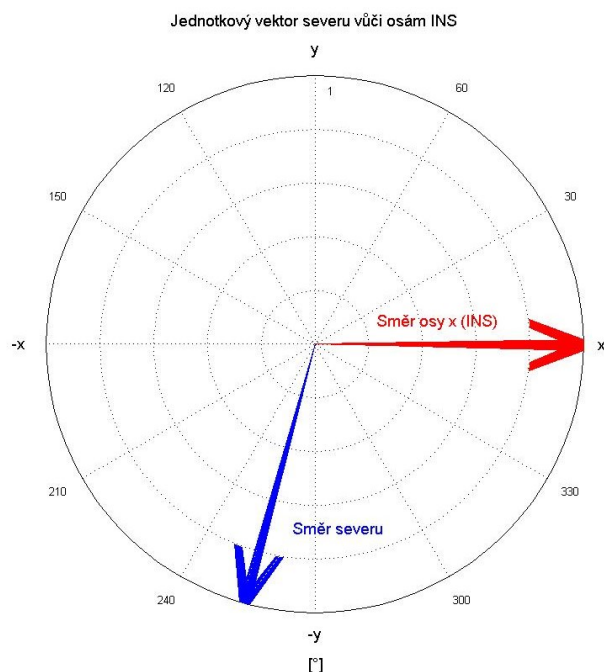
Obr. 6.2: Změřená trasa v zeměpisných a absolutních souřadnicích

Funkce s názvem „Vykreslení_M“, její vstupní parametry jsou hodnoty z IMU, zpracovává data z magnetometru a vykresluje změřené azimuty a směr pohybu INS. V prvním kroku se tyto data převedou na jednotkové vektory v polárních souřadnicích. Tyto vektory směřují k severnímu pólu. Pomocí buzoly byly změřeny pro jednotlivé osy INS vektory severu. Následná zavedená korekce vektoru severu posunula tyto vektory do příslušné osy, obrázek číslo 6.4. V grafu na obrázku číslo 6.5 je vynesena vektor

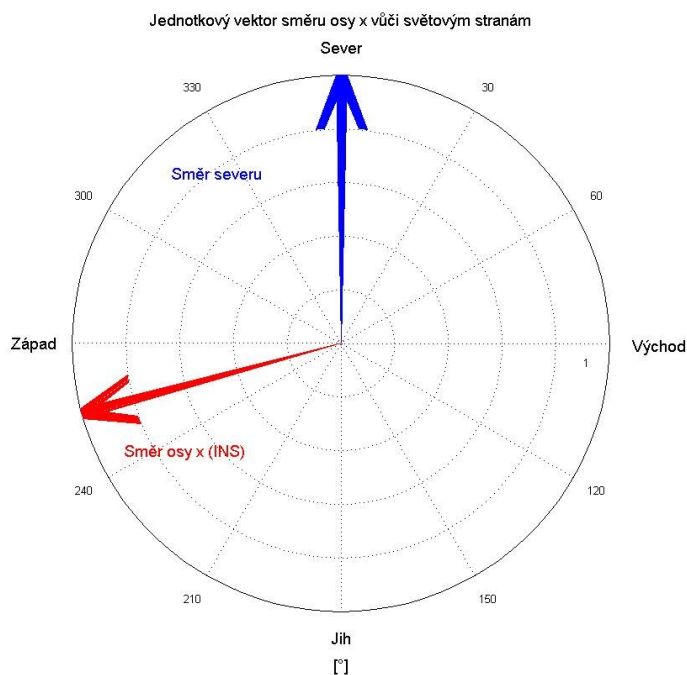
severu (modrou barvou) v souřadnicových osách INS vektor směru pohybu v ose x (červenou barvou). Z tohoto grafu lze vypočítat azimut, tedy úhle mezi vektorem severu a vektorem směru pohybu v ose x. Třetí graf s číslem 6.6 ukazuje transformaci jednotkových vektorů do absolutních zeměpisných souřadnic s počátkem [0,0]. Vektor severu (modrá barva) je tedy v tomto grafu vždy směrem vzhůru a vektor ve směru x INS se mění v závislosti na směru pohybu INS. Mimo kreslení grafů je výstup této funkce proměnná s hodnotami vektorů směru pohybu.



