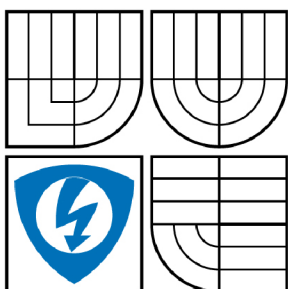


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

DATOVÁ FÚZE SATELITNÍ NAVIGACE A KOMPASU

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

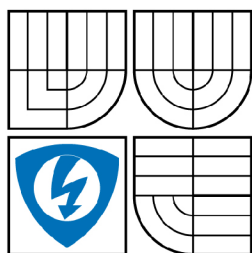
Bc. IVO MACEČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LUDĚK ŽALUD, Ph.D.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Ivo Maceček

ID: 78527

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Datová fúze satelitní navigace a kompasu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy satelitní navigace, především NAVSTAR GPS a měřením orientace pomocí geomagnetického pole Země.

Vyberte vhodnou metodu datové fúze z těchto snímačů a tuto prakticky realizujte a otestujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

J. A. Castellanos, J. D. Tardos, Mobile Robot Localization and Map Building, Kluwer Academic Publishers, 1999, ISBN 0-7923-7789-3

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 24.5.2010

Vedoucí práce: doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Teoretické poznatky o různých družicových systémech určení polohy. Zvláštní zaměření je na americký systém GPS. Součástí je popis celého systému a následná analýza zdrojů nepřesností. Návrh metody DGPS pro minimalizaci jejich vlivu na výsledná data. Následují příklady principů pro měření geomagnetického pole. Poslední kapitoly se věnují praktické realizaci DGPS pro venkovní mobilní robot. Popisují hardwarovou strukturu, programové vybavení systému společně s nasazením dalších prvků – elektronického kompasu. Jsou uvedeny praktická měření a výsledky.

KLÍČOVÁ SLOVA

GPS přijímač, diferenční GPS, DGPS, navigace, robot, referenční stanice, vzdálený pozorovatel, NMEA, UTM, kompas

ABSTRACT

Theoretical information about different satellite navigation systems used for determination of position. Special attention is attended to system GPS. There are consulted main principles of the GPS and some error sources. Application of differential GPS for minimization of these errors is discussed. Next part is about examples of basic principles for measuring earth magnetic field. Last chaps are about practical realization of mentioned DGPS, which is applied for outdoor mobile robot navigation. There is described hardware structure, software utilities and application of an aided tool for GPS - electronic compass. Some practical measurements and results are presented.

KEY WORDS

GPS receiver, differential GPS, DGPS, navigation, robot, base station, remote station, NMEA, UTM, compass

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MACEČEK, I. *Datová fúze satelitní navigace a kompasu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 77 s.
Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Datová fúze satelitní navigace a kompasu* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne: **24. května 2010**

.....
podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Luděkovi Žaludovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **24. května 2010**

.....
podpis autora

OBSAH

1. ÚVOD	11
2. DRUŽICOVÉ SYSTÉMY.....	12
2.1 Systém Navstar GPS.....	12
2.2 Systém GLONASS.....	13
2.3 Systém Galileo	14
3. PŘEHLED SYSTÉMU NAVSTAR GPS.....	16
3.1 Struktura systému	16
3.1.1 Kosmický segment	16
3.1.2 Řídicí segment.....	17
3.1.3 Uživatelský segment.....	17
3.2 Datové zprávy	17
3.3 Přijímače signálu pro GPS.....	18
3.3.1 Princip přijímače GPS	18
3.3.2 Konstrukce přijímače GPS.....	20
3.4 Určení polohy pozorovatele	21
4. ZDROJE CHYB V SYSTÉMU GPS	23
4.1 Časová nestabilita.....	23
4.2 Atmosferické vlivy	23
4.3 Ostatní zdroje nepřesností.....	24
4.4 Metody zpřesňující určenou polohu	25
5. DIFERENČNÍ GPS.....	27
5.1 Princip diferenční GPS	27
5.2 Referenční stanice pro DGPS	29
5.2.1 Stanice pro korekce zdánlivé vzdálenosti.....	29
5.2.2 Stanice pro korekce souřadnic	31
5.3 Korekce a přesnost DGPS.....	31
5.4 Popis systému WADGPS.....	32
6. PRINCIPY MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE.....	34

6.1 Historie kompasu.....	34
6.2 Elektronický kompas	35
6.2.1 Flux-gate magnetometry.....	37
6.2.2 Indukční magnetometry	39
6.2.3 Magnetometry s Hallovým jevem.....	39
6.2.4 AMR magnetometry.....	40
7. REALIZACE NAVIGAČNÍHO SUBSYSTÉMU	43
7.1 Hardwarové zapojení robotu.....	43
7.2 Hardwarové zapojení referenční stanice.....	48
7.3 Programové zpracování navigačních dat	50
7.4 Programové ovládání referenční stanice.....	56
7.5 Aplikace realizovaného systému DGPS	59
8. NÁVRH A REALIZACE DATOVÉ FÚZE GPS A KOMPASU.....	63
8.1 Měření azimutu pomocí GPS	63
8.2 Algoritmus datové fúze.....	66
9. ZÁVĚR	70
10. POUŽITÁ LITERATURA	71
11. SEZNAM ZKRATEK.....	73
12. SEZNAM PŘÍLOH.....	74

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 : Rozložení družic systému GLONASS na oběžných drahách [5]	13
Obr. 3.1 : Rozložení družic na oběžných drahách v síti zeměpisných souřadnic	16
Obr. 3.2 : Obecné blokové schéma přijímače signálu GPS	19
Obr. 5.1 : Realizace principu diferenční GPS při navigaci vozidel.....	27
Obr. 5.2 : Diferenční GPS při použití doporučení RTCM SC-104 [1].....	28
Obr. 5.3 : Blokové schéma referenční stanice pro korekce zdánlivých vzdáleností ..	30
Obr. 5.4 : Pokrytí území referenčními stanicemi pro systém WADGPS.....	32
Obr. 6.1 : Příklad ručního kompasu s možností určení azimutu [8].....	35
Obr. 6.2 : Měřicí rozsahy různých principů magnetometrů [9].....	36
Obr. 6.3 : Nákres principu jednoosého Flux-gate magnetometru [9].....	38
Obr. 6.4 : Nákres principu Hallova jevu [10].....	40
Obr. 6.5 : Změna orientace domén AMR senzoru při působení mag. pole [9]	41
Obr. 6.6 : Průběh závislosti relativní změny odporu na úhlu θ [9].....	42
Obr. 7.1 : Moduly Magellan DG14 pro realizaci DGPS.....	43
Obr. 7.2 : Umístění prvků navigačního systému na robotu.....	45
Obr. 7.3 : Bezdrátový modul vysílače/přijímače ELPRO 805U	46
Obr. 7.4 : Elektronický kompas CMPS03 s popisem pinů [11]	47
Obr. 7.5 : Blokové schéma navigačního subsystému robotu	48
Obr. 7.6 : Referenční stanice pro realizaci DGPS	49
Obr. 7.7 : Základní struktura řídicího programu robotu	50
Obr. 7.8 : Vývojový diagram navigačního algoritmu	52
Obr. 7.9 : Navigační data robotu v prostoru.....	55
Obr. 7.10 : Programové rozhraní pro referenční stanici	57
Obr. 7.11 : Porovnání určení polohy pomocí DGPS a GPS.....	60
Obr. 8.1 : Porovnání absolutních chyb azimutu pro různé rychlosti pohybu.....	66
Obr. 8.2 : Grafické znázornění modelu robotu.....	68
Obr. 8.3 : Určení polohy datovou fúzí GPS a kompasu.....	68

SEZNAM TABULEK

Tab. 7.1 : Charakteristické parametry GPS modulu Magellan DG14	44
Tab. 7.2 : Charakteristické parametry bezdrátového modulu ELPRO 805U	46
Tab. 7.3 : Absolutní chyby určení polohy pro GPS a DGPS	61
Tab. 8.1 : Definice vybraných dynamických režimů přijímače DG14	63
Tab. 8.2 : Vyhodnocení měření azimutu pomocí GPS	64

1. ÚVOD

V současné době je pro určování polohy a navigace venkovních mobilních zařízení často využíváno družicových systémů. Především se jedná o nejrozšířenější systém GPS, ale funkční nebo ve vývoji jsou také další projekty. Při aplikaci systému v libovolné oblasti (zejména se zaměřením na mobilní robotiku) je podstatná znalost možností a omezení daného přístupu. Ty vyplývají z principů užitých zařízení, ale také základních chyb působících v systému. Při snaze o správnost návrhu navigačního systému je podstatné věnovat právě této problematice dostatek pozornosti.

Dle zmíněné teorie a analýzy chyb systému je poté možné realizovat různé postupy jejich korekce. Mezi tyto metody patří také DGPS. Celá teoretická koncepce metody je detailně popsána. Součástí návrhu je i popis základních prvků pro realizaci DGPS společně s předloženými příklady. Nad tímto hardwarovým řešením je poté možné realizovat navigační algoritmy, které jsou aplikovány na řízení mobilních zařízení. Celý systém se tak stává nedílnou součástí návrhu autonomního stroje.

Snaha o zlepšení celkového navigačního systému vede k aplikaci dalších snímacích prvků, které slouží ke kooperaci se stávajícím řešením. V oblasti navigace se jedná zejména o elektronický kompas (určování orientace pozorovatele na zemském povrchu). Na základě vhodné datové fúze tak lze dále zpřesňovat data určená pro navigaci mobilních robotů.

Celý projekt venkovního autonomního robotu vznikl v rámci čtyřčlenného týmu TIM2. Tato práce se zabývá návrhem a realizací navigačního systému, který kooperuje s ostatními prvky robotu v rámci celkového řídicího algoritmu (Tomáš Skočdopole), nižších řídicích algoritmů (Michal Sitta) a senzorického subsystému (Martin Skácel).

2. DRUŽICOVÉ SYSTÉMY

Základním úkolem navigace mobilních robotů (stejně jako navigace ostatních objektů) je určení vlastní polohy a následné vyhodnocení úkolů vzhledem k poloze cílového bodu. K určení samotné pozice robotu slouží několik nástrojů. Patří mezi ně například využití odometrie a dalších. Takovými postupy však určíme polohu pouze relativně k určitému bodu. Pro potřeby absolutního určení polohy slouží právě družicové systémy. K jejich jednotnému označení se užívá zkratky GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Ty umožňují na základě zeměpisných souřadnic (šířky, délky, ...) určit polohu pozorovatele v cílové oblasti (pro družicové systémy na planetě Zemi).

Mezi nejrozšířenější systémy určení polohy patří GPS (*Global Positioning System*). Původně americký armádní projekt vznikl v 70. letech dvacátého století, později došlo k jeho rozšíření i na civilní oblast. V současnosti se jedná o systém s nejlepšími předpoklady pro použití v navigaci mobilní robotiky. Samotná struktura a řešení GPS jsou konzultovány v následující kapitole 3.

Tento systém není jediným družicovým systémem. Nyní se pracuje na evropském systému Galileo. Tento systém je popsán v kapitole 2.3. Již dříve vzniklo několik dalších, ale nedošlo natolik k jejich rozšíření a jejich použití je proto nevýhodné.

2.1 SYSTÉM NAVSTAR GPS

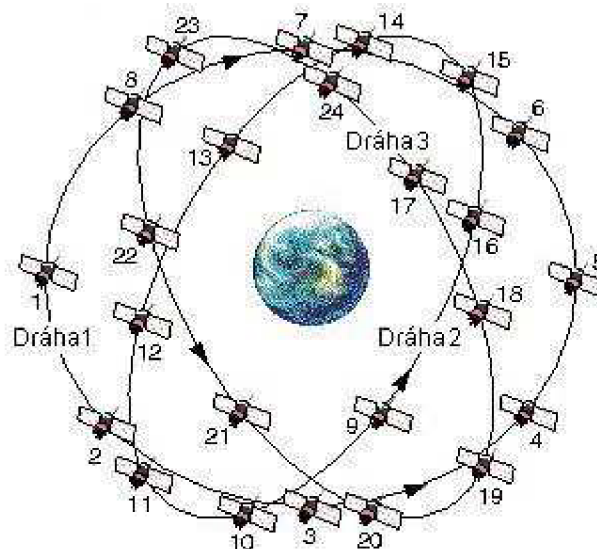
Princip systému vychází z modelu pozorovatele a vysílače. Tím je u GPS družice na oběžné dráze Země. Pozorovatelem se poté stává jakýkoliv objekt vybavený přijímačem signálu, který je generován v jednotlivých vysílačích systému. Družice tedy v periodických intervalech vysílají datové zprávy obsahující informace o své pozici. Poté na základě komunikace mezi výše zmíněnými zařízeními jsou získány údaje z viditelných družic (samotná viditelnost vysílačů přijímačem GPS je podstatným limitujícím faktorem celého systému). Pro určení polohy následuje vyhodnocení jednotlivých informací a to pro jakoukoliv pozici na Zemi. Mezi další výhody patří jednotnost souřadného systému pozice pro všechny objekty využívající systému GPS. Hlavní nevýhoda pak spočívá v nutnosti získat dostatečně silný signál

od daného minimálního počtu zdrojů, aby bylo možné vypočítat aktuální pozici. Celá problematika je detailně konzultována v kapitole 3.

2.2 SYSTÉM GLONASS

Systém GLONASS (*Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistema*) byl navržen pro potřeby určení polohy ruskou armádou. Projekt odstartoval v roce 1970 a k vypuštění první družice došlo v roce 1982. Konfigurace systému pracuje v konečné verzi s 24 družicemi, ale tohoto plného operačního stavu nebylo nikdy dosaženo.

Celá skladba systému je dělena do 3 částí. První z nich se týká rozložení a konstrukce družic obíhajících kolem Země. Jak již bylo řečeno, základem je 24 družic obíhajících na 3 drahách, kdy na každé je umístěno 8 družic. Oběžné dráhy jsou vzdáleny přibližně 19 100km od zemského povrchu. Grafické zobrazení popsaného rozložení je na obrázku obr. 2.1.



**Obr. 2.1 : Rozložení družic systému
GLONASS na oběžných drahách [5]**

Konstrukce družic využitých pro GLONASS má typové označení Uragan-M. Jedná se o družice, které pracují na vysílacích frekvencích L1 (1598 – 1606MHz) a L2 (1242 – 1248MHz). Pro plánovaný novější typ družic Uragan-K budou přidány další vysílací frekvence. Jedním z důvodů je poté možnost spolupráce s ostatními GNSS při plnění funkce *Safety of life*. Tato funkce je dále konzultována v kapitole 2.3 nebo literatuře [6].

Následující částí celého systému je kontrolní oblast. Do této kategorie spadají řídicí a monitorovací střediska, která kontrolují vesmírný segment (družice). Starají se o manévrování s družicemi na oběžných drahách, korekce jednotlivých atomových hodin a další úkony spojené s údržbou. Jednotlivá střediska jsou rozmístěna v rámci území spadajícího pod Ruskou federaci (detailní rozmístění středisek lze nalézt v literatuře [5]). Z tohoto rozložení plynou daná časová omezení, která limitují možnosti komunikace s jednotlivými družicemi.

Posledním prvkem systému je samotný uživatel vybavený odpovídajícím přijímačem signálu. Z hlediska přesnosti určení polohy pozorovatele lze získané hodnoty rozdělit do skupin pro civilní a autorizované uživatele. Aplikace spadající do druhé zmíněné skupiny (např. armáda a vládní instituce) mají vždy zajištěnou zvýšenou přesnost polohy vzhledem k ostatním uživatelům. Obdobná strategie distribuce dat uživatelům je aplikována i v ostatních systémech GNSS.

2.3 SYSTÉM GALILEO

Evropský projekt systému GNSS se nazývá GALILEO. Jeho vývoj byl odstartován v roce 1999 a dosud nebyl ukončen. Projekt svou základní skladbou odpovídá již zmíněným systémům GPS a GLONASS. Je tak zaručena určitá možnost kooperace mezi jednotlivými systémy. Na rozdíl od těchto zmíněným je však primárně vyvíjen za účelem civilních potřeb a soukromého spravování.

Vesmírný segment je navržen pro celkový počet 30 družic. Ty obíhají na 3 oběžných drahách ve vzdálenosti přibližně 23 500km. Na každou z drah tedy připadá 9 aktivních a jedna záložní družice. V současnosti byly vypuštěny dva zkušební moduly družic GIOVE-A a GIOVE-B. Kontrolní a řídicí segment bude opět odpovědný za monitorování správné funkce aktivních modulů a případné opravy manévrováním se záložní družicí.

Posledním prvkem je samotný uživatelský segment. Ten je již od začátku návrhu projektu rozdělen do skupin podle zajišťované funkce. Na základě [6] se jedná o tyto:

- *OS (Open Service – základní služba)* – základní služba distribuovaná uživatelům. Slouží pro určení polohy a času bez dalších nutných žádostí či poplatků. Přijímače pro tyto služby budou pracovat se signály v pásmech 1164 – 1214MHz a druhým je 1563 - 1591MHz. Předpokládá se také společný příjem ze systému GPS.
- *SoL (Safety of Life – služba kritická z hlediska bezpečnosti)* – jedná se o službu pro aplikace vyžadující vysokou rychlost a robustnost systému. Podmínkou je používání certifikovaného a evidovaného přijímače. Cílovou oblastí je zvláště letecká doprava a vlaková doprava (automatické řízení). Při využívání této služby budou také distribuovány informace z ostatních družicových systémů (GLONASS a GPS).
- *CS (Commercial Service – komerční služba)* – touto službou lze získat zpřesnění určení polohy v aplikacích, kde standardní přesnost nedostačuje. Tohoto výsledku lze dosáhnout distribucí ionosférických modelů nebo lokálních diferenciálních korekcí k uživateli. Získání zmíněných dat je však již zpoplatněno. Takové přijímače zpracovávají stejné frekvence jako u služby *OS* a navíc přidávají další pásmo 1260 - 1300MHz. Poloha uživatele by poté měla být určena s přesností řádově 10cm.
- *PRS (Public Regulated Service – veřejná regulovaná služba)* – jedná se o službu *SoL*, která je však rezervovaná pro potřeby státních institucí. Její využití se předpokládá u policejních složek, záchranářů, pobřežní služby a dalších.