Obr. 6.3: Graf jednotkového vektoru severu a jeho korekce



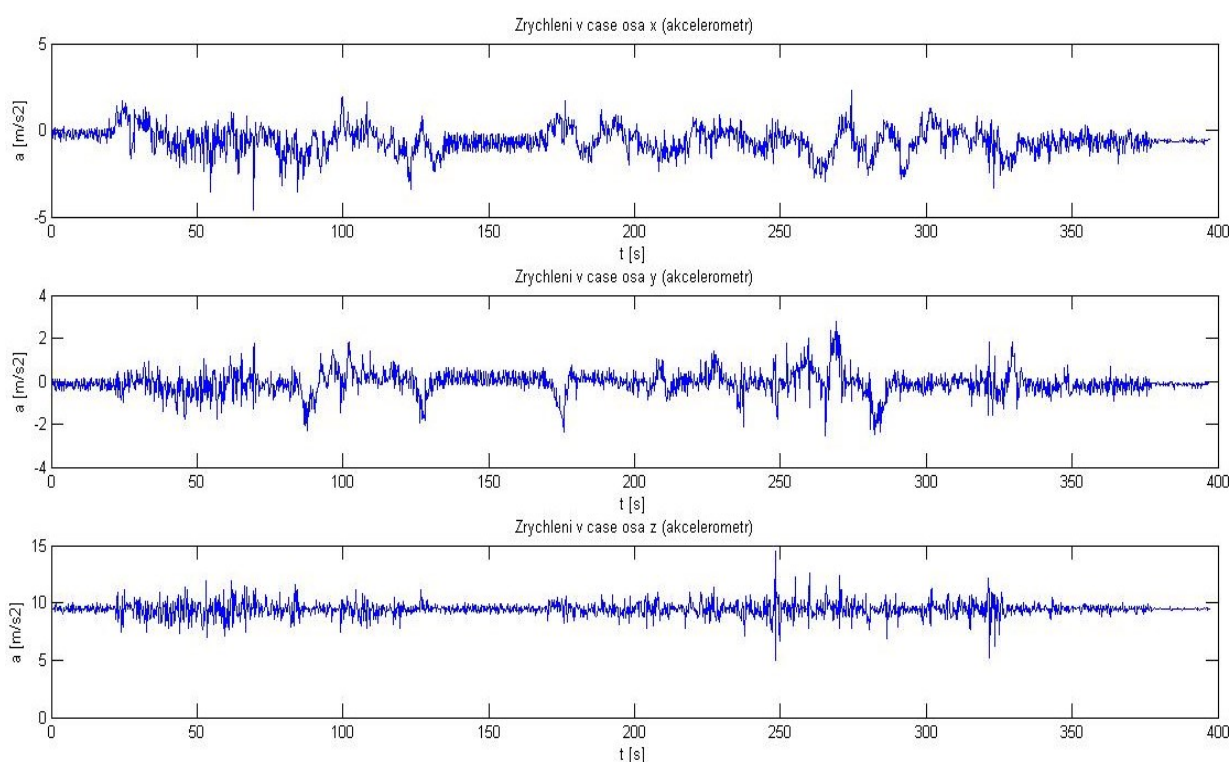
Obr. 6.4: Graf jednotkového vektoru severu v souřadnicích INS



Obr. 6.5: Graf jednotkového vektoru směru pohybu vůči světovým stranám

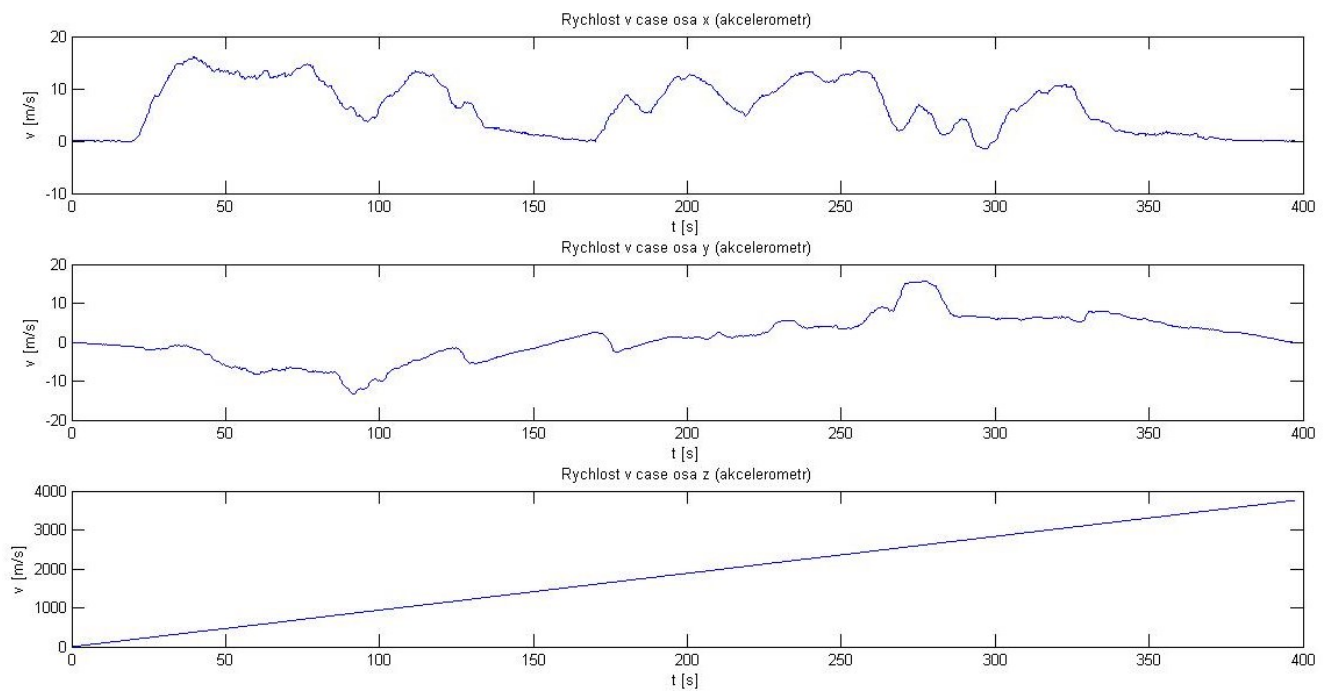
Následující funkce „Vykresleni_A_m“ pracuje s daty naměřené IMU. Hodnoty z digitálních převodníků jsou převedeny na jednotky zrychlení a $[m / s^2]$. V následujícím obrázku číslo 6.7 jsou zobrazeny tři grafy zrychlení v závislosti na čase pro osu x, y a z.

Pro výpočet rychlosti integrací byl odhadnut čas na 1/6 sekundy. Násobením zrychlení a času jsme získaly hodnoty rychlosti v [m/s] zobrazené v grafu číslo 6.8 a po následujícím násobení rychlosti a času pak hodnoty uražené dráhy s [m]. V algoritmu je zahrnuta podmínka, kde se každý pátý vzorek integruje s dvojnásobným časem kvůli tomu, že nezapočítáváme vektory z GPS modulů. Osy x a y bylo nutné zkorigovat, z důvodu nerovnoběžných os INS s měřicími osami akcelerometru. Tato nerovnoběžnost způsobuje vnášení driftu, tedy chyby, která se přenáší na následující vektory při jejich sčítání. Kompenzace byla za předpokladu, že na začátku a na konci měření je INS v rovnovážné poloze a nepohybuje se. Tím se určila směrnice přímky od začátku do konce pohybu, a následně se ke vzorkům přičetla její hodnota v závislosti na čase.



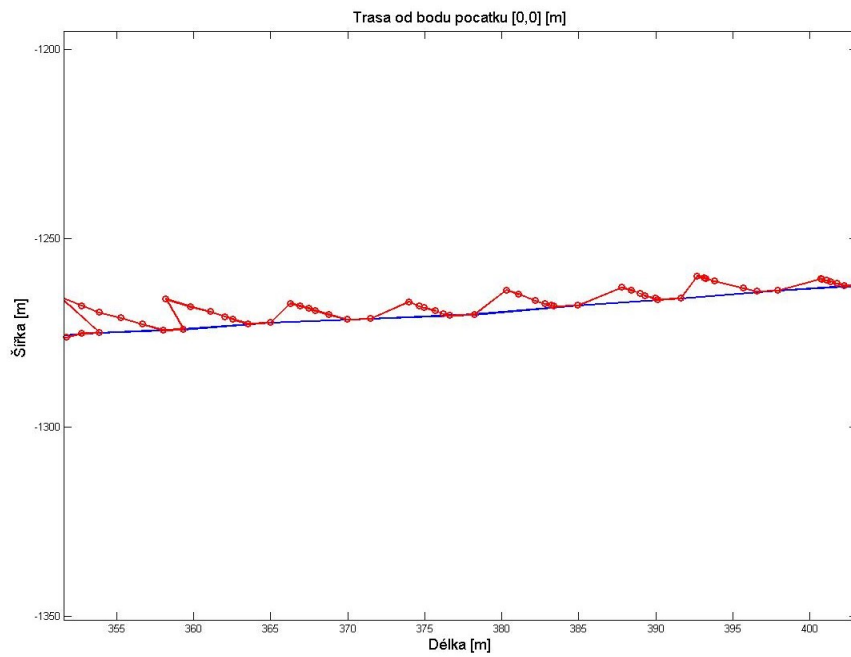
Obr. 6.6: Grafy zrychlení v čase pro jednotlivé osy