3. PŘEHLED SYSTÉMU NAVSTAR GPS

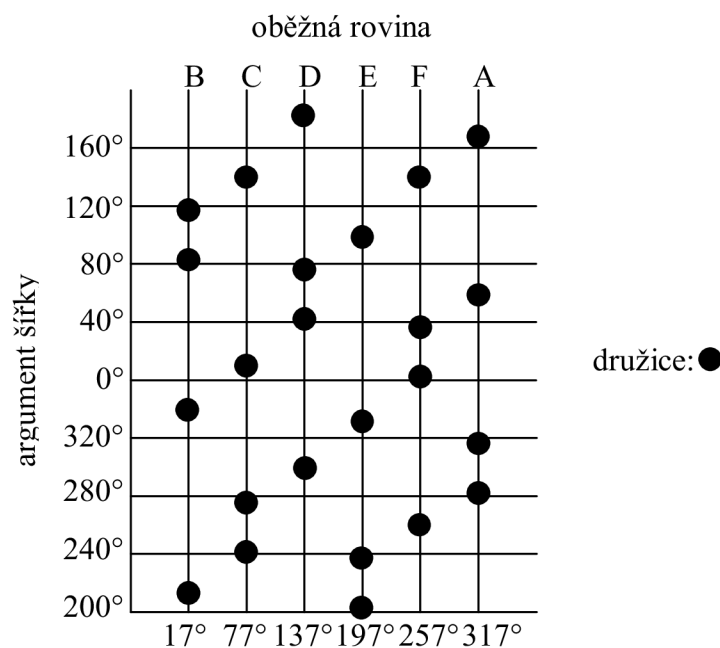
Tato kapitola se věnuje celkovému přehledu realizace systému GPS. Jsou podrobně konzultovány způsoby vzniku, přenosu i vyhodnocení dat získaných přijímačem od družic. V následujících kapitolách je také věnována pozornost samotným řešením přijímačů pro GPS.

3.1 STRUKTURA SYSTÉMU

Vzhledem ke komplexnosti celého systému došlo k jeho rozdělení do několika rovin, které plní odpovídající role pro zajištění funkčnosti a správnosti informací vysílaných k uživateli. Tyto segmenty [1] se nazývají kosmický, řídicí a uživatelský. Detailní popis těchto částí je v následujících kapitolách.

3.1.1 Kosmický segment

Kosmický je tvořen družicemi, které byly vyslány na oběžnou dráhu Země. Základní počet pro pokrytí planety je 24, ale dle potřeby jich může být více. Jedná se o záložní moduly, které lze aktivovat (například při výpadku jiné družice). Na obr. 3.1 je zobrazena síť zobrazující přibližné rozložení družic a jejich drah.



Obr. 3.1 : Rozložení družic na oběžných drahách v síti
zeměpisných souřadnic

Jejich dráhy jsou předem dány a to po čtyřech družicích v šesti oběžných rovinách. Ty mají sklon k rovníku 55° a jsou od povrchu Země vzdáleny přibližně 20 200km. Doba oběhu jednotlivých modulů byla stanovena na 11h a 56min.

3.1.2 Řídicí segment

Následující je část řídicí. Ta je tvořena monitorovací stanicí, která má na starost správu družic. Přijímá jejich data a ty postupuje hlavní řídicí stanici. Z nich poté vypočítá parametry drah a času družic. Výsledky jsou poté zpětně posílány přes satelitní stanice družicím, které je následně zprostředkovávají uživatelům systému. Umístění hlavní řídicí stanice [1] je na americké letecké základně. Monitorovací a vysílací stanice jsou rozmístěny na dalších základnách v různých oblastech země.

3.1.3 Uživatelský segment

Posledním prvkem je uživatelský segment. Je to také jediný segment systému, který může uživatel modifikovat dle vlastních potřeb či požadavků. Zahrnuje všechna zařízení používaná pro příjem, zpracování a vyhodnocení signálů získaných z jednotlivých družic. K tomuto účelu se používá GPS přijímač (*GPS receiver*), který na základě výpočetního algoritmu ze získaných dat určí polohu pozorovatele. Přijímač je vybavený datovým výstupem pro komunikaci s dalšími zařízeními nebo přímým výstupem na displej u komplexnějších typů (navigace automobilů). Samotný princip přijímače a další specifikace jsou uvedeny v kapitole 3.3.

3.2 DATOVÉ ZPRÁVY

Pro příjem signálu GPS se užívá odpovídajícího přijímače. Ten dekóduje a zpracovává data vysílaná družicí. Pro zajištění správné komunikace jsou jednotlivé zprávy kódovány a zapisovány do předem definovaného tvaru. Jejich další zpracování pak záleží na typu přijímače.

Všechny družice systému [1] vysílají své zprávy na dvou frekvencích $f_1 = 1575,42\text{MHz}$ a $f_2 = 1227,6\text{MHz}$. Pak vysílanou informaci jedné družice můžeme popsat rovnicí:

$$x(t) = A_C c(t)d(t) \sin(2\pi f_1 t) + A_{P1} p(t)d(t) \sin(2\pi f_1 t) + A_{P2} p(t)d(t) \sin(2\pi f_2 t) \quad (3.1)$$

V rovnici (3.1) je nosná vlna modulována samotnými daty družice $d(t)$. Navíc také pseudonáhodnými kódy $c(t)$ a $p(t)$. Jejich užitím dojde k odlišení zpráv vysílaných od jednotlivých zdrojů a také je zaručena větší odolnost proti rušení, protože se jedná o přenos s rozprostřeným spektrem.

Hlavním obsahem zprávy $x(t)$ z rovnice (3.1) jsou data družice, která jsou periodicky vysílána ve formě rámců. Každý z nich obsahuje pět podrámců, ty jsou pro přenos zajištěny Hammingovým kódem. V prvním jsou informace o čase, druhý a třetí přenáší efemeridy (data pro určení polohy) družice. Poslední dva jsou určeny na almanach, který nese informace o efemeridách ostatních družic, ale věrohodnost těchto údajů je výrazně nižší proti skutečné zprávě z družice. Vysílaná zpráva tedy obsahuje keplerovské efemeridy družice, čas vysílání zprávy, almanach, koeficienty ionosférického modelu a stav družice.

Po přijetí těchto dat následuje zpracování v GPS přijímači. Tento postup je detailně popsán v kapitole 3.3.1 a 3.3.2 Pozorovatel pro získání jednotlivých informací o své poloze komunikuje s přijímačem pomocí vět. Tyto věty již obsahují vypočtené hodnoty zeměpisných údajů pozice, zrychlení objektu, informace o viditelných družicích a další zpřesňující data.

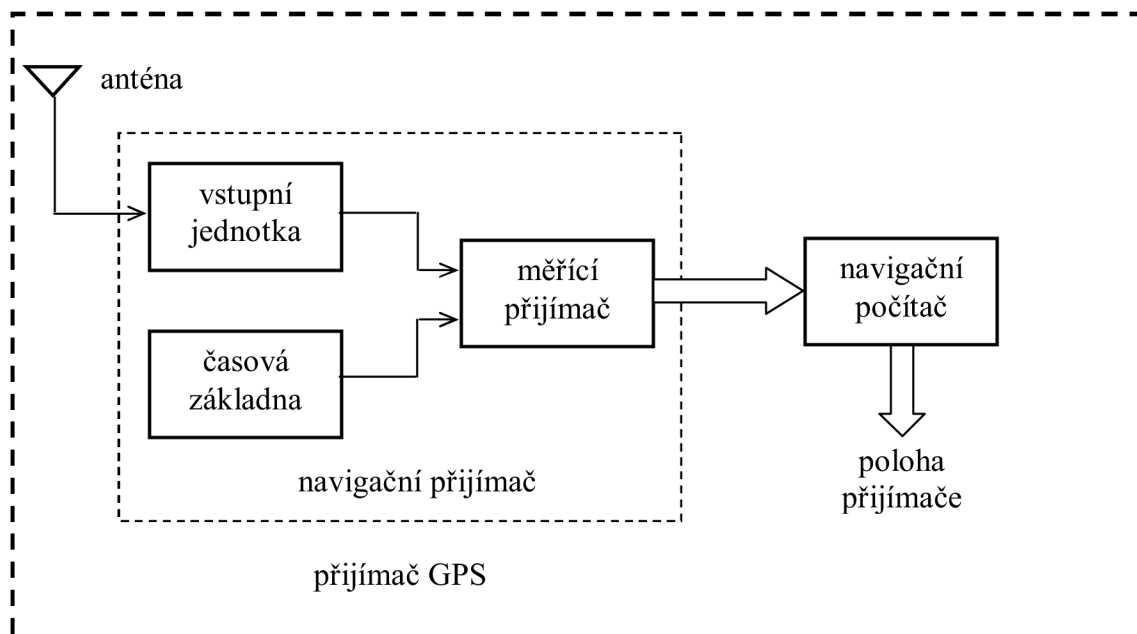
3.3 PŘIJÍMAČE SIGNÁLU PRO GPS

Přijímač GPS signálu spadá do uživatelského segmentu systému. Jeho vlastnosti, nastavení a samotný princip konstrukce nejvíce ovlivňují kvalitu měřených dat a uživatelského komfortu.

3.3.1 Princip přijímače GPS

Obecně jej lze popsat blokovým schématem, které je zobrazeno na obrázku 3.2. Vstupním kanálem je pro přijímač anténa. Nejčastěji se jedná o provedení interní antény, která je přímo součástí celého zařízení. Jinou variantou je přístroj vybavený pouze definovaným konektorem pro připojení antény, kterou musí uživatel pořídit nezávisle na přijímači (pak lze s výhodou umístit pouze anténu na vhodné místo na robotu s minimálním stíněním). Pokud parametry zabudované antény nesplňují požadavky uživatele, umožňují někteří výrobci připojit externí

anténu přes vstupní konektor. Po zapojení je přístroj schopen okamžitě začít pracovat a zároveň zůstává uživateli možnost upravit parametry připojením vlastní antény.



Obr. 3.2 : Obecné blokové schéma přijímače signálu GPS

Následujícím blokem na obrázku 3.2 je navigační přijímač. Ten v sobě zahrnuje obvody pro zpracování přijatých signálů. Elektrický signál z antény musí být pro další zpracování upraven pro potřeby následujících obvodů. Dochází například k filtraci šumu a odpovídajícímu zesílení signálu. Časovou základnu přijímače tvoří velmi přesný oscilátor. Při porovnání s časem vysílaným družicemi v datových rámcích může být určeno časové zpoždění, které je později zahrnuto do výpočtu polohy. Následně dochází ke zpracování v navigačním počítači a blocích měřicích přijímačů. Ty slouží k dekodování dat družice užitím principu kódování, který je popsán v kapitole 3.4. Podle jejich uspořádání a způsobu práce rozlišujeme několik typů. Jsou to [1] sekvenčně měřicí, multiplexní a mnohokanálové přijímače.

Sekvenčně měřicí navigační přijímač provádí postupné měření vždy k jedné družici. Tento typ přístroje je vhodný pro nepříliš rychle se pohybující objekty. Při snížení komunikace s družicí pod dobu trvání jednoho bitu zprávy můžeme ve zbývajícím čase přijímat data od dalších družic. Získáváme tak multiplexní

princip činnosti. Takto konstruované přístroje mají větší chybovost zpracování dat, která pak způsobí větší nepřesnosti při výpočtu polohy.

Posledním konstrukčním řešením je mnohokanálový přijímač. Vzhledem k požadavku měřit současně od několika družic, aby byla data pro navigační počítač co nejaktuálnější, se jedná o nejlepší řešení. Takový přijímač je vybaven několika obvody měřicího přijímače, které komunikují s jednotlivými družicemi. Na jejich výstupech jsou pak pro daný čas data od všech viditelných zdrojů signálu a mohou být přímo zpracovány algoritmem v navigačním počítači. Jedná se o nejpoužívanější strukturu realizovanou s obvyklým počtem 12 až 20 kanálů. Přístroje pak mají počet kanálů přesahující počet viditelných družic v systému. V těchto případech je přijímač připraven na možné rozšíření systému o další moduly družic bez nutnosti jeho výměny. Oproti předchozím typům jsou mnohokanálové přístroje vhodné pro vyhodnocení velmi rychle se měnící polohy pozorovatele.

3.3.2 Konstrukce přijímače GPS

Samotnou konstrukci přijímače lze dělit z několika hledisek. Přístroje se liší způsoby komunikace s prostředím, mechanickým provedením i způsoby napájení. Dále pak o volbě přístroje rozhodují jeho parametry (přesnost, počet kanálů, spotřeba, citlivost, ...). Ty však slouží ke specifikaci přístroje až po předchozím rozčlenění.

Jedna skupina přijímačů je pro komunikaci vybavena přímým zobrazením na displej, který je součástí přístroje. Ten obsahuje i další ovládací komponenty. Jedná se tedy o komplexní přístroj, který je určen pro samostatné použití. Naopak přijímače určené pro využití v určitém procesu jsou vybaveny datovým výstupem. Specifickými konektory je RS232 a rychlejší varianta komunikace přes USB (*Universal Serial Bus*). Další možností je bezdrátová komunikace pomocí Bluetooth. Zde je však nevýhodou potřeba zajistit další zdroj napájení pro přijímač.

Mechanické provedení ovlivňuje spektrum využití přijímače. Práce v nenáročných provozních podmínkách umožňuje použít zařízení, které je například ve formě přídatné karty do řídicího zařízení (PC, notebook, měřicí systém) bez hrozby mechanického poškození. Způsobům použití přijímače v outdoorovém prostředí odpovídá také jeho provedení. Bývá vybaven interní anténou s možným

rozšířením. Dále pak krytem odolným vodě, mechanickému poškození a s konektorem pro datový výstup. Často také mechanismem pro připevnění (přichycení magnetem). Napájení přístroje je realizováno přes komunikační kanál. To neplatí pro bezdrátové přijímače, které musí mít vlastní zdroj napětí.

Příkladem volby přístroje pro potřeby navigace venkovního mobilního robota je kapitola 7. Jsou zde konzultovány jednotlivé parametry přijímače a jeho vhodnost pro zmíněnou aplikaci.

3.4 URČENÍ POLOHY POZOROVATELE

V navigačních systémech, tedy i v systému GPS, se měřením neurčí přímá poloha pozorovatele. Zjistíme tzv. navigační parametry, které figurují ve vztahu (rovnici měření) pro určení pozice. GPS patří mezi dálkoměrné systémy, kde [1] vektor \mathbf{r} polohy uživatele určíme ze vzdálenosti d přijímače od bodu se známým vektorem \mathbf{r}_z . Matematickým zápisem věty je rovnice (3.2). Samotný výpočet provádí navigační počítač, který je součástí přijímače na obrázku 3.2.

$$d(t) = |\mathbf{r}(t) - \mathbf{r}_z| = \sqrt{(\mathbf{r}(t) - \mathbf{r}_z)^T \cdot (\mathbf{r}(t) - \mathbf{r}_z)} = c \cdot \tau(t) \quad (3.2)$$

Vektor polohy \mathbf{r} pozorovatele uvažujeme ve tvaru sloupcového vektoru pravoúhlých souřadnic (x , y a z) systému. Vzdálenost přijímače lze také dle rovnice (3.2) vyjádřit jako součin rychlosti šíření signálu c a časového zpoždění $\tau(t)$ signálu. Hodnota daného zpoždění se počítá v navigačním přijímači porovnáním posunu pseudonáhodného kódu družice s generovaným kódem přijímače, který je postupně posouván v čase, dokud nedojde k maximální korelaci signálů.

Obecný zápis rovnice (3.2) poté pro N různých signálů od družic lze upravit do tvaru, kterým je rovnice (3.3) [1].

$$c \cdot \tau_i(t) = \sqrt{(\mathbf{r}(t) - \mathbf{r}_i(t - \tau_i))^T \cdot (\mathbf{r}(t) - \mathbf{r}_i(t - \tau_i))} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.3)$$

Pro výpočet vektoru polohy \mathbf{r} uživatele je řešením soustava tří nelineárních rovnic o třech neznámých. Z toho vyplývá podmínka měřit signál alespoň

od 3 družic ($N=3$) pro určení polohy z rovnic (3.3). Popsaný výpočet je pouze principiální, protože zde není uvažována chyba časové základny. Ta zastupuje nepřesné určení zpoždění signálu, protože nejde generovat naprosto totožné pseudonáhodné kódy. Soustava nelineárních rovnic (3.4) [1] již zahrnuje i uvažovanou chybu času, kterou zde vyjadřuje výraz $b(t)$.

$$d_i(t) = \sqrt{(\mathbf{r}(t) - \mathbf{r}_i(t - \tau_i))^T \cdot (\mathbf{r}(t) - \mathbf{r}_i(t - \tau_i))} + b(t) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.4)$$

Rovnice (3.4) vyjadřuje soustavu nelineárních rovnic o čtyřech neznámých. Pro její řešení se mění podmínka minimálního počtu viditelných družic na $N = 4$. Algoritmus výpočtu rovnic využívá vhodného maticového zápisu. Takto provedený výpočet má však několik nevýhod, které lze odstranit použitím Kalmanovy filtrace. Užití tohoto algoritmu umožňuje použít více kanálů přístroje ($N > 4$), potlačuje chybu způsobenou šumem a dovoluje zahrnout do výsledku předchozí polohu nebo data z jiných senzorů. V posledním kroku je proveden přepočten souřadnic vektoru \mathbf{r} do soustavy souřadnic vztahené k ploše Země. Tento souřadný systém je označován zkratkou WGS-84.

4. ZDROJE CHYB V SYSTÉMU GPS

V předchozí kapitole byl zmíněn celkový přehled realizace družicového systému GPS a způsob určení polohy z navigačních dat. Pro aplikace systému jsou však důležitou součástí také vlivy, které působí na přesnost získaných dat. Následující text se zabývá právě chybami působícími v řetězci určování polohy pozorovatele a předkládá případné možnosti jejich minimalizace. Podrobnější vysvětlení problematiky (včetně předepsaných matematických řešení) lze nalézt v literatuře [3].

4.1 ČASOVÁ NESTABILITA

Měření vzdálenosti pozorovatele k družicím je založeno na časovém zpoždění přijímaného signálu. Základním prvkem je tedy stabilita a synchronizace hodin užitých pro měření času v jednotlivých objektech (přijímačích a družicích).

Při pohledu na stranu přijímače signálu se jedná o časově proměnnou chybu. Ta však postihuje veškerá měření k družicím, která zkoumaný přijímač provádí. Při měření vzdáleností k alespoň 4 družicím pak může být určena poloha pozorovatele a časový rozchod. Mezi způsoby potlačení patří například porovnání rozdílu mezi dvěma odpovídajícími měřeními vzdálenosti nebo modelování průběhu předpokládané časové nestálosti.

Na straně samotné družice jsou umístěny atomové hodiny, které neustále volně pracují. Případné odchylky a chyby těchto hodin jsou monitorovány pomocí řídicího segmentu. Poté zpětně nedochází ke korekci samotných hodin, ale naopak jsou uživatelům distribuovány potřebné korekce. Ty jsou následně použity při zpřesnění výpočtu vzdáleností přijímače a viditelných družic. Již z principu vzniku chyby je patrný její charakter. Dochází k ovlivnění všech uživatelů systému a její velikost je nezávislá na aktuální pozici přijímače.

4.2 ATMOSFERICKÉ VLIVY

Doposud byly do rozboru chyb systému zahrnuty pouze prvky vysílačů (družic) a přijímače (pozorovatele). Podstatným způsobem však dochází k ovlivnění přenášené informace prostředím, které se nachází mezi těmito objekty.

Pro systém GPS se jedná o zpoždění signálu průchodem atmosférou Země. Celkové zpoždění se dělí na dvě skupiny – disperzní a nedisperzní složku.