Při rozboru grafů zrychlení, obrázek 6.7, je vidět, v čase blízkém nule, chvění zapnutého motoru, zatímco na konci měření, kdy se motor auta vypnul, je průběh zahlcen šumem méně. Velikost průměrně hodnota na ose z, která představuje směr k zemi, je roven 1 g, tedy $9,81 \text{ m / s}^2$. Tato osa reaguje na výmoly na silnici, odpružení auta a při každém náklonu INS. Osa x představuje zrychlení ve směru pohybu a osa y pak zobrazuje zrychlení v zatáčkách. V grafech na obrázku 6.8 je zaznamenaná rychlost v čase pro jednotlivé osy. Pro osu z je průběh akumulující z důsledku neustálým působením tíhového zrychlení. Při měření se pohyb vozidla zastavilo na křižovatce v čase okolo 150 sekund od počátku. Tento děj je promítnut v ose x a zobrazuje nedokonalosti kompenzace náklonu. Výstupní data této funkce jsou vektory rychlostí a vektory dráhy.



Obr. 6.7: Grafy rychlosti v čase pro jednotlivé osy

Poslední volaná funkce s názvem „Vykresleni_trasy_gam“ vykreslí do společného grafu hodnoty GPS modulu spolu s hodnotami z IMU. Z GPS dat obsahující aktuální rychlost a směr pohybu jsou vytvořeny vektory dráhy ze součinu velikosti rychlosti a času, který byl stanoven na 1/6 sekundy. Referenční první bod určuje GPS modul. Za ním následuje příslušný vektor dráhy se směrem kurzu určený GPS modulem. Za tímto vektorem následuje pět vektorů dráhy vypočítané z IMU, a to součinem velikosti vektoru dráhy s osou x a y vektoru kurzu. V tomto se všechny vzorky naměřené z IMU integrují se stejným časem 1/6 sekundy. Na obrázku číslo 6.9 je vykreslen červenou křivkou sčítání vektorů mezi GPS body, které jsou spojovány modrou křivkou. Výstupní data s názvem „zemepisna_sirka_export“ a „zemepisna_delka_export“ jsou připravená k importu do webové aplikace [49], která jednotlivé body vykreslí v mapě na internetu, viz obrázek číslo 6.10.



Obr. 6.8: Graf rekonstrukce trasy v Matlabu



Obr. 6.9: Vykreslení trasy v mapovém podkladu na internetu

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout inerciální navigační systém. Práce popisuje výběr vhodných komponentů, při kterém zohledňuje jednotlivé parametry součástí. Po doplnění o řídicí jednotku se zabývá návrhem obvodového zapojení, při kterém zkoumá komunikace mezi řídicí jednotkou, modulem GPS, inerciální měřicí jednotkou, pamětí a počítačem. To vede k vyústění do fáze návrhu desky plošných spojů. Systém se po osazení součástkami přesunul do samostatné krabičky a do řídicí jednotky byl nahrán řídicí firmware. V této části byly provedeny zkušební měření pro získání dat ke zpracování v počítači v programu Matlab.

V Matlabu byly naměřené data vykreslovány v grafech a následně zkoumány. Rekonstrukce měřených tras probíhaly ve 2D, což mělo za následek nekomplexního pohledu na věc. Zjistilo se, že takto řešený INS systém je velmi náchylný na jakékoli rušivé elementy, například na vibrování palubní desky automobilu vlivem nastartovaného motoru či projetí výmolu na vozovce. Nelze docílit aby byly osy INS rovnoběžné se zemí a tím se do měření vnáší chyba, která se akumuluje s časem. I při použití jednoduchých korekcí je tento INS do značné části závislý na GPS signálu. Pro komplexní řešení zpřesnění INS se využívá například Kalmanův filtr, který predikuje průběh trasy z minulých a současných vzorků hodnot, jeho složitost je ale značná.

Výstupem je tedy inerciální navigační systém, který je schopen zaznamenávat na paměťové médium svoji polohu získanou z GPS modulu spolu s dalšími informacemi jako je čas, rychlost a směr pohybu, dále umožňuje zaznamenávat změřená data ze senzoru akcelerometru, gyroskopu a magnetometru, i když nelze přijímat GPS signál. Po připojení INS do počítače přes sériovou linku jsou data importována do programu Matlab, pro který byl napsán skript pro zpracování dat. Výstup z Matlabu lze přes webovou aplikaci zobrazit do mapy na internetu.

LITERATURA

- [1] J. WOODMAN, Oliver. *Technical Report: An introduction to inertial navigation* [online]. 2007. vyd. 2007 [cit. 2012-12-05]. Dostupné z: <http://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-696.pdf>
- [2] Inertial navigation system. In: *Wikipedia: The free encyclopedia* [online]. 7.12.2012 [cit. 2012-12-12]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Inertial_navigation_system
- [3] ŠEBESTA, Jiří. *Globální navigační systémy*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2012, 132 s. ISBN 978-80-214-4500-0.
- [4] Let Korean Air 007. In: *Wikipedia: Otevřená encyklopedie* [online]. 7.12.2012 [cit. 2012-12-12]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Let_Korean_Air_007
- [5] GPS. In: *Navipedia* [online]. 23.2.2012 [cit. 2012-12-12]. Dostupné z: <http://navipedia.net/index.php/GPS>
- [6] For Immediate Release: Statement by the president regarding the united states' decision to stop degrading global positioning system accuracy. OFFICE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY POLICY. *Clinton3* [online]. Washington, DC, 1.5.2000 [cit. 2012-12-12]. Dostupné z: http://clinton3.nara.gov/WH/EOP/OSTP/html/0053_2.html
- [7] NATIONAL COORDINATION OFFICE FOR SPACE-BASED POSITIONING, Navigation, and Timing. *Gps: Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics* [online]. 2006, 14.11.2012 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: <http://www.gps.gov/>
- [8] GENERAL INFORMATION ON GPS. U.S. COAST GUARD NAVIGATION CENTER. *NAVIGATION CENTER* [online]. 2001, 21.3.2012 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: <http://www.navcen.uscg.gov/?pageName=GPSmain>
- [9] Geocaching. *Geocaching* [online]. 2000, 2012 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: <http://www.geocaching.com/>
- [10] Geoid: The concept of the geoid. D. GARLAND, George. *Britannica: encyklopedia* [online]. 2006, 2012 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/229667/geoid/9322/The-concept-of-the-geoid>
- [11] CineSat Projections. CINESAT. *Cinesat: cinesat nowcast* [online]. 1988, 2011 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: <http://www.cinesat.com/csprj.htm#CylindricalEquiDistant>
- [12] Space in images: THE EARTH'S GRAVITY FIELD (GEOID) AS IT WILL BE SEEN BY GOCE. ESA. *Esa: spaceinimages* [online]. 26.10.2004 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: http://spaceinimages.esa.int/Images/2004/10/The_Earth_s_gravity_field_geoid_a_s_it_will_be_seen_by_GOCE