Nedisperzní část zpoždění odpovídá průchodu troposférou. Z hlediska skladby zemské atmosféry se jedná o nejnižší část. Její chování je spojeno se změnou teploty, tlaku a dalších parametrů vlivem počasí. Těmito změnami dochází k ovlivnění rychlosti šíření signálu a s tím související změněné vzdálenosti k družici. Jedná se především o ty družice, které jsou v dané chvíli nízko nad horizontem. Pro modelování působení troposféry se využívá například Chao modelu. Jeho nevýhodou je nutnost měření poměrně velkého množství vstupních údajů. Navigační aplikace proto častěji využívá Magnavox a Collins modely. Ty zpracovávají menší množství potřebných vstupních hodnot (pracuje se pouze s elevačním úhlem družice, její výškou a výškou samotného přijímače) a dosahují téměř totožné schody s Chao modelem.

Druhou částí zpoždění je disperzní prvek způsobený ionosférou. Tato vrstva začíná přibližně 60km nad zemským povrchem. Vlivem ionizačních procesů zde dochází ke změnám indexů lomu a zpomalování průchodu signálu. Při modelování chování této vrstvy vystupuje závislost na frekvenci procházejícího signálu. S výhodou pak může být využito snížení jejího vlivu užitím právě dvou komunikačních frekvencí L1 a L2. Pokud by se v aplikaci pracovalo s jednofrekvenčním přijímačem, lze využít modelovaných dat pro danou pracovní frekvenci.

Celková chyba průchodem atmosféry se rovná součtu těchto dílčích zpoždění. Na základě [3] se tyto vlivy projeví na celkové odchylce měření polohy pozorovatele v poměru pro troposféru 0,7m a ionosféru 7m.

4.3 OSTATNÍ ZDROJE NEPŘESNOSTÍ

Dalším z podstatných zdrojů chyb určení polohy pomocí systému GPS byl prvek SA (*Selective availability*). Jedná se degradaci práce systému pro civilní oblast uživatelů nad minimální přístupnou přesností určení souřadnic polohy pozorovatele. Vzhledem k ostatním vlivům je odchylka způsobená SA podstatně větší, dle [3] se jedná o hodnotu přibližně 25m. Tato chyba byla do systému uměle dodávána (nejedná se o vlastní chybu vyvolanou samotným principem nebo činností systému).

Takový postup ochraňoval strategická místa před zneužitím systému pro nepovolené vojenské účely. Efektu SA lze dosáhnout úmyslnou nepřesností ve vysílaných datech o efemeridách z družic nebo ovlivněním frekvence oscilátoru družice. Působení SA na přesnost systému bylo americkou vládou oficiálně ukončeno 1.5.2000.

Mezi další chyby lze zahrnout faktory působící na přijímač v příslušné aplikaci. Jedná se zvláště o chybu způsobenou parazitními odrazy signálu od ploch v okolí antény přijímače. Princip určení doby putování signálu od družice je založen na korelaci dat kódu mezi snímačem a družicí. Standardní tvar průběhu korelace obsahuje obálku s daným maximem. Vlivem parazitním odrazů dochází k deformaci této obálky a posunu maxima korelační funkce. Určení souřadnic pozorovatele je poté ovlivněno odchylkou okolo 3m. Pro snížení tohoto efektu je vhodné vynechat z měřicího řetězce družice, které jsou viditelné pod nízkým elevačním úhlem.

Stejně tak je třeba zahrnout konstrukční řešení přijímače. Z tohoto hlediska je důležitý vliv okolní teploty a případných nelinearit prvků na přesnost měření. Tyto chyby odpovídají jednotlivým postupům výrobce a pro jejich vyjádření se využívá modelů s bílým šumem.

4.4 METODY ZPŘESŇUJÍCÍ URČENOU POLOHU

Metody pro zpřesnění pracují s daty, která získáme z přijímače postupem v kapitole 3.4, a zlepšují jejich věrohodnost. Návrhy metod se snaží o eliminaci chyb, analyzovaných v předchozím textu, na akceptovatelnou hodnotu. Sem patří například metoda průměrování nebo užití DGPS (*Differential GPS*). Zvýšení přesnosti lze následně ovlivnit i použitím lepšího přijímače, jehož parametry ovlivní základní chybu snižovanou metodami.

Metoda průměrování je velmi jednoduchá na realizaci, ale její použití se uplatňuje jen ve specifických případech. Důvodem je nutnost měřit polohu pozorovatele s malou, v ideálním případě nulovou, dynamikou pohybu. Tato podmínka vyplývá přímo z principu metody, který je založen na sběru a průměrování dat polohy za určitou časovou jednotku. Stejně tak lze využít k vyhodnocení dat klouzavého průměru. Při experimentálním měření [1] bylo zjištěno, že při délce průměrování delší než 3 minuty klesá chyba s druhou odmocninou doby měření. Pro rychle se pohybující objekty (mobilní roboty, ...) je taková doba čekání

nepřípustná. Navíc je pro krátké intervaly měření potlačení chyby malé. Kvůli zmiňovaným důvodům je metoda nevhodná pro mobilní pozorovatele.

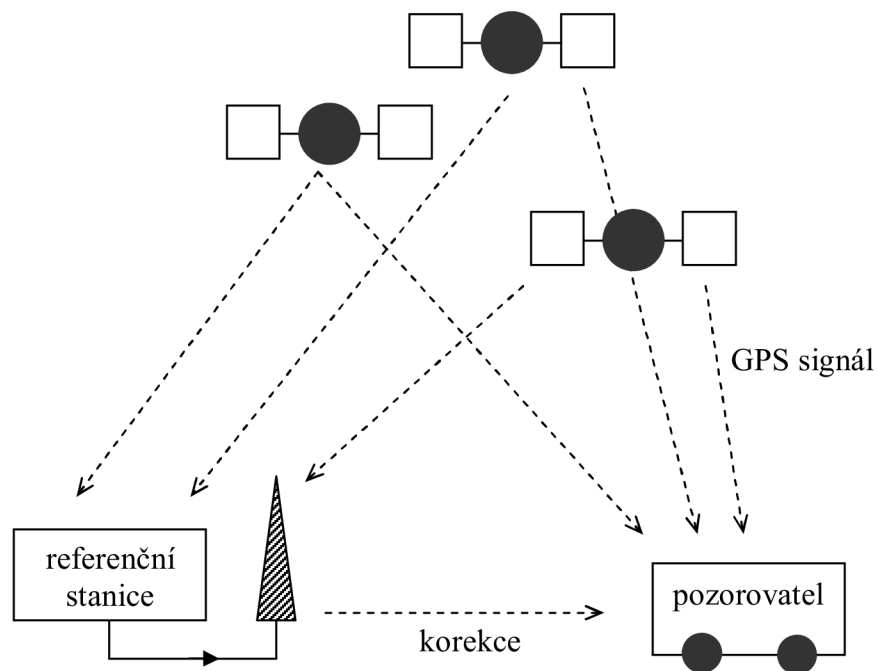
Dalším způsobem je užití DGPS. Jedná se o způsob práce se systémem GPS, kdy uživatel pro zpřesnění užívá více spolupracujících přijímačů. Přesný popis principu, způsoby realizace a možnosti použití jsou popsány v kapitole 5.

5. DIFERENČNÍ GPS

Diferenční GPS je měření pomocí systému GPS, které vede ke zpřesnění určené pozice pozorovatele. Samotné použití vyžaduje mnohem složitější měřicí aparaturu než při užití jediného přijímače pro signál přijímaný z družic. Přes tuto skutečnost se jedná o kvalitní a často využívanou metodu pro vylepšení měření polohy.

5.1 PRINCIP DIFERENČNÍ GPS

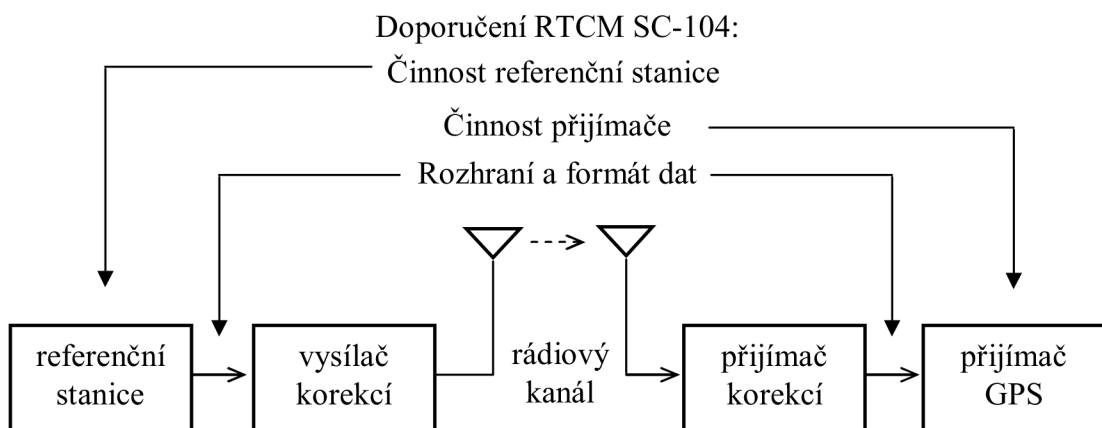
Princip diferenční GPS vychází z vyhodnocování polohy neznámého místa, které představuje naváděný objekt, a referenční pozice. Realizace DGPS v praxi je zakreslena na obrázku 5.1.



Obr. 5.1 : Realizace principu diferenční GPS při navigaci vozidel

Při měření nepříliš vzdálenými přijímači jsou výsledky zatíženy podobnou chybou. Nachází se totiž ve srovnatelných podmínkách měření a působí na ně stejné nebo podobné rušivé vlivy. Jeden z těchto přijímačů je součástí referenční stanice s přesně stanovenou polohou. Z naměřených dat od družic a známé polohy lze poté vypočítat hodnotu korekce polohy. Popis referenční stanice je v kapitole 5.2.

Korekce je poté nutno přenést z referenční stanice k navigovanému pozorovateli. Ten má vlastní přijímač GPS signálu, který určuje jeho pozici na základě viditelných družic. K jejímu zpřesnění se použije přijatá korekce. Vzhledem k předpokladu působení stejné chyby u pozorovatele i referenční stanice dojde užitím korekce k jejich potlačení na straně navigovaného objektu. Pro potřeby zajištění správné funkčnosti diferenčních systémů existuje doporučení RTCM SC-104. Zde je definován formát zprávy s korekcí, požadavky na referenční stanice i komunikační kanál. Na obrázku 5.2 je diferenční systém sestavený podle tohoto doporučení.



Obr. 5.2 : Diferenční GPS při použití doporučení RTCM SC-104 [1]

Popsaný princip je jen obecným modelem řešení DGPS. Na základě způsobů práce a vyhodnocení korekcí lze definovat několik typů realizací. Hlavní dělení je podle veličiny, pro kterou se korekce použije. V prvním případě korigujeme polohu pozorovatele. Tato varianta je jednoduchá na provedení, protože jako referenční stanice může být použitý libovolný GPS přijímač. Její hlavní nevýhodou je obtížně splnitelný požadavek, aby pozorovatel i referenční stanice vyhodnocovali pozice

na základě stejných družic. Druhou veličinou pro zpřesnění je zdánlivá vzdálenost přijímače a družice. V tomto případě je řešení mnohem složitější. Vyžaduje GPS přijímače, které předávají informace o zdánlivých vzdálenostech na svůj výstup. Referenční stanice musí obsahovat jednotku pro výpočet sady korekcí z přijatých dat. Tato metoda je mnohem přesnější, protože dává uživateli možnost pracovat s daty od jednotlivých družic. Při výpočtu poté snadno splníme podmínku pracovat u obou přijímačů jen se společnými družicemi.

Dalším hlediskem je čas, kdy je korekce zpracována. Používá se pro zpřesnění výsledků u práce se statickými objekty. Naopak pro potřeby navigace je nepřijatelná a zde se využívá výhradně zpracování v reálném čase. Poslední dělení je dle místa provedení korekce. K výpočtu může dojít na straně referenční stanice. Nejsou vysílány hodnoty korekcí, ale zprávy o poloze od pozorovatele. Ty jsou v referenční stanici zpracovávány a případně i uloženy. Tento postup slouží pro přesné sledování objektu. Pro navigaci objektu se používá již dříve popsany princip, kdy je vysílaná korekce započtena na straně pozorovatele.

5.2 REFERENČNÍ STANICE PRO DGPS

Referenční stanice pro DGPS se liší podle zvolené realizace systému. Nezávisle na této volbě však vždy potřebuje pro určení korekcí znát přesnou geocentrickou polohu. V systému GPS se pro určení polohy užívá také časové informace. Z tohoto důvodu je nejdůležitější částí referenční stanice časová základna.

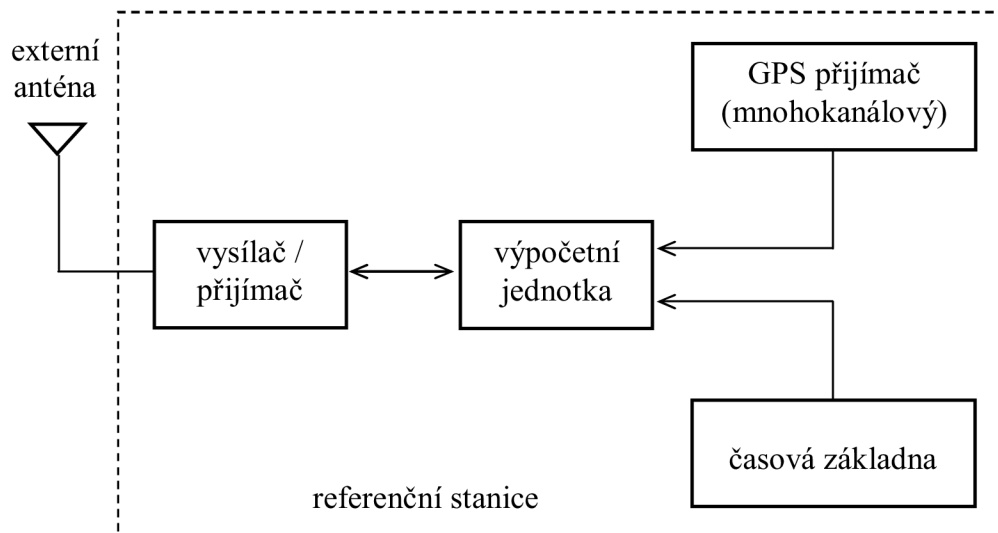
5.2.1 Stanice pro korekce zdánlivé vzdálenosti

Při užití těchto korekcí jsou kladeny vysoké nároky na časovou základnu, která může využívat několika principů. Ideálním řešením je referenční stanice s časovým etalonem. Pokud nyní zná stanice své přesné souřadnice i čas, je schopna přesně určit dobu šíření signálu. Na základě těchto výsledků odhadne skutečnou vzdálenost mezi družicí a stanicí. Výsledná korekce se poté vypočítá jako rozdíl měřené zdánlivé vzdálenosti k družici a odhadu skutečné vzdálenosti. Pro extrapolaci na delší časový úsek jsou obvykle vypočteny také derivace korekcí.

Referenční stanice s časovým etalonem je finančně nákladná, proto se častěji užívá jako časová základna nestabilní nebo stabilní oscilátor. Podmínkou pro použití

stanice s nestabilním oscilátorem je přítomnost mnohokanálového přijímače GPS. Kdyby se neměřily všechny zdánlivé vzdálenosti k družicím ve stejném čase, došlo by ke vzniku různě velkých chyb měření. Je tedy nutné, aby přijímač měřil ke všem družicím zároveň a zajistil použití vždy celé a aktuální sady korekcí (poměrně složitý požadavek). K jeho odstranění se na realizaci časové základny používá stabilní oscilátor. Taková stanice se poté chová stejně jako by byl použit časový etalon.

Kromě časové základny obsahuje referenční stanice i další funkční bloky. Obecné blokové schéma referenční stanice je na obrázku 5.3. Pro určení korekce zdánlivých vzdáleností je nutný přijímač GPS, který na svůj výstup zasílá data s jednotlivými vzdálenostmi k družicím. Následně pak výpočetní jednotka vyhodnotí korekce polohy a případně i jejich derivace. Ideálním řešením výpočetní jednotky je mikroprocesor, který je schopen zajistit matematické i řídicí funkce pro celou referenční stanici. Posledním prvkem je bezdrátová komunikace realizovaná vysílačem nebo přijímačem společně s anténou.



Obr. 5.3 : Blokové schéma referenční stanice pro korekce zdánlivých vzdáleností

5.2.2 Stanice pro korekce souřadnic

Referenční stanice pro korekce polohy jsou výrazně jednodušší a méně nákladné než stanice popsané v kapitole 5.2.1. Pro určení korekce je potřeba znát přesnou polohu referenční stanice a měřenou polohu přijímačem. Přijímače GPS s výstupem zeměpisných souřadnic jsou obvyklým zařízením. Jejich pořizovací cena je nižší vzhledem k přijímačům s výstupem zdánlivých vzdáleností. Určenou pozici zatěžují chybou měření, která je definována v manuálu přístroje a liší se volbou typu přístroje. Pro rozlišení stárí korekcí je možné použít informace z komunikační věty RMC přijímače, která obsahuje čas příjmu polohy.

Výhodou tohoto typu stanic je jednoduchá konstrukce a nízká pořizovací cena dílčích bloků. Nevýhoda spočívá v nižším zpřesnění korekcemi. Ty nemají tak vysokou korekční schopnost jako korekce zdánlivých vzdáleností.

5.3 KOREKCE A PŘESNOST DGPS

Korekce jsou data, která slouží ke zpřesnění měření polohy. Podle doporučení RTCM SC-104 musí mít generovaná korekce vždy takové znaménko, aby je pozorovatel přičítal ke změřené hodnotě.

Přenos korekcí se provádí přes komunikační kanál mezi referenční stanicí a objektem jehož polohu korigujeme. Komunikačním kanálem se rozumí bezdrátový radiový přenos, který může být volně realizován na frekvencích 400MHz nebo 800MHz. Formát vysílaných korekcí je nezávisle na jejich obsahu stejný. Rámecem zprávy je start a stop bit, které ohraničují samotná data. Pro zpřesnění zdánlivých vzdáleností se jedná o sadu korekcí pro měření k jednotlivým družicím. U úprav souřadnic polohy vysílána data obsahují korekce pro zeměpisnou šířku, délku a výšku. V obou případech je pak k těmto informacím doplněn záznam o čase generování a další informační údaje.

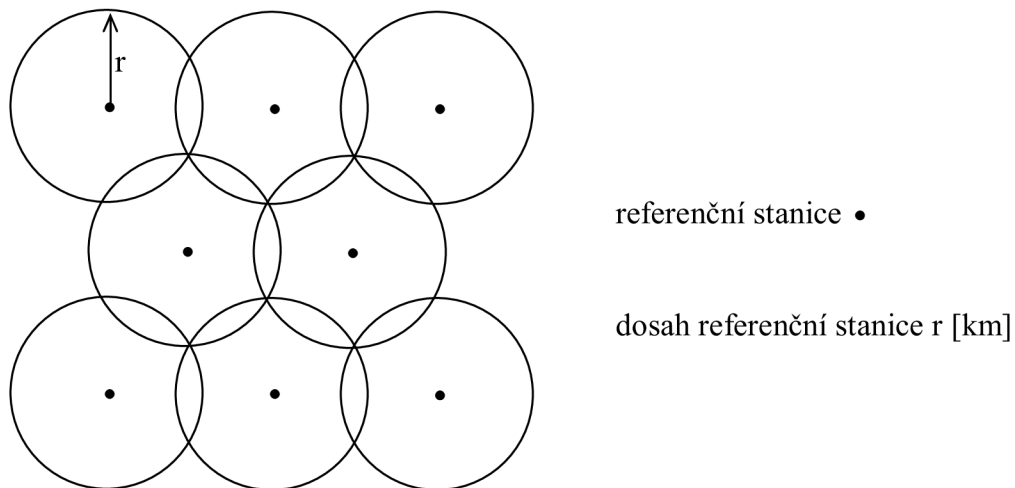
Přesnost diferenčního měření ovlivňuje několik faktorů. Diferenční metody se využívají k potlačení chyb, které působí na referenční stanici i pozorovatele stejnou měrou. Do této skupiny patří hlavně ionosferické a troposferické zpoždění, chyba efemerid nebo časové základny družic. Tyto faktory jsou detailně konzultovány v kapitole 4. K úplnému vykompenzování těchto nepřesností dojde v ideálním případě ve chvíli, kdy je pozorovatel velmi blízko referenční stanici

a vysílané korekce prakticky okamžitě přijímá. Za takových podmínek je chyba metody nejmenší. Jedná se o nejlepší dosažitelnou hranici, která je dána například chybou přijímačů nebo nepřesnostmi výpočtů (lze dosáhnout přesnosti až 10cm). Se zvětšující se vzdáleností dochází ke vzniku nestejných podmínek, které nemohou být korekcí správně potlačeny.

Kromě vzdálenosti má na celkovou chybu měření vliv i stáří používané korekce. Při použití aktuálních dat jsou správně potlačeny vlivy působící nepřesnost. Starší korekce obsahuje hodnoty, které již neodpovídají měřicím podmínkám. Nedochozí tedy k potlačení chyby polohy a pro výpočet se stává neplatná (již se nesmí použít).

5.4 POPIS SYSTÉMU WADGPS

Princip systému diferenční GPS, který je popsán v kapitole 5.1, je omezen pouze na určitou oblast v okolí referenční stanice. V závislosti na potřebách aplikace je možné rozšířit síť libovolným počtem referenčních stanic, které pokrývají požadované území. Rozmístění jednotlivých stanic je zakresleno na obrázku 5.4.



Obr. 5.4 : Pokrytí území referenčními stanicemi pro systém WADGPS

WADGPS je založena na užití měřicích stanic, které jsou rozprostřeny po pracovní oblasti. Každá z nich měří ke všem viditelným družicím a vyhodnocuje modely chyb, které jsou následně sjednoceny v centrální stanici. Přes komunikační družice jsou poté zprostředkovány všem uživatelům systému v dané oblasti, kteří je použijí pro určení své polohy. Příkladem je WAAS (*Wide Area Augmentation System*) nebo EGNOS. Ty vznikly jako rozšíření systému GPS pro zkvalitnění jeho výsledků, ale pro příjem takto poskytovaných korekcí je nutné, aby byla v přijímači zabudována speciální podpora.

6. PRINCIPY MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE

Tato kapitola se věnuje celkovému přehledu možností měřit magnetické pole Země za účelem určení přesné orientace objektu na jejím povrchu. Mimo přístupů k realizaci elektronických kompasů je konzultován také klasický kompas. Ten je i přes svoji nevhodnost pro použití v moderních měřicích systémech stále nedílnou součástí mnoha strojů a zařízení. Jedním z příkladů zůstává s nejčtenějším zastoupením loďná doprava.

6.1 HISTORIE KOMPASU

Při pohledu na historický vývoj kompasu jako nástroje pro navigaci pochází první zmínky z Číny a to již z období 1000 let našeho letopočtu. Již dříve (400 let před naším letopočtem) používali vlastnosti kvádrů z magnetovce pro orientaci místností v budovách tak, aby byly v souznění se silami Země. Později sestrojili s pomocí zmíněného kvádrů první kompas pro navigační účely. Jednalo se o zařízení skládající se z nádoby s vodou, na jejíž hladině plula dřevěná destička. K této podložce byl připevněn magnetovec vhodného tvaru. Při rotaci s nádobkou se poté destička na hladině otáčela stále směrem k magnetickému severu.

V pozdější době došlo ke zdokonalení mechanismu kompasu, avšak základní princip je totožný s originálním návrhem. Vždy se jedná o těleso s magnetickými vlastnostmi (střelka kompasu), které má možnost se pohybovat (rotace na hrotu), uložené v definovaném prostředí. Dříve užívaná nádoba s vodou byla nahrazena uzavřeným prostředím, jenž bývá naplněno olejem (mezi další užívané patří například petrolej). Hlavní výhodou oproti dalším navigačním prvkům je, že jeho provoz nevyžaduje žádné přídavné napájení. Jeho ovládání je velmi jednoduché a není také omežován stíněním okolního prostředí jako systém GPS. Zde může docházet ke ztrátě signálu vlivem stromů, budov atd. Příklad současného přenosného kompasu je na obrázku 6.1.

Dnes jsou pro potřeby navigace využívány modernější postupy, které umožňují zapojení senzorů do složitějších měřicích systémů. Do této skupiny patří elektronické kompas, které poskytují měřená data v digitální nebo analogové podobě. To umožňuje jejich další zpracování v komplexních navigačních

produktech, které jsou používány v lodní (automobilové) dopravě a dalších odvětvích. I přesto se u lodní dopravy současně používá klasického kompasu jako záložního prvku vzhledem k jeho nezávislosti na napájení.



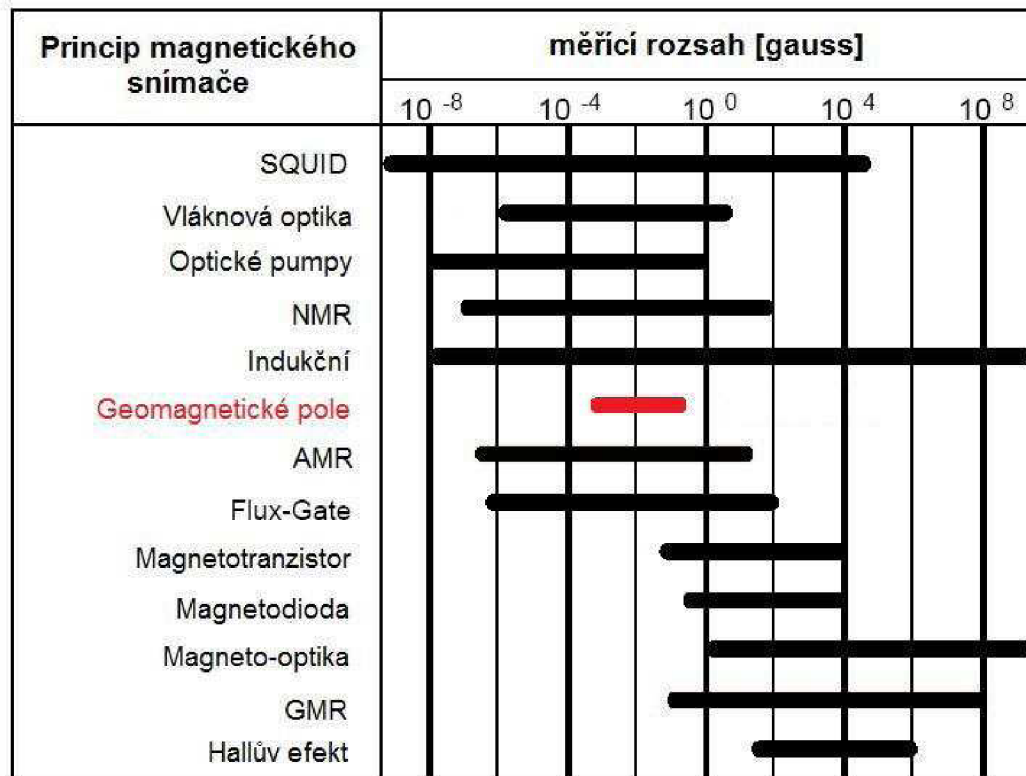
**Obr. 6.1 : Příklad ručního kompasu s možností určení
azimutu [8]**

6.2 ELEKTRONICKÝ KOMPAS

Jak již bylo zmíněno v kapitole 6.1, je klasický kompas pro potřeby robotiky nepoužitelný. Při jeho užití by bylo potřeba realizovat vyhodnocení změny směru střelky tak, aby se data mohla dále použít ve výpočetních objektech (počítač, mikroprocesor) robota. Jedním z řešení je použít algoritmů pro zpracování obrazu ze snímací kamery, které by sledovaly pohyb střelky. Realizace takového zařízení by však byla velmi náročná a celková cena nepoměrně vysoká. Pro praktické aplikace v robotice jsou tedy nutné jiné postupy měření geomagnetického pole.

Vhodnějším řešením je využití elektronického kompasu. Jedná se o elektronické obvody, které jsou založeny na magnetometrech. Magnetometr je určen pro měření magnetické indukce jedné nebo více složek daného magnetického pole. V závislosti na zvoleném principu konstrukce se mění jejich rozsahy měřené

indukce. Na obrázku 6.2 je zobrazena tabulka s vybraným přehledem principů a k nim odpovídající rozsahy měřených indukci.



Obr. 6.2 : Měřicí rozsahy různých principů magnetometrů [9]

Rozsahy měřených hodnot jsou v tabulce uvedeny s jednotkami *gauss*. Pro přepočítání lze vyjádřit rovnici, kde 1gauss je roven 10^{-4} T. Z obrázku 6.2 je patrné, že vzhledem k přesně definovanému rozpětí hodnot odpovídajících geomagnetickému poli nelze aplikovat jakékoliv z řešení. Některé z možných návrhů jsou tyto:

- Flux-Gate magnetometry
- Indukční magnetometry
- AMR magnetometry
- GMR magnetometry
- Magnetometry s Hallovým jevem

V následujících podkapitolách jsou podrobně popsány principy, parametry a aplikace zmíněných magnetometrů. Základní myšlenka využití magnetometrů v elektronickém kompasu je založena na použití alespoň dvou snímačů. Ty jsou připevněny na podkladu a svírají spolu pravý úhel. Tím je zajištěno měření jednotlivých složek výsledného vektoru B magnetické indukce geomagnetického pole. Výsledný úhel se poté vypočítá za pomoci trigonometrických funkcí dle vzorce 6.1.

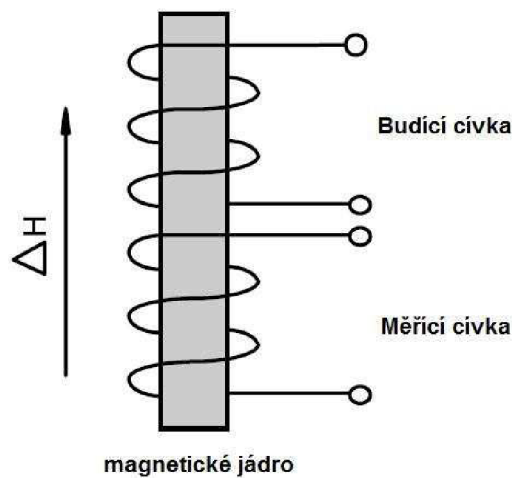
$$\psi = \arctan\left(\frac{B_y}{B_x}\right) \quad (6.1)$$

Hodnoty B_y , B_x odpovídají změřeným hodnotám magnetometrů v osách roviny. Vypočítaný úhel ψ svírá osa x se spojnicí středu souřadnic a magnetického severního pólu. Vzhledem k možnosti rotace objektu v prostoru po uzavřené kružnici nabývá hodnot 0° až $359,9^\circ$. Kde 0° je přímý směr k severnímu pólu a dále narůstá ve směru hodinových ručiček. Směr na východ je tedy indikován 90° , jih 180° a pro západ je to 270° .

6.2.1 Flux-gate magnetometry

Flux-gate magnetometry jsou jedny z nejběžnějších magnetometrů, které jsou používány v navigační technice – kompasech. Byly vyvinuty již kolem roku 1928 pro vojenské účely. Jednalo se o přístroje pro vyhledávání ponorek, které byly hrozbou spojeneckým lodím.

Princip snímače využívá dvojice cívek, jež jsou navinuty na feromagnetickém jádře. Grafické zobrazení jednoosého flux-gate snímače je na obrázku obr. 6.3. Materiálem vhodným pro tento typ jádra je například permalloy. Řídící signál je přiváděn na budící cívku a vyhodnocení probíhá na základě signálu z měřicí cívky. Jak již bylo řečeno, jedná se o jednoosý snímač, který je citlivý na změny pole ve směru šipky ΔH .



Obr. 6.3 : Nákres principu jednoosého Flux-gate magnetometru [9]

Snímač je buzen signálem obdélníkového průběhu s definovanou frekvencí, která je nejčastěji 10kHz. Tento signál způsobuje oscilace jádra mezi body saturace. Vlivem změn vnějšího magnetického pole dochází ke změnám magnetické indukce jádra snímače. Signál výstupní (měřicí) cívky je přes jádro svázán s budícím signálem. Popsané jevy v jádře způsobí změny amplitudy ve vyhodnocovaném průběhu. Pro získání hodnoty magnetické indukce je signál dále zpracováván ve fázovém detektoru a filtrován přes dolní propust.

Konstrukce kompasu vyžaduje snímání složek pole alespoň ve dvou osách celkového vektoru. Snímač navržený na obrázku 6.3 je tedy nutné použít dvakrát a jejich směry citlivosti nastavit kolmo na sebe. Výhodnějším řešením je použití toroidového jádra místo zmíněného tyčového tvaru. Tato varianta umožňuje namotat přímo dvě snímací cívky v požadovaném natočení. Po získání dat z jednotlivých magnetometrů je již aplikován vzorec 6.1. Další možností práce s flux-gate magnetometry je vyhodnocování změny odporu nasyceného jádra. Tyto změny jsou opět ovlivňovány vnějším magnetickým polem v okolí snímače.

Z hlediska frekvenčního rozsahu změn jsou tyto magnetometry schopny měřit od statických polí (neměnných) až po frekvence 1kHz (ovlivněno volbou frekvence budícího signálu 10kHz). Odpovídající měřicí rozsahy jsou zobrazeny v tabulce na obrázku 6.2. Nevýhodou při nasazování v praktických aplikacích je velikost těchto zařízení vzhledem k ostatním integrovaným snímačům.

6.2.2 Indukční magnetometry

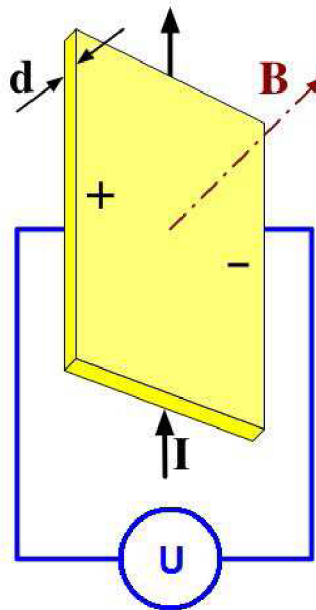
Na rozdíl od předchozího principu jsou indukční magnetometry používány až od roku 1990. Základním prvkem senzoru je cívka namotána na feromagnetickém jádře, ve kterém vlivem okolního geomagnetického pole dochází ke změnám permeability. Při vyhodnocování signálu se využívá L/R oscilátoru, kde je prvek indukčnosti L zastoupen popsanou měřicí cívkou. K udržení lineární oblasti se využívá posuvu vlivem připojeného stejnosměrného napětí na cívce. Při změně magnetického pole pak dochází k změně výstupní frekvence oscilátoru. Její vyhodnocení je již poměrně snadné například pomocí čítače v mikroprocesoru.

Výhodou indukčních magnetometrů je jejich jednoduchá konstrukce a nízká cena a také spotřeba. Oproti flux-gate snímačům mají navíc podstatně širší měřicí rozsah, jak plyne z obrázku 6.2.

Popsaný princip umožňuje měření opět pouze jedné osy výsledného vektoru magnetického pole. Pro použití ke konstrukci kompasu je nutné, stejně jako v kapitole 6.2.1, aplikovat alespoň dva snímací prvky v definovaném rozložení. V tomto případě musí být výsledný snímač mechanickou konstrukcí udržován nezávislý na náklonu robota (v současnosti se již používá ojedinele) nebo je nutné využít trojosého magnetometru s korekcí náklonu.

6.2.3 Magnetometry s Hallovým jevem

Jak již z názvu vyplývá, je základem těchto snímačů aplikace Hallova jevu. Pokud polovodičovou (nejčastěji monokrystalickou) destičkou o určité tloušťce d protéká proud I , dochází vlivem působení vnějšího magnetického pole B k vychylování nosičů ve směru kolmém na směr pohybu. Vzniká tak potenciálový rozdíl U na příčných vývodech desky. Toto napětí je přímo úměrné protékajícímu proudu, magnetické indukci a nepřímo úměrné tloušťce desky. Grafický popis principu je na následujícím obrázku 6.4.



Obr. 6.4 : Nákres principu Hallova jevu [10]

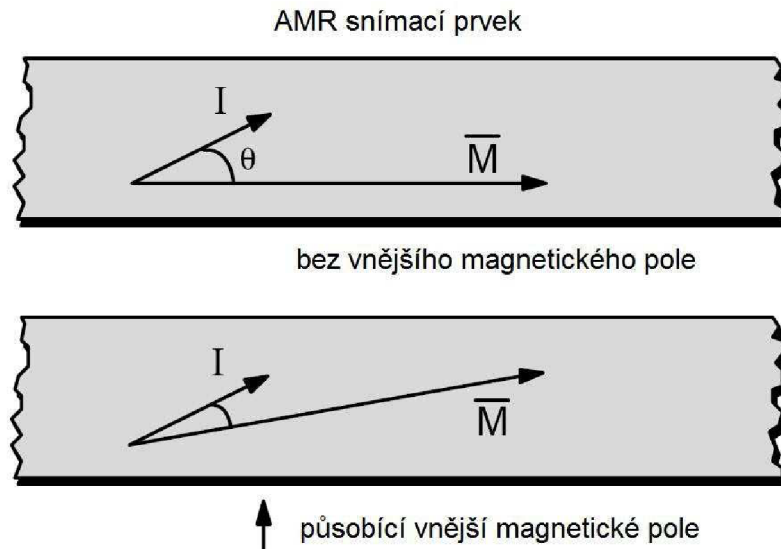
Tohoto principu lze využít pro měření magnetických polí a následné realizaci spínačů, snímačů otáček nebo posunutí a také kompasů. Nejčastěji se jedná o obdélníkové destičky s tloušťkou 5 – 8 μ m, které jsou vyráběny z křemíku, GaAs nebo InSb. V závislosti na kvalitě dosahují přesností 0,7 až 5% a rozsahy pracovních teplot jsou řádově 100 $^{\circ}$ C. Celkové výstupní napětí snímače je mimo jiné závislé na Hallově součiniteli pro daný materiál. Ten vykazuje určitou teplotní závislost a je tedy nutné zajistit její kompenzaci.