- [13] Referenční plochy a souřadnicové soustavy. In: *Geografie* [online]. 2006 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: <http://www.geografie.webzdarma.cz/rpass.htm>
- [14] OEM produkce. In: *Wikipedia* [online]. 2008, 30.11.2012 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/OEM_produkce
- [15] Co to je GPS? Historie a úvod do problematiky. In: *Ce4you* [online]. 2005, 2012 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: <http://www.ce4you.cz/articles/detail.asp?p=0&a=244&pc=>
- [16] KVAPIL, Jiří. Kosmický segment GPS a jeho budoucnost. In: *Aldebaran: bulletin* [online]. 2/2005, 2012 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2005_02_gps.php
- [17] BETKE, Klaus. The NMEA 0183 Protocol. In: *Tronico* [online]. 2000, 2001 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: <http://www.tronico.fi/OH6NT/docs/NMEA0183.pdf>
- [18] SIRF TECHNOLOGY, Inc. *NMEA Reference Manual*. CA, 2007. Dostupné z: <http://www.sparkfun.com/datasheets/GPS/NMEA%20Reference%20Manual-Rev2.1-Dec07.pdf>
- [19] DIMENSION ENGINEERING. *A beginner's guide to accelerometers*. Akron, 2007. Dostupné z: <http://www.dimensionengineering.com/info/accelerometers>
- [20] ROZSÍVAL, Pavel. Akcelerometry. *Pavelrozsival: vyuka* [online]. 2011 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: <http://vyuka.pavelrozsival.cz/isame/Akcelerometry.pdf>
- [21] ZEHNULA, Karel. *Snímače neelektrických veličin: snímače I*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1977, 398 s. <http://www.datasheetarchive.com/UP501R-datasheet.html>
- [22] <http://www.adafruit.com/datasheets/PA6B-Datasheet-A07.pdf>
- [23] <http://www.datasheetarchive.com/GSC3f/LR9552-datasheet.html>
- [24] POLOLU CORPORATION. *MinIMU-9 v2 Gyro, Accelerometer, and Compass (L3GD20 and LSM303DLHC Carrier)*. Las Vegas, 2012. Dostupné z: <http://www.pololu.com/catalog/product/1268>
- [25] http://www.pololu.com/file/download/L3GD20.pdf?file_id=0J563
- [26] http://www.pololu.com/file/download/LSM303DLHC.pdf?file_id=0J564
- [27] NXP SEMICONDUCTORS. *UM10204: I2C-bus specification and user manual*. 1982. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf
- [28] FRÝZA, Tomáš, Zbyněk FEDRA a Jiří ŠEBESTA. Mikroprocesorová technika: laboratorní cvičení. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2008, 50 s. ISBN 978-80-214-3756-2.
- [29] Serial Peripheral Interface. In: *Wikipedia* [online]. 2007, 21.10.2012 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface

- [30] Externí sériové sběrnice SPI a I²C. In: TIŠNOVSKÝ, Pavel. *Root.cz* [online]. 2008 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: <http://www.root.cz/clanky/externi-seriove-sbernice-spi-a-i2c/>
- [31] DUDÁČEK, K. Sériová rozhraní SPI, Microwire, I2C a CAN. In: *Domovské stránky uživatelů: Západočeské univerzity* [online]. 2002 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~dudacek/NMS/Seriova_rozhrani.pdf
- [32] CBURNETT. SPI single. In: *Wikipedia* [online]. 2006, 2007 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Soubor:SPI_single_slave.svg&page=1
- [33] OLMR, Vít. HW SERVER S.R.O. *HW server představuje - Sériová linka RS-232*. 2005. Dostupné z: http://www.hw.cz/rozhrani/hw-server-predstavuje-seriova-linka-rs-232.html#null_modem
- [34] RS-232. In: *Wikipedia* [online]. 2008 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/RS-232>
- [35] Baud. In: *Wikipedia* [online]. 2007 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Baud>
- [36] SANDISK CORPORATION. *SanDisk SD Card: Product Manual*. 2.2. Sunnyvale, 2004. Dostupné z: <http://www.flashgenie.net/img/productmanualsdcav2.2final.pdf>
- [37] Řešení pro zápis na paměťové karty (SD), MCU Atmega16, Ladislav Havel [online]. 2009 [15.9.2009]. Dostupný z WWW: <<http://hw.cz/teorieapraxe/navrh-vyvojare/art3147-reseni-pro-zapisna-pametove-karty-sd-mcu-atmega16.html>>
- [38] Technical issues and other things: USART. *Techsite* [online]. 1999 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: http://www.techsite.ic.cz/?page_id=86
- [39] Tomas Fryza home page. FRÝZA, Tomáš. *Vutbr* [online]. 2012 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~fryza/>
- [40] HUSÁK, Miroslav. Užití MEMS v průmyslu. *FCC PUBLIC* [online]. 2008, roč. 2008, č. 12, s. 5 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38277.pdf>
- [41] <http://www.atmel.com/images/doc8154.pdf>
- [42] VOJÁČEK, Antonín. Integrované MEMS GYROSKOPY. In: *Automatizace.hw.cz* [online]. 2009 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/integrované-mems-gyroskopy>
- [43] JANOŠEK, Michal. *Magnetometr s miniaturními senzory fluxgate*. Praha, 2007. Diplomová práce. ČVUT.
- [44] STK500 User Guide. ATMEL CORPORATION. *AVR STK500 User Guide* [online]. 2003 [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/Images/doc1925.pdf>
- [45] Wikipedia. In: *ASCII* [online]. 2009, 2013 [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/ASCII>