6.2.4 AMR magnetometry

Další skupinou jsou AMR (*Anisotropic magnetoresistive*) magnetometry, které patří do skupiny senzorů založených na magnetorezistivním jevu. Ten byl poprvé pozorován v roce 1856 Williamem Thomsonem. Společně s technologií tenkých vrstev je tak umožněno vytvářet snímače využívající daný jev, které jsou lehce aplikovatelné v širokém spektru úloh.

AMR senzory jsou vyrobeny z tenkého permalloyového filmu na křemíkovém substrátu ve formě odporového prvku. Pro zajištění správné funkce je potřeba již při výrobě senzoru dosáhnout jednotného směru magnetických domén vrstvy. Toho je docíleno působením velmi silného magnetického pole, které nastaví všechny domény do směru M . Protékající proud poté svírá s tímto vektorem určitý

úhel θ . Při působení vnějšího magnetického pole dochází k vychýlení vektoru M a tím i ke změně velikosti úhlu θ . Popsaný jev je zobrazen na obrázku 6.5.

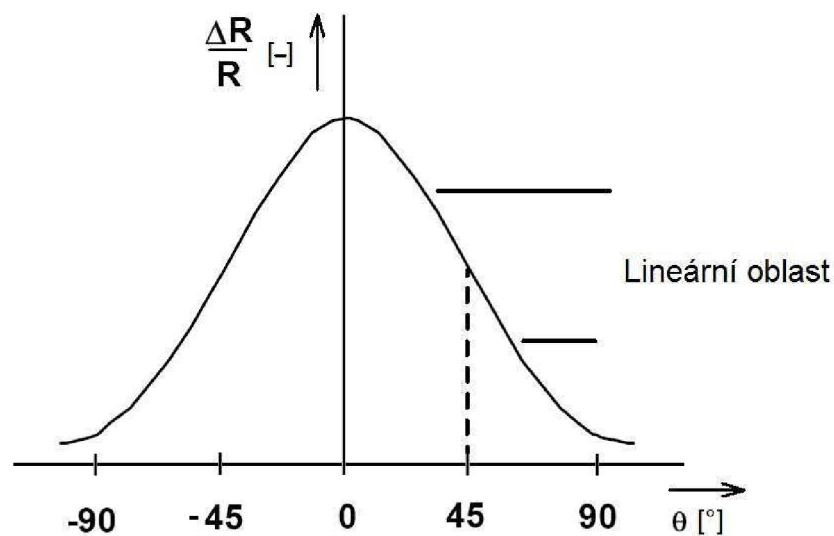


Obr. 6.5 : Změna orientace domén AMR senzoru při působení mag. pole [9]

Hodnota odporu tenkého filmu se mění právě v závislosti na hodnotě definovaného úhlu θ , který je závislý na zjišťovaném působícím poli v jeho okolí. K vyhodnocení se užívá standardních metod pro měření odporu. AMR senzory se zapojují do mostů a nejčastěji bývá použit Wheastonův most. Popsaná závislost je zobrazena v grafu na obrázku 6.6.

Z průběhu charakteristiky je patrné, že relativní změna hodnoty odporu AMR snímače má pro rostoucí hodnotu úhlu θ od 0° do 90° klesající nelineární průběh. Maximální hodnota $\Delta R/R$ se rovná 2 – 3% v závislosti na kvalitě výroby. Pro záporné hodnoty je průběh souměrný podle osy hodnot změn odporu. Vzhledem ke zmíněné nelinearitě průběhu je pracovní oblast snímacího prvku posunuta jen do určité části charakteristiky, kterou lze považovat za lineární. Z obrázku 6.5 je patrné, že při nepůsobícím vnějším poli svírají vektory proudu a magnetické orientace domén úhel $\theta = 45^\circ$. Tím je nastaven pracovní bod snímače do středu

lineární části charakteristiky a při vychýlení vektoru M jsou tak potlačeny vlivy nelinearity závislosti.



Obr. 6.6 : Průběh závislosti relativní změny odporu na úhlu θ [9]

Magnetometry AMR jsou schopny měřit od statických polí až po frekvence řádově 1MHz. Jejich přesnost je velmi dobrá a s širokým pracovním rozsahem (porovnání na obrázku 6.2). Další výhodou je nízká spotřeba energie a možnost snadné integrace vzhledem k jejich malým rozměrům. Velký počet aplikací pro různá odvětví (automobilový průmysl, detekce předmětů, měření proudu, navigace, ...) společně s možností hromadné výroby způsobili prudký pokles ceny oproti ostatním principům. V současnosti jsou těmito magnetometry nahrazovány dříve často používanými snímači s Hallovou sondou.

Do skupiny snímačů využívající magnetoresistenční jev spadají také GMR magnetometry (*giant magnetoresistance*). Jejich struktura je složitější než u AMR prvků. Jedná se o dvě tenké vrstvy feromagnetické látky oddělené nemagnetickým materiálem. Vlivem vnějšího pole poté dochází ke změně odporu v rozsazích až 70%. Z obrázku 6.2 je patrné, že hodnoty měřených polí jsou podstatně vyšší než u snímačů s anizotropní magnetorezistencí.

7. REALIZACE NAVIGAČNÍHO SUBSYSTÉMU

V předchozích kapitolách byl popsán teoretický princip funkce satelitní navigace a také možnosti měření magnetických polí pomocí elektronického kompasu. Tato část je již zaměřena na popis návrhu a realizace navigačního systému robotu, který je primárně určen pro vnější použití. Základem je určení polohy s aplikací DGPS metody pro zpřesnění souřadnic uživatele.

Kapitola je členěna do bloků, které se týkají nejprve hardwarové a poté softwarové realizace prvků systému. Tento popis je pro přehlednost rozdělen zvlášť pro referenční stanici a pozorovatele (robotu). Závěr kapitoly se věnuje praktickému ověření funkčnosti celého systému.

7.1 HARDWAROVÉ ZAPOJENÍ ROBOTU

Hardwarová část navigačního subsystému robotu se zakládá na GPS přijímači od firmy Magellan s typovým označením DG14. Podmínkou správné funkce DGPS uspořádání je použití totožných modulů přijímače na straně referenční stanice i pozorovatele. Na obrázku 7.1 jsou zobrazeny zmíněné GPS moduly včetně mechanického zabezpečení pro aplikaci v terénu.



Obr. 7.1 : Moduly Magellan DG14 pro realizaci DGPS

Každý z modulů je vybaven rozhraním pro připojení napájení 5V DC. Přijímač umístěný na robotu využívá pro napájení rozhraní USB přímo ze základní desky zabudovaného počítače. Dle manuálu výrobce [7] je definovaná přesnost určení polohy horizontálních souřadnic 0,9m a pro určení výšky je to 1,6m. Z pohledu provozu ve venkovních podmínkách je důležitý teplotní rozsah pro funkci zařízení. Moduly DG14 je možné provozovat v rozmezí teplot od -30°C do 70°C. Další parametry udávané výrobcem jsou shrnuty v tabulce 7.1.

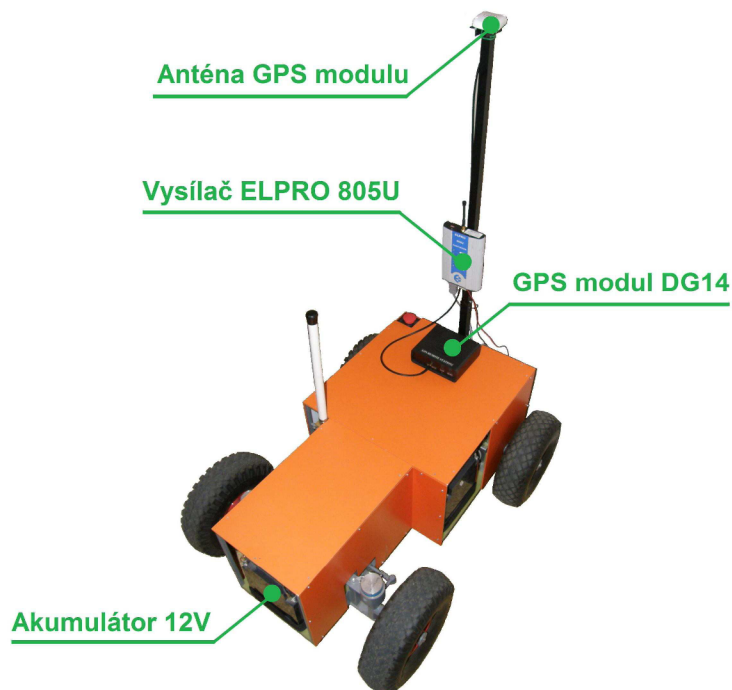
Tab. 7.1 : Charakteristické parametry GPS modulu Magellan DG14

Název parametru	Hodnota parametru
Horizontální přesnost CEP [m]	0,4
Horizontální přesnost [m]	0,9
Vertikální přesnost [m]	1,6
Cold start [s]	90
Warm start [s]	35
Hot start [s]	11
Počet kanálů	14
Obnovovací frekvence [Hz]	1, 2, 5, 10, 20
Rychlost RS232 [Baud]	< 115 200
Napájení [V]	5 DC

Dále jsou zde dvě komunikační rozhraní RS 232 označeny jako *PortA* a *PortB*. *PortA* je využíván pro připojení GPS k robotu (připojen je do jednoho z COM portů počítače). Další možností je využití převodníku RS232-USB a následné využití komunikace přes USB rozhraní. Taková varianta je vhodná například při využití notebooku jako výpočetní jednotky. Při nastavení parametrů komunikace se používá defaultní nastavení výrobce:

- komunikační rychlost 9600 baud
- stop bitů 1
- datových bitů 8
- bez paritního bitu

Druhý *PortB* se používá pro připojení bezdrátového modulu ELPRO 805U, který se stará o bezdrátovou komunikaci s referenční stanicí. Oba přijímače jsou vybaveny externí anténou, která je připojena přes koaxiální kabel a SMA koncovkou. Tato anténa by měla být umístěna co nejvýše, aby nebyla kryta okolním prostředím. Zmíněnou podmínku lze při aplikaci navigace robotu splnit pouze částečně. V jeho zadní části je připraven speciální „stožár“, který slouží pro uchycení kamery. S výhodou bylo využito tohoto konstrukčního prvku a anténa společně s bezdrátovým modulem byly umístěny na jeho vrchol. Popsané uspořádání je zobrazeno na obrázku 7.2.



**Obr. 7.2 : Umístění prvků navigačního systému
na robotu**

V předchozím textu byl zmíněn bezdrátový komunikační modul ELPRO 805U, který slouží pro příjem diferenciálních korekcí polohy od referenční stanice. Jeho umístění na robotu je zobrazeno na obrázku 7.2. Detailní pohled na tento modul přijímače/vysílače je na obrázku 7.3.



Obr. 7.3 : Bezdrátový modul vysílače/přijímače ELPRO 805U

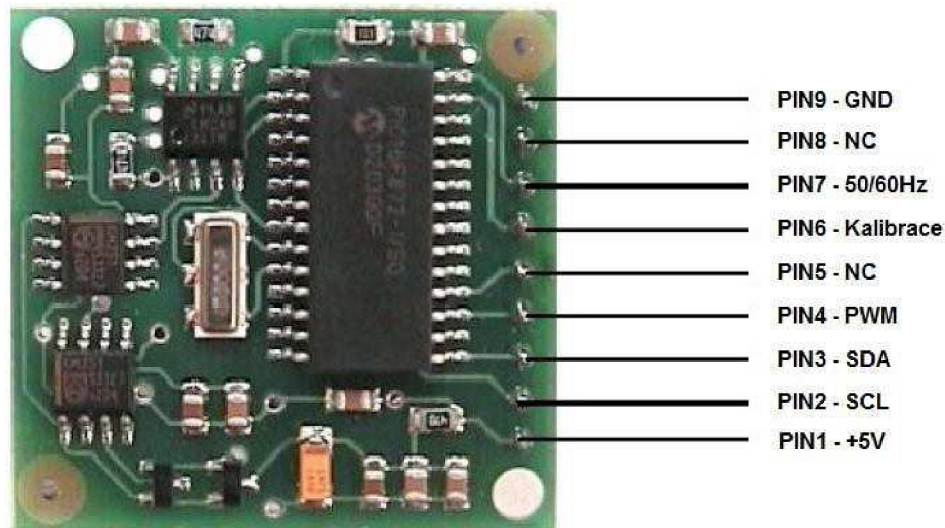
Pro komunikaci lze mimo použitého rozhraní RS232 připojit také RS485. Bezdrátový radiový přenos je realizován v pásmu volných frekvencí. Přesná frekvence, kterou zařízení používá, je 869 MHz. Napájení 12V DC je připojeno na hlavní baterii robotu, která slouží jako zdroj napětí pro elektronické obvody. Další specifikace jsou zapsány v tabulce 7.2.

Tab. 7.2 : Charakteristické parametry bezdrátového modulu ELPRO 805U

Název parametru	Hodnota parametru
Frekvence [MHz]	869,4 - 869,65
Šířka kanálu [kHz]	250
Dosah (přímá viditelnost) [Km]	5
Vysílací výkon [mW]	500
Datový tok Serial [baud]	1200 – 115200
Datový tok Radio [baud]	19200, 38400, 76800
Rozhraní	RS232, RS485
Napájení [V]	10-30 DC, 10-24 AC

Dalším snímačem, který tvoří navigační subsystém robotu je elektronický kompas CMPS03. Daný kompas je vytvořen speciálně pro účely robotiky. Měření magnetického pole Země se provádí pouze ve dvou osách, proto je celé zařízení

velmi náchylné na jakékoli náklony z vodorovné polohy. Na obrázku 7.4 je zobrazen magnetometr společně s popisem vývodů.

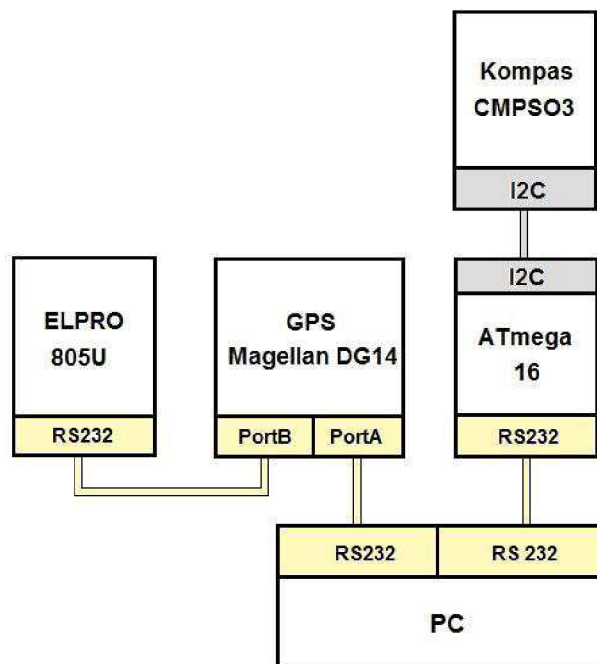


Obr. 7.4 : Elektronický kompas CMPS03 s popisem pinů [11]

Z obrázku 7.4 je patrné, že snímač umožňuje podávat informace o měřeném azimutu na PWM výstup (PIN4). Časová délka pulsu se na stupňovou míru přepočítává na základě rovnice $100\mu\text{s} = 1^\circ$ (od měřené hodnoty je nutné odečíst offset 1ms). Druhým způsobem je komunikace přes sběrnici I2C (PIN3,2) s připojeným mikroprocesorem (tato varianta je realizována v našem robotu, kde je využito ATmegy16). Ten slouží jako převodník I2C na sériové rozhraní RS232, přes které je již připojen k výpočetní jednotce robotu. Samotný magnetometr je dále napájen 5V DC (PIN1, zem na PIN9) a umožňuje uživateli provádět kalibraci (PIN6), případně zapnout filtraci 50/60Hz (PIN7). Zbylé piny zůstávají nevyužity. Popis komunikace po I2C a algoritmy práce mikroprocesoru nejsou dále konzultovány, protože nejsou předmětem zadání. Jedná se o přehledový popis realizace s konstatováním, že výsledkem jsou výstupní hodnoty azimutu v rozsahu $0^\circ - 359,9^\circ$. Tato data jsou zpracovávána navigačním algoritmem.

Popsané hardwarové uspořádání snímačů navigačního systému robotu je základem pro realizaci programového vybavení vyšších řídicích algoritmů. Ty jsou

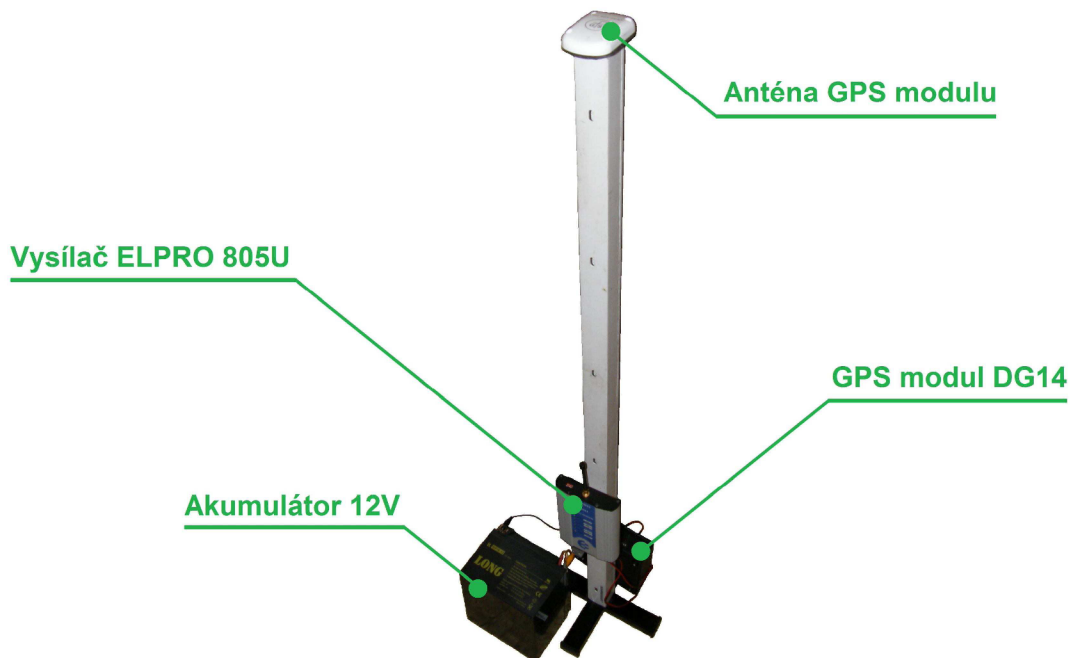
popsány v následující kapitole 7.3. Na obrázku 7.5 je blokové schéma popsaného uspořádání senzorů.