- [46] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/25071A.pdf>
- [47] CHADIMA, Martin. *Magnetismus Země* [online]. 2010 [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: <http://www.sci.muni.cz/~chadima/geomagnetismus/Geomagnetismus1.pdf>
- [48] BiProg. *AVR ISP programátor BiProg* [online]. 2013 [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_documents/dilna/BiProg/biprog_urel.pdf
- [49] Gpsvisualizer: GPS Visualizer: Do-It-Yourself Mapping. *Gpsvisualizer* [online]. 2002 [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: <http://www.gpsvisualizer.com/>

SEZNAM ZKRATEK

ASCII	American Standard Code for Information Interchange	Tabulka definující znaky pomocí bitů
C/A	Coarse Acquisition	Civilní signál
CR	Carriage Return	návrat na začátek věty
CSUM	Cumulative Sum	XOR dat v NMEA větě
DGPS	Differential GPS	Systém se sítí diferenčních stanic
DOD	Department of Defence	Americké ministerstvo obrany
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory	Snadno přepsatelná paměť
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service	Evropský aungmentační systém
GAGAN	GPS Aided GEO Augmented Navigation	Indický aungmentační systém
GEO	Geostationary Earth Orbit	Geostacionární oběžná dráha
GLONAS	Globalnaja Navigacionnaja Sputnikovaja Sistěma	Ruský globální navigační systém
GNSS	Global Navigation Satellite System	Globální satelitně navigační systém
GPS - NAVSTAR	Global Positioning System	Americký globální poziční systém
HDOP	Horizontal Dilution Of Precision	Horizontální činitel zhoršení přesnosti
I ² C	Inter-Integrated Circuit	Sběrnice
I/O	In / Out	Vstupní / výstupní
IMU	Inertial Measurement Unit	Inerciální měřicí jednotka
LF	Line Feed	Odřádkování
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems	mikro elektromechanický systémy
MEO	Medium Earth Orbit	Střední kruhová dráha
MSAS	Multi-functional transport Satellite-based Augmentation System	Japonský aungmentační systém
NMEA	National Marine Electronics	Navigační protokol

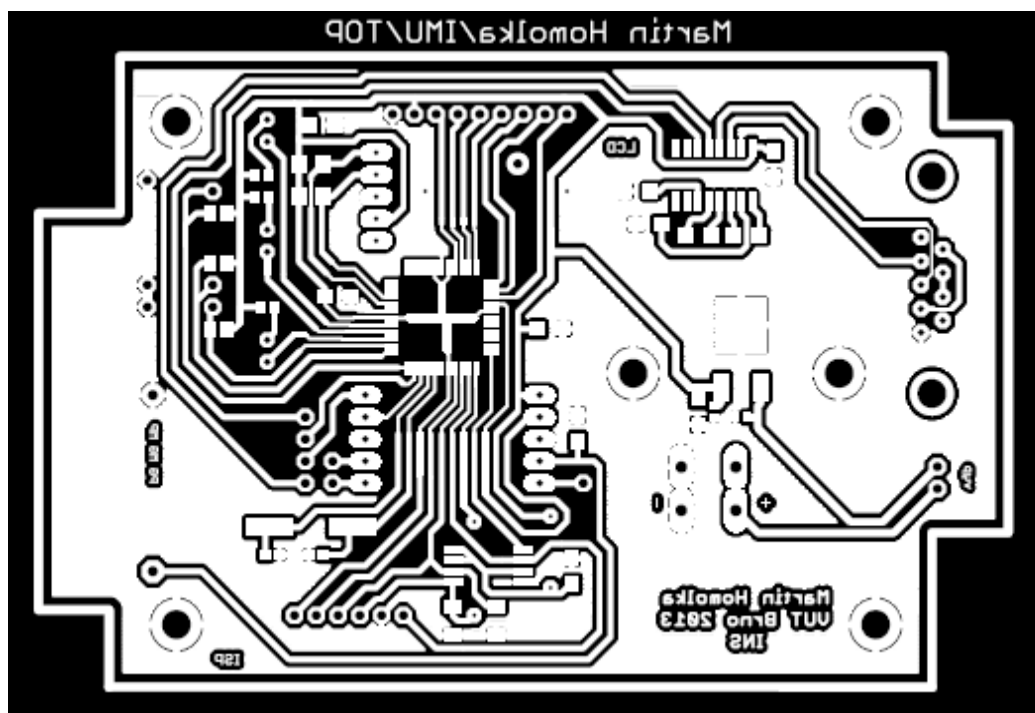
	Association	
OEM	Original Equipment Manufacturer	Výrobek určený pro implementaci do jiného systému
PPS	Precision Positioning Service	Služba přesné polohy
P(Y)		Šifrovaný signál
S, L		Pásmo frekvencí
SA	Selective Availability	Selektivní dostupnost
SAW	Surface Acoustic Wave	filtr s povrchovou akustickou vlnou
SD	Secure Digital	Paměťová karta
SPI	Serial Peripheral Interface	Sběrnice
SPS	Standart Positioning Service	Standardní služba polohy
SSSR	Svaz Sovětských Socialistických Republik	Sovětský svaz
TTFX	Time To First Fix	Doba od spuštění přijímače GPS do naleznutí polohy
U.S.	The United States of America	Spojené státy americké
USART	Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter	Sériová linka
USB	Universal Serial Bus	Univerzální sběrnice
VHF	Very high frequency	Velmi krátké vlny
WAAS	Wide Area Augmentation System	Americký aungmentační systém
WGS	World Geodetic System	Globální souřadnicový systém
XOR	eXclusive OR	exkluzivní součet