Obr. 7.5 : Blokové schéma navigačního subsystému robotu

7.2 HARDWAROVÉ ZAPOJENÍ REFERENČNÍ STANICE

V předchozí kapitole bylo popsáno hardwarové zapojení navigačního subsystému robotu. Teoretický rozbor DGPS zahrnuje také realizace referenční stanice, která je označena “*Base station*“. Obrázek 7.6 zobrazuje použitou stanici. Základem je zmíněný GPS přijímač Magellan DG14, který je podrobně popsán v kapitole 7.1 a parametry jsou shrnuty v tabulce 7.1.



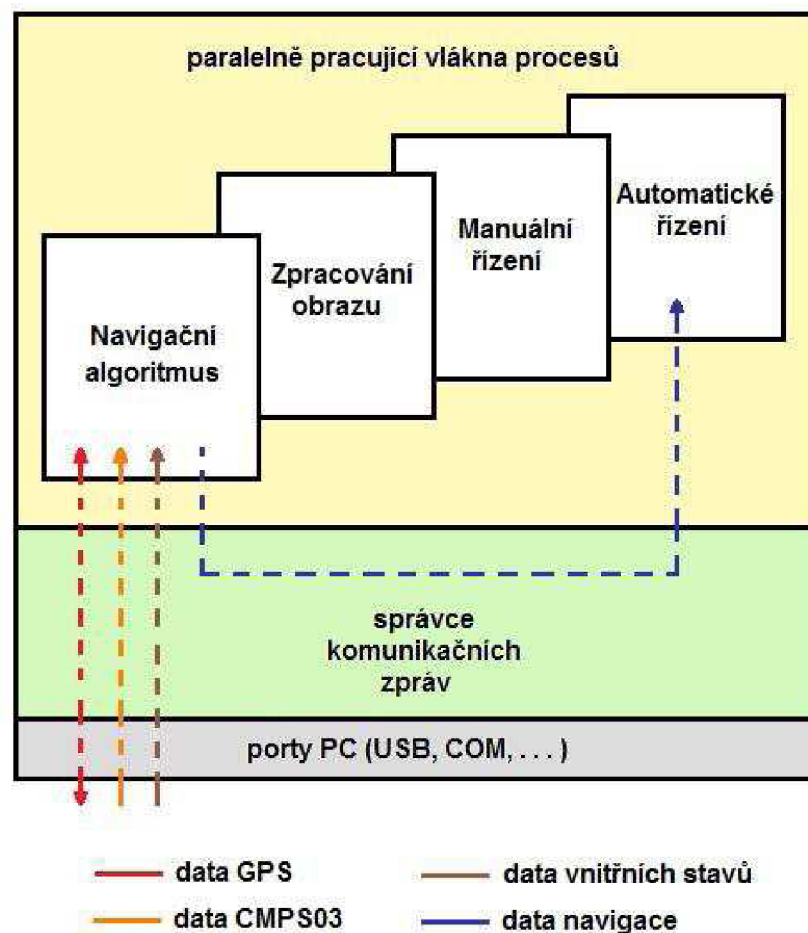
Obr. 7.6 : Referenční stanice pro realizaci DGPS

Pro přenos generovaných korekcí slouží bezdrátový modul ELPRO 805U (podrobný přehled parametrů v tabulce 7.2) umístěný na stožáru stanice a k GPS přijímači je připojen přes *PortB*. Zbývající RS232 port označený *PortA* je využit k připojení počítače s ovládacím softwarem. Přítomnost počítače je nutná jen při prvním nastavování parametrů přijímače nebo jejich změně, v ostatních případech není připojení PC nutné (s výhodou jej však lze použít pro detailní sledování stavu stanice). Popisem ovládání programu pro referenční stanici a jeho možnostmi se podrobně zabývá kapitola 7.4.

Napájení je realizováno akumulátorem 12V/26Ah. Vzhledem k nutnosti mobility stanice a její provozování i v oblastech bez elektrické sítě je bateriové napájení ideálním řešením. Dostatečně vysoká kapacita navíc zaručuje dlouhou dobu použití bez potřeby dobíjení. Pro získání napětí 5V (napájení GPS přijímače) je využit stabilizační obvod 7805 v kombinaci s aktivním chlazením.

7.3 PROGRAMOVÉ ZPRACOVÁNÍ NAVIGAČNÍCH DAT

V předchozích kapitolách 7.1 a 7.2 je popsáno fyzické uspořádání a zapojení navigačních snímačů. Prvky vstupující do navigačního programu robotu jsou poté blokově naznačeny na obrázku 7.5. Následující kapitola se tedy věnuje softwarové nastavbě pro zpracování a vyhodnocení dat získaných z GPS a kompasu. Robot je vybaven zabudovaným PC, které slouží jako jeho hlavní výpočetní jednotka. Na počítači je používán operační systém ArchLinux (jak již z názvu vyplývá, jedná se o jednu z distribucí Linuxu). Dále popsané algoritmy jsou realizovány v objektově orientovaném programovacím jazyce C++. Na obrázku 7.7 je naznačena základní struktura řídicího programu robotu.

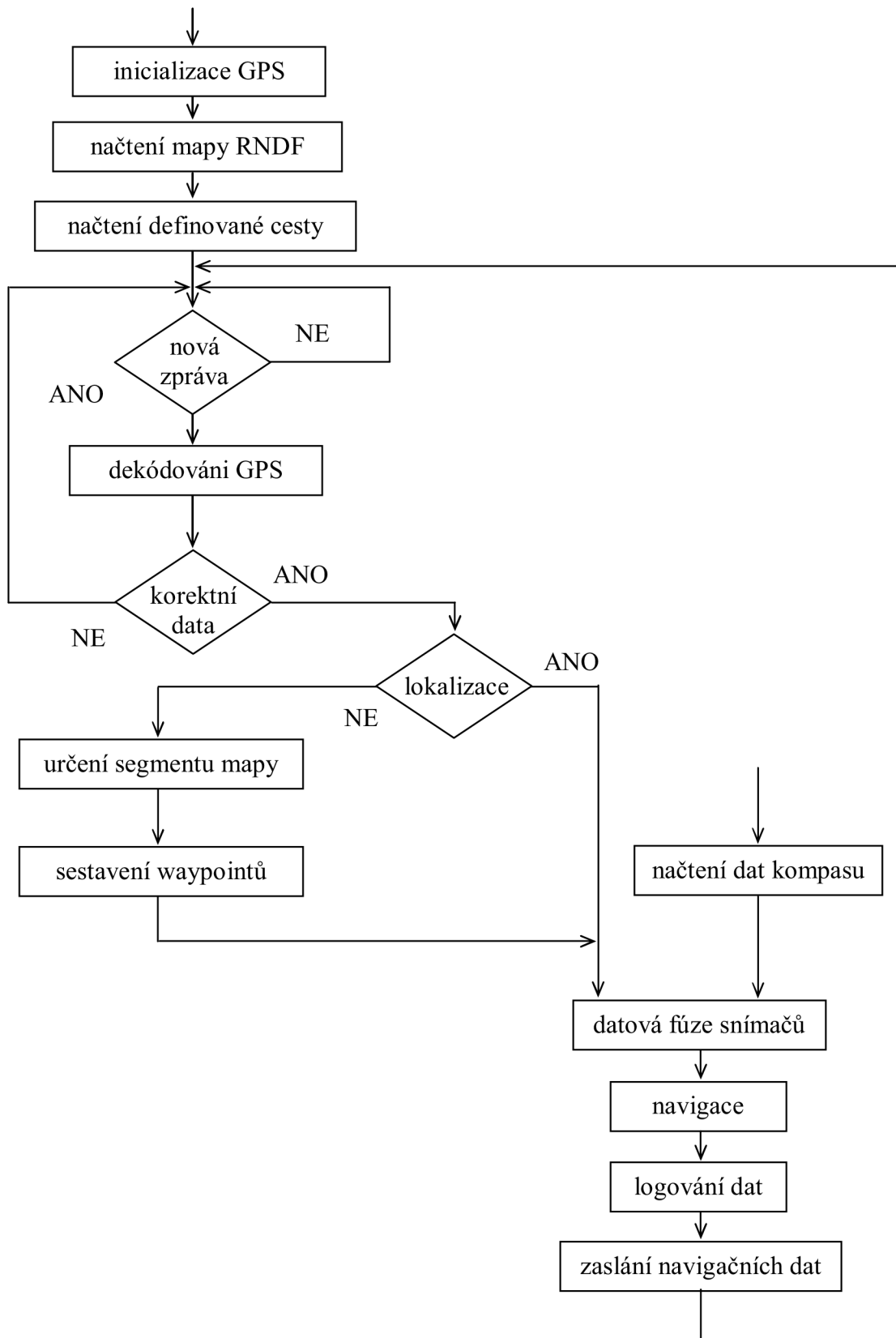


Obr. 7.7 : Základní struktura řídicího programu robotu

Základní řídicí program se skládá ze dvou vrstev, které jsou nástavbou hardwarového vybavení počítače. Prostřední vrstva “*správce komunikačních zpráv*“ zajišťuje komunikaci mezi touto vrstvou a vrstvou paralelně pracujících vláken procesů. Nejvyšší vrstva obsahuje vlákna, která řeší dílčí problémy (navigace, zpracování obrazu, ...). Při předávání dat mezi vlákny nebo mezi vláknem a porty se definují komunikační zprávy. Ty obsahují identifikátor, určení adresy (definice adresáta zprávy) a samotná data. Vytvořené zprávy jsou pravidelně kontrolovány a *správce zpráv* se stará o jejich automatické směrování. Popsaný princip slouží pouze pro popis umístění navigačního algoritmu v celkovém řídicím programu. Podrobná analýza realizace je podstatně složitější, ale její řešení opět není předmětem práce. Dále bude konzultována pouze část věnovaná navigační sekci robotu.

Součástí obrázku 7.7 jsou také naznačené směry a typy dat, které souvisejí s navigačním algoritmem. Jednotlivé cesty zpráv jsou určeny čerchovanou čarou zakončenou šipkou, která definuje směr komunikace. Typ zprávy je rozlišen barevným značením. Vstupní data algoritmu tvoří informace z GPS, kompasu a vnitřní stavové informace robotu (rychlosti poháněné nápravy, natočení předních kol, celková ujetá vzdálenost,...). Výstupní data zastupují zprávy pro GPS (inicializace, vyžádání zprávy, změna nastavení,...) a zpracovávané navigační informace. Ty jsou směrovány do vlákna “*Automatické řízení*“, kde je na jejich základě rozhodnuto o dalším chování robotu.

Kompletní navigační algoritmus je umístěn v jednom z vláken programu, jak ukazuje obrázek 7.7. Vnitřní struktura vlákna je zobrazena vývojovým diagramem, který je na obrázku 7.8. Při spuštění programu dojde k vytvoření daného vlákna a provede se několik inicializačních kroků. Následně je vždy po příchodu nových dat z GPS přijímače provedena sekvence úkolů, na jejichž konci jsou zpracovaná data zaslána řídicímu vláknem. Program se poté vrací zpět na začátek nekonečné smyčky a čeká na příchod nové zprávy.



Obr. 7.8 : Vývojový diagram navigačního algoritmu

Inicializační bloky programu jsou provedeny pouze jednou a to ihned po vytvoření vlákna. Prvním krokem je zaslání nastavení GPS přijímače. Komunikaci lze realizovat dvěma typy zpráv. Nastavovací zprávy jsou určeny pro dlouhodobé definování funkce (periodické posílání NME zpráv, ...), naopak tázací zprávy slouží pro jednorázové získání informace z přijímače. Soupis všech zpráv přijímače včetně popisu jednotlivých parametrů příkazu je součástí dokumentace [7]. Minimální konfigurace pro správnou funkci navrženého navigačního programu je následující:

- Přijímač do režimu *DGPS Remote station* s příjmem korekcí na PortB
\$PASHS,RTC,REM,B
- Zapnutí automatické volby mezi DGPS a GPS určením polohy
\$PASHS,RTC,AUT,Y
- Dynamický režim 3 (maximální rychlost pohybu $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
\$PASHS,DYN,3
- Zapnutí NME zpráv na PortA s opakovací frekvencí 1Hz
\$PASHS,NME,RMC,A,ON,1
\$PASHS,NME,UTM,A,ON,1

Po inicializaci GPS následuje načtení mapy prostředí robotu a požadované sekvence sektorů, kterými má projet. Zadaná mapa je uložena ve formátu RNDF, který definuje přesný protokol k tvorbě prostředí, a program ji načítá z externího souboru "*Mapa.rndf*". Popis jednotlivých prvků souboru s tímto formátováním je v literatuře [12]. Podle této definice jsou všechny cesty v reálném prostředí rozděleny do dílčích virtuálních segmentů, které jsou pojmenovány jedním znakem abecedy a nesou také číselný identifikátor. Pro uložení segmentu v programu je připraven objekt, který jej zastupuje a má následující vlastnosti (v závorce je uveden příklad):

- Jméno segmentu (*D*)
- Index segmentu (*4*)
- Počet vstupů do segmentu (*3*)
- Pole se vstupními segmenty – segmenty, ze kterých do popisovaného segmentu lze vstoupit (*12, 3, 24*)

- Počet výstupů ze segmentu (5)
- Pole s výstupními segmenty – segmenty, do kterých lze z popisovaného segmentu vstoupit (7, 11, 8, 19, 2)
- Počet waypointů v segmentu (3)
- Pole s waypointy seřazenými od vstupu k výstupu ($[X_1, Y_1]$ $[X_2, Y_2]$ $[X_3, Y_3]$)

Celková mapa je poté vytvořena z kompletního listu všech segmentů, které jsou uspořádány do pole dle hodnoty svého indexu. Načtení požadované trasy je provedeno ze souboru, který obsahuje pořadí segmentů, jenž mají být projety. Následující částí vývojového diagramu na obrázku 7.8 je čekání na přijetí zprávy od GPS přijímače. Pro získání dat jsou využívány zprávy RMC a UTM, které byly definovány při inicializaci. Jednotlivá dekódovaná data jsou ukládána do programové proměnné a obsahují následující informace:

- UTC čas
- Příznak validních dat (stav: bez signálu, GPS režim, DGPS režim)
- UTM souřadnice objektu X,Y
- Rychlost objektu
- Azimut objektu
- Počet používaných družic
- Stáří aplikovaných DGPS korekcí

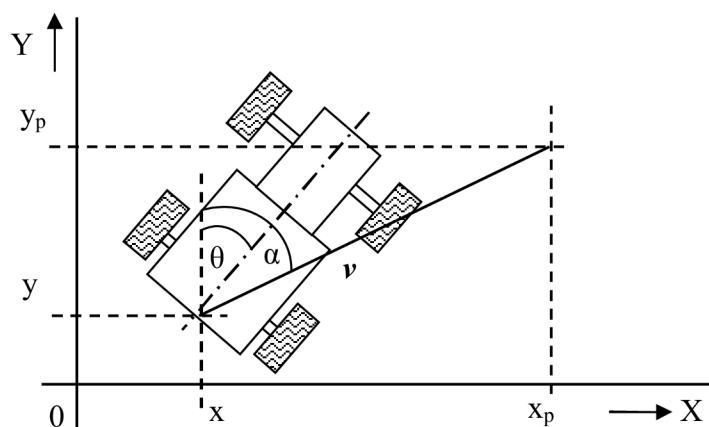
Samotná RMC zpráva udává pozici objektu pomocí zeměpisné šířky a délky. Tato data jsou však dále obtížně zpracovatelná, protože například pro výpočet vzdálenosti dvou bodů nelze užít klasického výpočtu pomocí Pythagorovy věty. Proto se používá převod do souřadného systému UTM (universální transversální Mercatorův systém souřadnic). V tomto systému je určování polohy na povrchu Země založeno na jejím rozdělení do 60 zón. Každá z nich má vlastní střed souřadnic tvořený průsečíkem rovníku a středového poledníku zóny. Od tohoto bodu jsou měřeny vzdálenosti v metrech pro osu x (kladné hodnoty směrem k východu) a osu y

(kladné hodnoty směrem k severu). Určitým omezením je, že výpočty vzdáleností bodů lze provádět pouze v případě, kdy oba náleží do stejné zóny.

Po provedení dekódování zprávy následuje kontrola korektnosti dat. A pokud jsou data konzistentní, mohou být dále zpracovávána. Pokud nebyla provedena lokalizace, dojde na základě zjištěné polohy k určení souřadnic v mapě. Na základě zjištěného segmentu a znalosti požadované trasy je sestavena sekvence waypointů, které jsou postupně voleny jako dílčí cíle robotu. Tento proces je proveden pouze při prvním určení polohy.

Před dalším zpracováním jsou aktuální data vztažena k referenční stanici. Jedná se o úpravu souřadnic polohy (X , Y) pozorovatele odečtením odpovídajících si souřadnic umístění stanice (data zadává uživatel pomocí externího souboru "reference.txt"). Nově vzniklé údaje jsou lépe zpracovatelné při následujících výpočetních operacích. Další výhodou je mnohem srozumitelnější interpretace těchto dat pro uživatele daného systému. Následně je rovnou přistoupeno k datové fúzi s kompasem. Této části je věnována samostatná kapitola 8.

Mimo jiné jsou v rámci datové fúze získány přesné údaje z vnitřních stavů robotu (přesná rychlost, ...). Na základě dané rychlosti je poté rozhodnuto o aplikaci zpřesňujících algoritmů, jako jsou výrobcem implementovaný Kalmanův filtr a také průměrování získané polohy. Aktivace popsaných funkcí je podmíněna nulovou rychlostí pohybu objektu. Dalším krokem je výpočet navigačních dat, která jsou popsána na základě simulované situace na obrázku 7.9.