SEZNAM PŘÍLOH

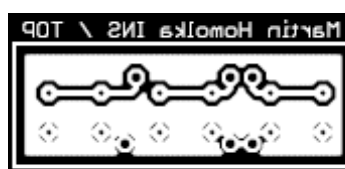
A	Návrh zařízení.....	51
	A.1 Desky plošných spojů.....	51
	A.2 Obvodové zapojení	52
B	SEZNAM SOUČÁSTEK	53

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

A.1 Desky plošných spojů



Předloha pro výrobu DPS v měřítku 1:1



Předloha pro výrobu DPS pro tlačítka v měřítku 1:1

B SEZNAM SOUČÁSTEK

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
R4, R5	10K Ohm	0805	Rezistor
R1, R2	4k7 Ohm	1206	Rezistor
R6 – R8	1k5 Ohm	R0603	Rezistor
C14, C15	100n/16V	C0402	Kondenzátor keramický
C2, C3	22 pF	C0603	Kondenzátor keramický
C1, C4, C6 – C13	100n/35V	A	Tantalový kondenzátor
C5	1u/16V	A	Tantalový kondenzátor
LED1	12,6mcd, 2,1V, 10mA, 565nm	3mm, difúzní	LED zelená
LED3	8,7mcd, 2V, 10mA, 635nm	3mm, difúzní	LED červená
LED2	5,6mcd, 2,1V, 10mA, 585nm	3mm, difúzní	LED žlutá
ZD1, ZD2	3,6V/0,5W	SOD80	Zenerova dioda
IC1	ATmega16L-8AU	44A	Mikrokontrolér
IC2	3,3V/0,5A	DPAK	Lineární regulátor napětí
IC3	MAX232		Konvertor RS232 / TTL
IC4	32 Mbit	S2A	Sériová flash paměť
Q1	8 MHz	HC49USSMD	Krystal
CAN9	zásuvka 90°	CAN 9	Konektor CANON do DPS
JP20, JP19	250V/3A	Kruhové	Kolébkový spínač do panelu s aretací
JP11 – JP16	1 - pólový	B1720	Mikrospínač do DPS
G1	BH2032	CR2032	Držák baterie do DPS
JP8 – JP10, JP25	Rozteč 2,54 mm	červená	Jumper (zkratovací propojka)
	U-KM78 ABS BLACK	27x80x120	Krabička
BAT+, BAT-		LS1407	Faston do DPS
		FH28x05RT	Faston na kabel
		FH28x05RT	Faston na kabel
JP1-JP30	Rozteč 2,54mm		Oboustranný kolík přímý
GPS, IMU	Rozteč 2,54mm		Precizní dutinková lišta