Obr. 7.9 : Navigační data robotu v prostoru

Robot je v souřadném prostoru X,Y definován vektorem polohy $[x,y]$ a úhlem odklonu od severu θ . Cílový bod je určen souřadnicemi $[x_p,y_p]$ a společně s aktuální polohou definují vektor \mathbf{v} . Velikost tohoto vektoru potom udává zbývající vzdálenost k dosažení bodu a úhel α požadovaný odklon robotu. Rozdíl Δ úhlů θ a α je řídicí veličinou pro změnu směru robotu. Může nabývat hodnot z intervalu $\langle -90^\circ;90^\circ \rangle$, kde záporná hodnota indikuje potřebu zatočení vlevo a naopak kladný údaj odpovídá požadavku na zatočení vpravo. Definovaná data jsou ukládána do programové proměnné s těmito informacemi:

- Validnost navigačních dat
- Příznak vzdálenosti k cíli $< 3\text{m}$
- Průmět vektoru \mathbf{v} do osy X
- Průmět vektoru \mathbf{v} do osy Y
- Vzdálenost k cíli
- Indikace žádaného natočení Δ

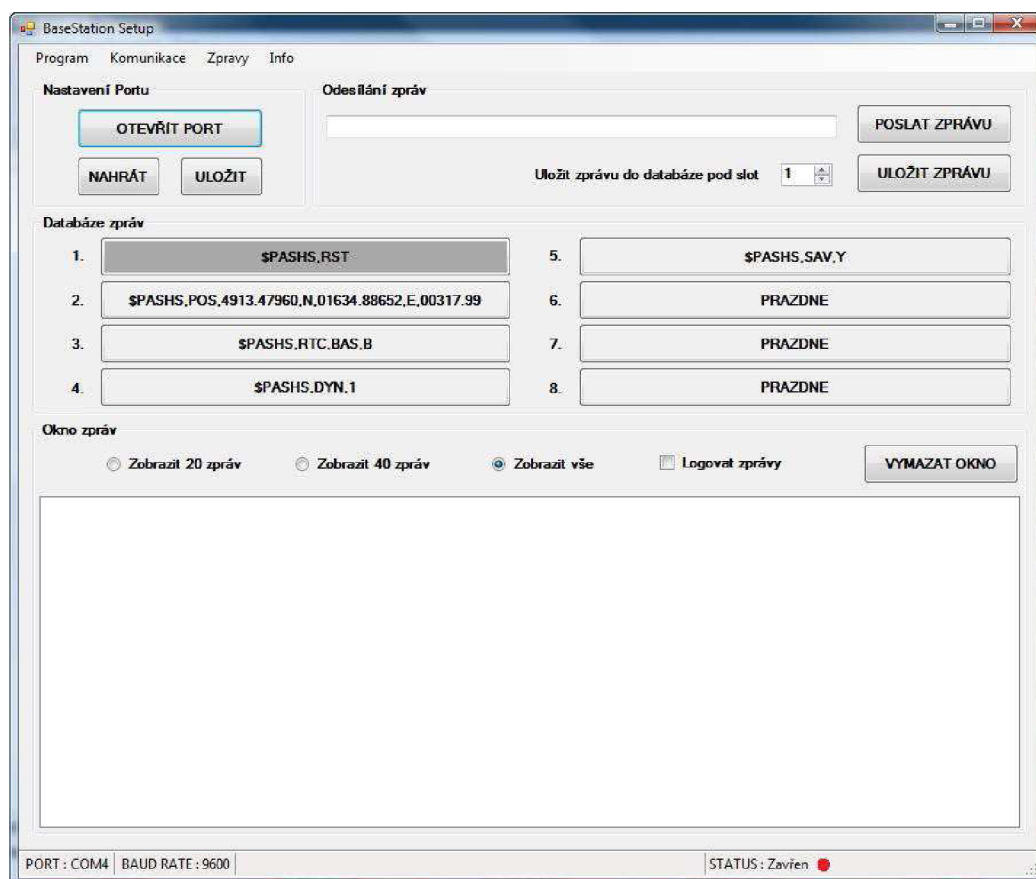
Dalším krokem je jejich zaslání do vlákna *Automatické řízení* pro další zpracování - rozhodování o chování robotu. Po dokončení popsané sekvence úkonů se celý program vrací na začátek a čeká na příchod další zprávy, která jej opětovně spouští.

7.4 PROGRAMOVÉ OVLÁDÁNÍ REFERENČNÍ STANICE

Kapitola 7.3 je věnována hardwarové struktuře referenční stanice pro systém DGPS. V této části je popsána struktura programu, který byl vytvořen za účelem nastavení žádaných parametrů stanice. Realizován je v programovacím jazyce C++ užitím vývojového prostředí Microsoft Visual Studio. Počítač se k referenční stanici připojuje přes RS232 port označený *PortA*. Na obrázku 7.10 je zobrazeno grafické rozhraní programu.

Prvním krokem po spuštění je navázání komunikace. Volba portu a komunikační rychlost lze nastavit v záložce *“Komunikace“* na horní liště programu. Dané nastavení lze zkontrolovat na informačním panelu na spodním okraji okna. Navázání (ukončení) komunikace se provádí tlačítkem *“OTEVŘÍT PORT“*

(“ZAVŘÍT PORT“) v bloku “Nastavení portu“. Uživatel má také možnost si zde aktuální nastavení uložit nebo naopak nahrát. Úspěšné provedení operace je indikováno informační zprávou v “Okně zpráv“.



Obr. 7.10 : Programové rozhraní pro referenční stanici

Po provedení nastavení a otevření komunikačního portu lze pomocí okna “Odesílání zpráv“ zaslat požadovanou zprávu, která je zapsána do editačního pole. Uživatel má také možnost uložit danou zprávu pod jednu z osmi připravených rychlých kláves v sekci “Databáze zpráv“. Tu je nejprve nutné aktivovat v menu “Zprávy“ na horní ovládací liště. Poté jsou zpřístupněna jednotlivá tlačítka s uloženými zprávami. Kliknutím na danou položku je zpráva odeslána a zároveň zobrazena v editačním poli pro případnou úpravu. V základu je přednastaveno 5 zpráv, které definují základní funkci referenční stanice. Jejich postupným zasláním v pořadí 1 až 5 je provedeno:

1. Reset modulu DG14 na defaultní nastavení výrobce
2. Zadání správných souřadnic referenční stanice (antény)
(zeměpisná délka, šířka a výška dle formátu WGS-84)
3. Nastavení modulu DG14 do režimu referenční stanice (*base station*)
s odesíláním korekcí na *PortB*
4. Volba dynamického režimu 1 (statický režim)
5. Uložení nastavení do paměti (automatické načtení po opětovném
zapnutí stanice)

Přijetí každé zasláné zprávy je modulem indikováno pomocí zaslání odpovědi:

- Přijetí zasláné zprávy
\$PASHS,ACK
- Neznámý nebo chybný příkaz
\$PASHS,NACK

Zbývající 3 pole je možné použít pro další požadavky na nastavení. Například zaslání aktuálně určené polohy stanice na *PortA* nebo aktivace/deaktivace Kalmannova filtru.

Zbývající sekci je “*Okno zpráv*“, které slouží k zobrazování aktivity portu a programu. Uživatel má tak možnost sledovat přijaté, odeslané a informační zprávy. Poslední zmíněný typ je využit k předání hlášení o aktivitách programu nebo změnách nastavení, která byla provedena. Pro lepší přehlednost je možné opět v menu “*Zprávy*“ zvolit, které ze zpráv mají být v okně zobrazovány. Stejně tak lze definovat počet zobrazených zpráv na 20, 40 nebo neomezeně. Zaškrtnutím volby “*Logovat zprávy*“ se aktivuje funkce ukládání příchozích zpráv programu do externího souboru “*Datalog.txt*“.

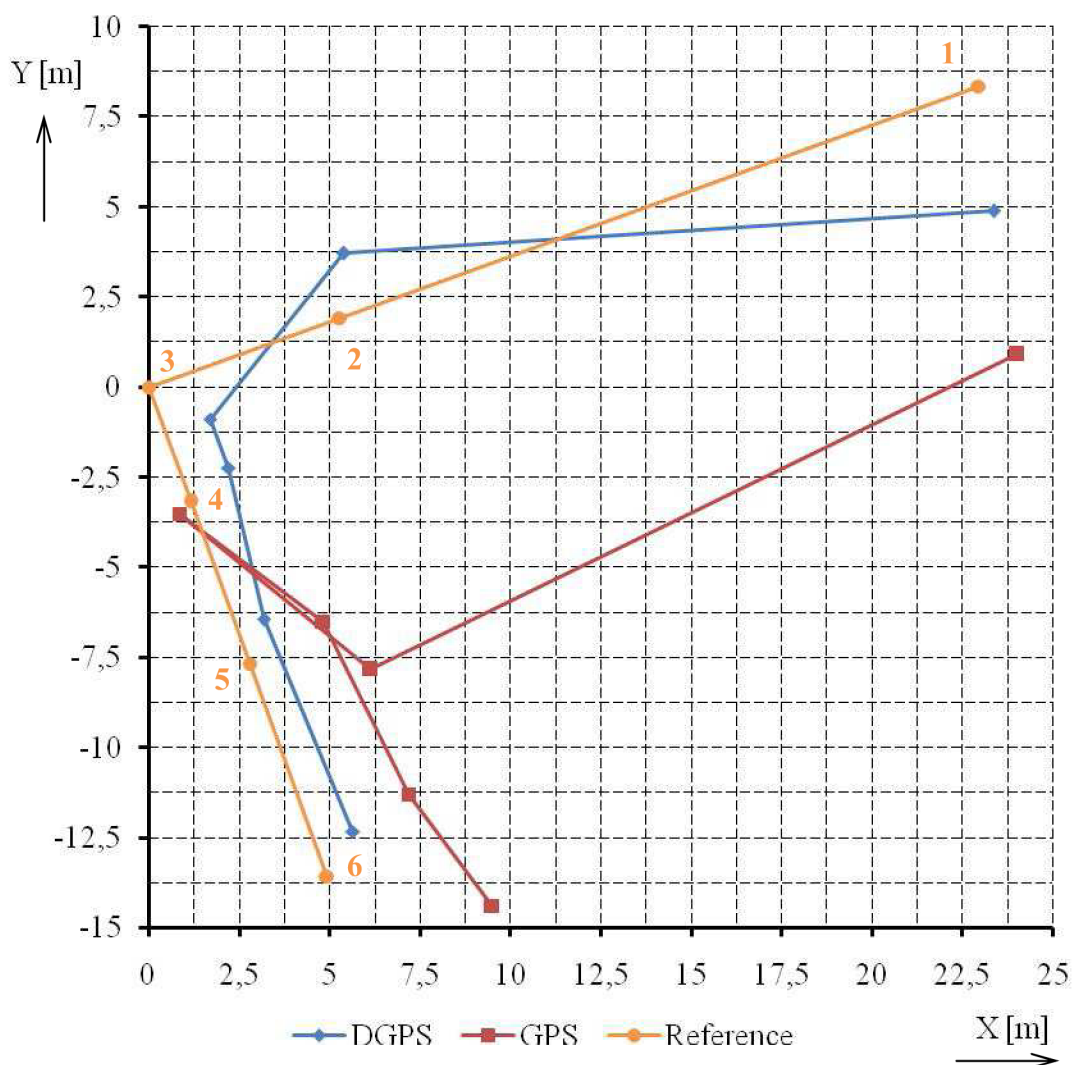
7.5 APLIKACE REALIZOVANÉHO SYSTÉMU DGPS

Tato kapitola je věnována ověření funkčnosti popsaného systému v porovnání s klasickou variantou GPS. Základem metody je stanovení referenční pozice pro umístění stanice “*base station*“. Její přesnou polohu lze určit na základě souřadnic v mapě (nevýhodou je složité určení zaměřené polohy dle mapy) nebo provést na daném místě dlouhodobé měření s následným vyhodnocením. V našem případě zvolíme druhou variantu a referenční polohu určíme jako medián naměřených souřadnic v průběhu 60min.

Od tohoto bodu zaměříme kontrolní měřené body ve dvou směrech svírající úhel 90° . K tomuto účelu byl využit laserový měřič vzdálenosti DISTO od výrobce Leica. Dle katalogových parametrů [13] je přesnost měření $\pm 1,5\text{mm}$ (pro rozsah 0,05m až 30m). Na základě znalosti úhlu v prostoru a vzdálenosti bodů k referenční stanici lze pomocí goniometrických funkcí vypočítat odpovídající souřadnice v osách X a Y. Výsledné rozložení bodů je zobrazeno na obrázku 7.11 oranžovou křivkou společně s indexováním měřících míst.

Po definování měřících bodů lze provést samotný experiment. Referenční stanice byla umístěna na souřadnicích [0;0] a dalším krokem bylo provedení nastavení dle návodu popsaného v kapitole 7.4. Stanice poté již automaticky vysílá korekce a v průběhu měření již není třeba provádět další úpravy nastavení.

Následně byl druhý GPS přijímač “*remote station*“ umístěn na měřící bod, kde proběhlo měření polohy v systému DGPS po dobu asi jedné minuty. Ihned po ukončení tohoto intervalu bylo měření spuštěno znovu, ale bez využívání diferenčních korekcí (tedy v klasickém režimu GPS). Okamžitá návaznost obou experimentů zajišťuje srovnatelné podmínky a lze tak objektivně porovnávat dosažené výsledky bez jejich zkreslení změnou okolních podmínek. Časový interval měření byl zvolen s ohledem na aplikační nasazení systému. Nelze předpokládat, že by mobilní robot svoji polohu určoval například po dobu 15min. Přestože bychom dosáhli poměrně dobrých výsledků, praktická užitečnost by byla mizivá (celková doba pro absolvování trasy by se neúměrně zvětšovala). Proto byl jako vhodný kompromis zvolen úsek 1minuty, který zajišťuje minimální časové prodlevy s ohledem na zpřesnění dosažených výsledků.



Obr. 7.11 : Porovnání určení polohy pomocí DGPS a GPS

V grafu na obrázku 7.11 jsou zobrazeny výsledné trajektorie pomocí systému GPS (červená křivka) a DGPS (modrá křivka). Z průběhů je patrné zpřesnění polohy aplikací diferenciálních korekcí, kdy změřená modrá křivka lépe odpovídá zadané dráze. Tento závěr dokládá také průměrná absolutní chyba určení bodu $\Delta_{XY_{avg}}$, která byla snížena z 6,1m (pro GPS) na 1,56m (pro DGPS). Přehled jednotlivých chyb měření je zobrazen v tabulce 7.3.

Tab. 7.3 : Absolutní chyby určení polohy pro GPS a DGPS

Bod	DGPS			GPS		
	Δ_X [m]	Δ_Y [m]	Δ_{XY} [m]	Δ_X [m]	Δ_Y [m]	Δ_{XY} [m]
1	0,416	-4,461	4,480	1,062	-7,445	7,520
2	0,101	1,792	1,795	0,848	-9,763	9,800
3	1,702	-0,881	1,917	0,844	-3,507	3,607
4	1,048	0,939	1,407	3,668	-3,311	4,941
5	0,391	1,228	1,289	4,391	-3,628	5,696
6	0,719	1,240	1,433	4,569	-0,818	4,642
$\Delta_{XY_{avg}}$ [m]	-	-	1,568	-	-	6,034
$\Delta_{XY_{max}}$ [m]	-	-	4,480	-	-	9,800

Absolutní hodnota odchylky dané souřadnice je určena dle vzorce 7.1, kde správná hodnota bodu je $[X_{sp}, Y_{sp}]$ a změřená hodnota $[X_m, Y_m]$.

$$\begin{bmatrix} \Delta_X \\ \Delta_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{sp} \\ Y_{sp} \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

Celková chyba systému určení polohy Δ_{XY} byla poté vypočtena pomocí vzorce 7.2 pro geometrický součet odchylek jednotlivých souřadnic:

$$\Delta_{XY} = \sqrt{\Delta_X^2 + \Delta_Y^2} \quad (7.2)$$

V tabulce 7.3 je pro systém DGPS maximální chyba měření 4,48m, která odpovídá určení bodu 1. Tento bod se v reálném prostředí nacházel v blízkosti stromů a byla tak snížena viditelnost družic od robotu. Došlo tak k omezení počtu družic, které jsou společné pro referenční stanici a pozorovatele (podmínka nutná pro zahrnutí dat do výpočtu polohy). Popsaný jev je tak nejpodstatnějším omezením v reálných aplikacích. Dostatečný počet viditelných družic zajistí adekvátní zpřesnění polohy pozorovatele, ale s rostoucím omezením možnosti příjmu signálu je tato vlastnost podstatně potlačena.

Na základě provedeného měření lze doporučit jako aplikační prostředí daného systému převážně nestíněné oblasti. Jedná se tak například o možnosti určení polohy a řízení zemědělských strojů. V urbanistických oblastech nebo náročnějším terénu je úspěšné nasazení DGPS podmíněno použitím sítě referenčních stanic, které by pokrývaly oblast působení robotu. Při přejezdech do částí s omezeným příjmem signálu by tak byla zvýšena pravděpodobnost společného zaměření družice od pozorovatele i referenční stanice.

8. NÁVRH A REALIZACE DATOVÉ FÚZE GPS A KOMPASU

V předcházející kapitole 7 byl realizovaný navigační subsystém robotu. Jedním z podstatných prvků celého systému je určení směru, kterým se objekt pohybuje (azimutu). Samotné GPS přijímače zprostředkovávají uživateli tento druh informace, ale jeho přesnost je velmi závislá na rychlosti objektu. Případným řešením je poté kooperace s elektronickým kompasem. V následujícím textu je proveden rozbor kvality měření azimutu pomocí GPS a na základě zjištěných výsledků je navržena datová fúze z představených snímačů.

8.1 MĚŘENÍ AZIMUTU POMOCÍ GPS

Prvním předpokladem je využití výhradně systému GPS, který poskytuje všechny navigační informace. Mimo polohy pozorovatele tak dále informuje o rychlosti pohybu a azimutu. Při provedeném experimentu byl přijímač GPS používán v jednotlivých dynamických režimech dle tabulky 8.1. Každý z režimů odpovídá určitému rozsahu povolených rychlostí a zrychlení (jak v horizontálním, tak vertikálním směru). Kompletní výpis všech voleb a jejich parametrů lze nalézt v [7]. K nastavení se používá následující komunikační zpráva (parametr *d1* je nahrazen dle tabulky 8.1):

\$PASHS,DYN,d1

Tab. 8.1 : Definice vybraných dynamických režimů přijímače DG14

Popis režimu	d1	v_{HorMax} [$m \cdot s^{-1}$]	v_{VerMax} [$m \cdot s^{-1}$]	a_{HorMax} [$m \cdot s^{-2}$]	a_{VerMax} [$m \cdot s^{-2}$]
Statický	1	0	0	0	0
Chůze	3	2	0.5	1	0.5
Automobil	5	50	3	10	1

Experiment probíhal vždy pro jednotlivě nastavené režimy s definovanou rychlostí objektu v dle tabulky 8.2 a neměnnou orientací v prostoru. Správný azimut objektu (robotu, automobilu) byl zjištěn ručním kompasem a je zastoupen parametrem A_{SP} . Z celkové sady naměřených dat byla vždy určena průměrná hodnota A_{AVG} (aplikace vzorce 8.1) a k ní odpovídající nejistota měření u_A (pomocí vzorce 8.2). Dále byla vzorcem 8.3 vypočítána rozšířená nejistota u s koeficientem rozšíření $k_r = 3$. Posledními parametry tabulky jsou absolutní Δ_A a relativní δ_A chyba měření (definovány rovnicemi 8.4 a 8.5)

Tab. 8.2 : Vyhodnocení měření azimutu pomocí GPS

dynamický režim	1	3	5
v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	0,00	0,68	11,27
A_{SP} [$^\circ$]	184	230	312
A_{AVG} [$^\circ$]	339,50	236,25	313,10
u_A [$^\circ$]	11,74	2,04	0,09
u [$^\circ$]	35,21	6,12	0,27
Δ_A [$^\circ$]	155,50	6,25	1,10
δ_A [%]	85,52	2,72	0,68

Hodnoty parametrů pro jednotlivé režimy byly pro celkový počet n dat vypočítány následujícím postupem:

$$A_{SP} = \frac{\sum_{i=0}^n A_i}{n} \quad (8.1)$$

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (A_i - A_{SP})^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad (8.2)$$

$$u = k_r \cdot u_A \quad (8.3)$$

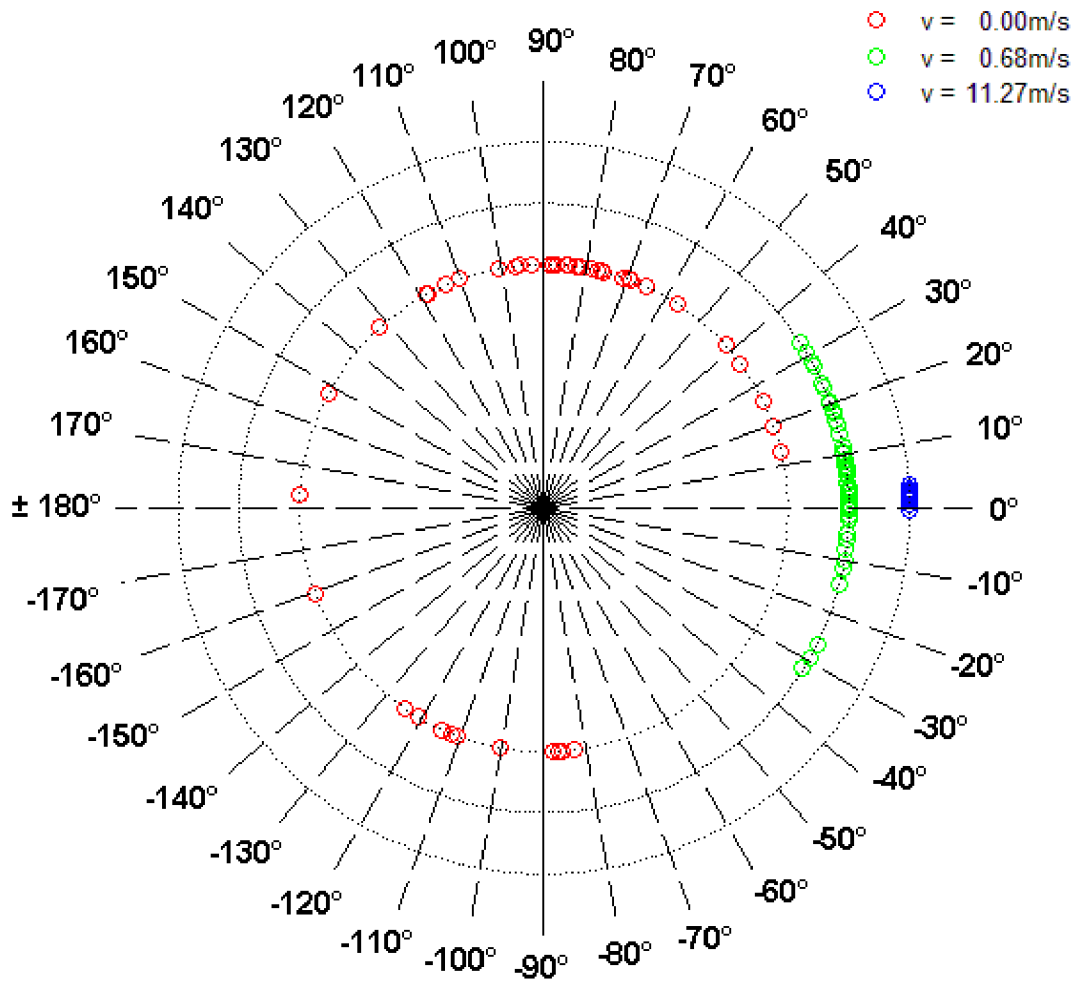
Vypočtená nejistota typu A dle vzorce 8.2 odpovídá svou hodnotou polovině intervalu, ve kterém se může správná hodnota azimutu vyskytovat s pravděpodobností 68%. Aplikací koeficientu rozšíření ve vzorci 8.3 je tato hodnota zvýšena na 99,7%. Výpočet absolutní a relativní chyby je definován:

$$\Delta_A = A_{AVG} - A_{SP} \quad (8.4)$$

$$\delta_A = \frac{A_{AVG} - A_{SP}}{A_{SP}} \cdot 100 \quad (8.5)$$

Z tabulky 8.2 je patrné, že přesnost měření azimutu pomocí GPS je silně závislá na rychlosti objektu, čímž byl potvrzen teoretický předpoklad. Ve statickém režimu byla hodnota azimutu určena s chybou 85% a z nejistoty měření je zřetelný velký rozptyl hodnot. Při zvýšení rychlosti dochází ke zlepšení vlastností měření. V dynamickém režimu 3 byla chyba měření snížena na 3% a nejistota měření byla určena na $\pm 6,12^\circ$. Dalším zrychlením (měření provedeno v automobilu) již klesla chyba azimutu pod 1%.

Na obrázku 8.1 jsou zobrazeny změřené hodnoty absolutní chyby experimentu. Z rozložení hodnot lze potvrdit vypočítané závěry. Statické měření je zastoupeno červenými značkami a z obrázku je patrné, že jejich rozložení je téměř nahodilé. Značky zelené reprezentují měření při dynamickém režimu 3 a jejich rozložení má podstatně menší rozptyl kolem správné hodnoty. Poslední měření udává výsledky získané jízdou automobilem (značeny modrými body) v dynamickém režimu 5. Zde je již rozptyl minimální a měření azimutu je velmi přesné.



Obr. 8.1 : Porovnání absolutních chyb azimutu pro různé rychlosti pohybu

8.2 ALGORITMUS DATOVÉ FÚZE

Na základě výsledků experimentu, který byl popsán v předchozí kapitole 8.1, je patrné omezení samotného systému GPS pro účely navigace. Pro realizaci plánování trasy je mimo polohy pozorovatele potřeba určit také jeho aktuální směr. Ten lze získat přímo z datové zprávy GPS přijímače, ale jeho přesnost podstatně souvisí s rychlostí objektu. Minimální limit lze stanovit na hodnotu přibližně $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Vzhledem ke konstrukčním proporcím robotu nelze tuto hranici nikdy přesáhnout. Maximální rychlost, kterou se lze s robotem pohybovat je $1,5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, a proto je nutné využít kooperace systému GPS s daty získanými z elektrického kompasu. Datová fúze těchto snímačů probíhá ve 2 hlavních oblastech. První z nich

je samotná navigace objektu. Ta probíhá na základě vyhodnocení diference mezi požadovaným směrem a aktuálním kurzem robotu. Ten je vzhledem k nízké přesnosti GPS systému při daných rychlostech určován výhradně na základě informací od kompasu. Požadovaný směr je poté určován na základě vektoru v souřadném systému UTM, který je tvořen body aktuální polohy (určené na základě GPS) a waypointu. Rozdíl těchto úhlů, společně se zbývající vzdáleností k cíli, slouží jako základní navigační údaje pro plánování chování robotu. Tato situace je naznačena na obrázku 7.9.

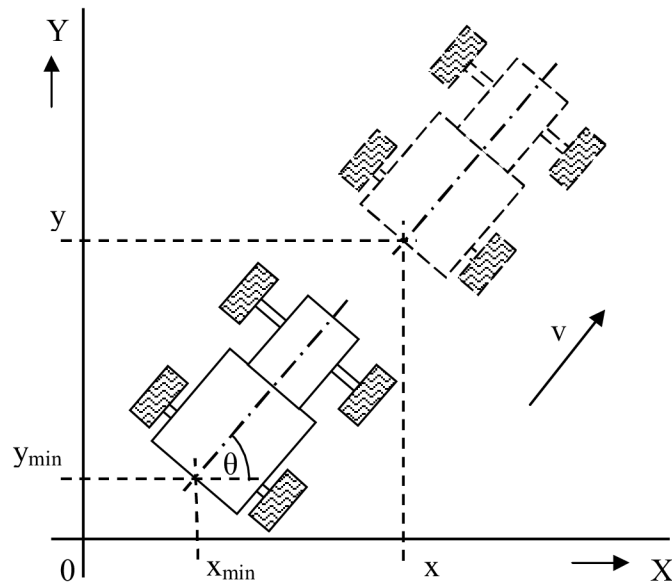
Druhá oblast kooperace zmíněných snímačů probíhá při určování polohy. Mimo přesného natočení robotu v prostoru je možné získat také další informace týkající se jeho rychlosti. Tyto data lze aplikovat u navigační metody *Dead Reckoning*. Při znalosti rychlosti hnané nápravy v a natočení θ robotu lze určit rychlosti v jednotlivých osách Δx , Δy pomocí vzorců 8.6 a 8.7. Postupnou integrací těchto přírůstků k poslední známé poloze $[x_{\min}, y_{\min}]$ je vypočítána vždy nová, aktuální poloha (vzorec 8.8). Pro vzorkování dat s periodou 1s odpovídají vypočítané hodnoty přímo změně hodnot souřadnic v prostoru. Na obrázku 8.2 je zobrazen grafický popis modelu.

$$\Delta x = v \cdot \cos \theta \quad (8.6)$$

$$\Delta y = v \cdot \sin \theta \quad (8.7)$$

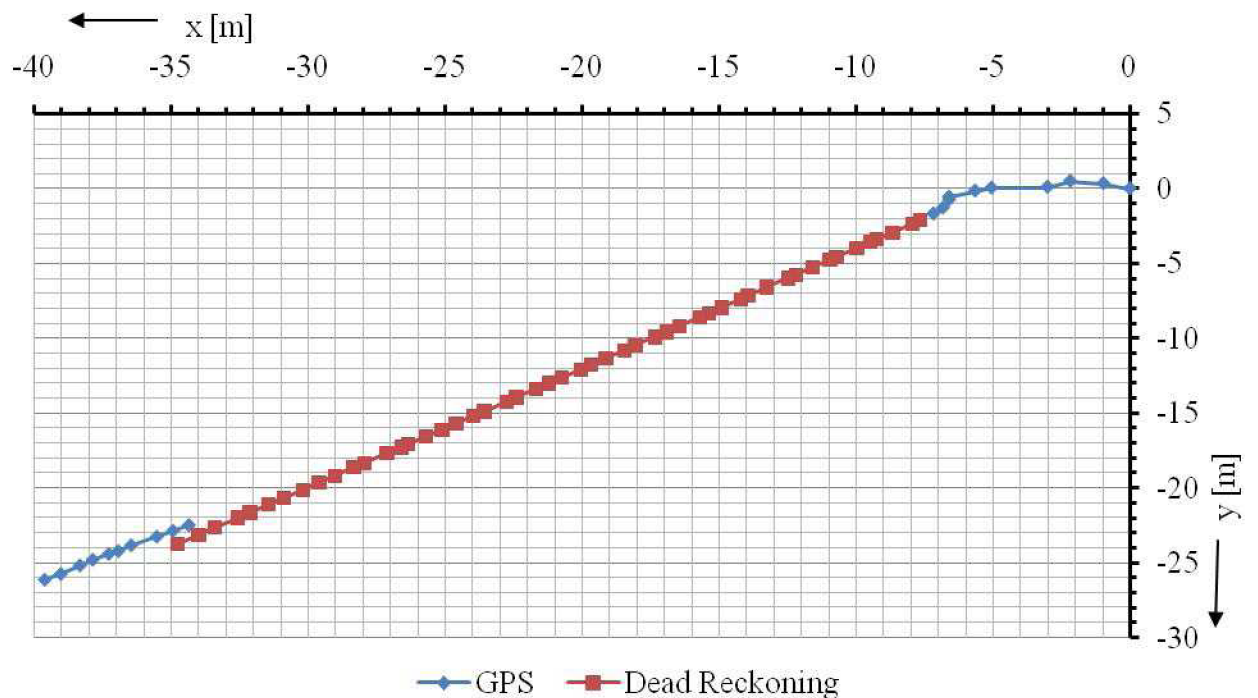
$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\min} \\ y_{\min} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\min} \\ y_{\min} \end{bmatrix} + v \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (8.8)$$

Popsaný princip určení polohy je využíván jako podpora systému GPS. Signál od družic může být v průběhu cesty stíněn různými objekty nebo je jednoduše nedostupný (příkladem může být jízda tunelem). V takových případech nelze určit polohu přijímače. Poslední známá poloha se tedy stává počáteční polohou pro implementovaný Dead Reckoning systém, který následně nahrazuje GPS systém do doby, než je signál opět přístupný.



Obr. 8.2 : Grafické znázornění modelu robotu

Algoritmus byl integrován do bloku *datová fúze snímačů* řídicího algoritmu na obrázku 7.8. Na obrázku 8.3 je zobrazen průběh určených souřadnic robotu při simulaci výpadku signálu GPS.



Obr. 8.3 : Určení polohy datovou fúzí GPS a kompasu

Na obrázku 8.3 je zobrazen průběh polohy robotu při jízdě z bodu [0,0] do cílového prvku [-40,-26]. V průběhu cesty došlo na úseku dlouhém 35m k výpadku signálu GPS (modrá křivka) a přepnutí na systém Dead Reckoning (červená křivka). Nevýhoda daného systému určení polohy spočívá v neustálém integrování přírůstků, které mimo užité informace obsahují také nepřesnosti způsobené snímači proměnných a vzorkováním dat. Dochází tak k postupnému nárůstu chyby určení polohy robotu. Tento efekt se projevil při opětovném zapnutí GPS, který ukázal správnou polohu robotu posunutou o přibližně 1,9m zpět proti směru pohybu. V průběhu výpadku je však odchylka zvětšována postupně a vzhledem k předpokladu užití metody jen na krátké úseky, lze považovat dané nepřesnosti za akceptovatelné. Datovou fúzí GPS s elektronickým kompasem se podařilo docílit zlepšení navigačního systému robotu s ohledem na principiální omezení samotné družicové navigace (stínění signálu, měření azimutu ovlivněné rychlostí pohybu).

9. ZÁVĚR

V kapitole 2 jsou představeny různé možnosti lokalizace mobilních zařízení ve venkovním prostředí. Pro navigaci venkovního robotu byl zvolen systém GPS (teoretický rozbor v kapitole 3). Vzhledem k poměrně velké nepřesnosti při určování polohy pozorovatele je věnována v kapitole 4 zvláštní pozornost různým zdrojům chyb působících v měřicím i vyhodnocovacím řetězci GPS. Na základě získaných poznatků je navržena metoda pro jejich minimalizaci. Jedná se o užití principu diferenční GPS, který je popsán v kapitole 5 a naznačen na obrázku 5.1.

Kapitola 7 popisuje výsledné hardwarové uspořádání referenční stanice i pozorovatele (robotu). Byla navržena příslušná přístrojová řešení a shrnutí jejich parametrů je v tabulkách č. 7.1 a 7.2. Dále byl sestaven ovládací program pro sledování a změnu parametrů referenční stanice. Samotný navigační algoritmus byl součástí celkového řídicího programu robotu a jeho vývojový diagram, popisující jeden cyklus navigace, je na obrázku č. 7.8. Podkapitola 7.5 je věnována praktickému ověření určení polohy pomocí GPS a DGPS na referenční dráze. Tabulka 7.3 shrnuje dosažené výsledky, kde je patrné zpřesnění GPS z průměrné absolutní chyby 6m na 1,6m při aplikaci diferenciálních korekcí s dostatečným počtem viditelných družic.

V další části projektu byla aplikována fúze dat s magnetometrem, který je součástí senzorového vybavení robotu. Podpora systému použitím kompasu se skládá ze dvou částí. Prvním je samotné určení azimutu robotu, protože přesnost určení orientace s GPS klesá v závislosti na rychlosti, jak bylo prokázáno měřením na obrázku č. 8.1. Druhým prvkem je eliminace ztráty informace o poloze pozorovatele při ztrátě signálu od jednotlivých družic. K tomu byla využita metoda Dead Reckoning, jejíž praktická aplikace je na obrázku 8.3.

Popsaný navigační algoritmus byl v praxi ověřen při reprezentaci robotu TIM2 na soutěži Robotour 2009 v Brně, kde obsadil konečné 7. místo v konkurenci 15 robotů. Tato práce byla také přijata jako příspěvek na konferenci Student EEICT 2010, kde proběhla její úspěšná prezentace.

10. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HRDINA Z., PÁNEK P., VEJRAŽKA F., *Rádiové určování polohy*, Praha, 1995, 259s, ISBN 80-01-01386-3
- [2] STEINER I., ČERNÝ J., *GPS od A do Z*, Praha:eNav, 2006, 259s, ISBN 80-239-7516-1
- [3] FARRELL J., BARTH M., *The global positioning system and inertial navigation*, The McGraw-Hill companies, 1999, 340s, ISBN-0-07-022045-X
- [4] Přehled témat k robotice
<www.robotika.cz>
[cit. 2009-03-03]
- [5] Teorie družicového systému GLONASS
<<http://cs.wikipedia.org/wiki/GLONASS>>
[cit. 2009-04-20]
- [6] Teorie družicového systému GALILEO
<<http://www.czechspace.cz/cs/galileo/program-galileo>>
[cit. 2009-04-25]
- [7] Oficiální podklady pro GPS Magellan DG14
<<http://pro.magellangps.com/en/products/product.asp?PRODID=174>>
[cit. 2009-04-26]
- [8] Přehled historie vynálezu kompasu
<<http://en.wikipedia.org/wiki/Compass>>
[cit. 2009-11-21]
- [9] CARUSO M. J., BRALAND T., SMITH C.H., SCHNEIDER R.,
A new perspective on Magnetic field sensing *Honeywell Inc.*, květen
1998

- [10] Teoretický rozbor Hallova jevu
<http://en.wikipedia.org/wiki/Hall_effect >
[cit. 2009-11-25]
- [11] Oficiální podklady pro CMPS03
<http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/C/M/P/S/CMPS03.shtml>
[cit. 2009-12-04]
- [12] Formátování RNDF souboru – mapy prostředí
<http://www.darpa.mil/GRANDCHALLENGE/docs/RNDF_MDF_Formats_031407.pdf>
[cit. 2009-10-08]
- [13] ŠOLC, F., ŽALUD, L.: *Robotika*, Elektronická skripta, 2006,
[cit. 2009-10-12]
- [14] Popis laserového dálkoměru Leica Disto A5
<http://ptd.leica-geosystems.com/en/Leica-DISTO-A5_31658.htm>
[cit. 2010-03-15]
- [15] Celkový přehled teorie GNSS
<http://gis.vsb.cz/vojtek/index.php?page=gnps_p/index>
[cit. 2010-02-18]

11. SEZNAM ZKRATEK

DGPS	diferenciální GPS
EGNOS	WADGPS pro Evropu
GALILEO	evropský satelitní navigační systém
GLONASS	satelitní navigační systém Ruska
GNSS	globální navigační satelitní systém
GPS	globální poziční systém
NMEA	Národní asociace pro námořní elektroniku
RMC	doporučené navigační minimum
RNDF	route network definitiv file
RTCM	Radio technical commission for maritime services
SA	složka GPS snižující přesnost
UTM	univerzální transverzální Mercatorův systém souřadnic
WAAS	WADGPS pro Severní Ameriku
WADGPS	DGPS pro rozsáhlá území
WGS-84	souřadný referenční systém Země

12. SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1** Tabulka měřených hodnot pro porovnání GPS a DGPS
- Příloha 2** Tabulka měření azimutu pomocí GPS pro různé rychlosti
- Příloha 3** Tabulka datové fúze GPS a kompasu
- Příloha 4** CD obsahující
- elektronickou verzi diplomové práce
 - vytvořený program referenční stanice
 - vytvořený navigační program robotu
 - získaná data provedených měření
- (Matlab 2009, Excel 2007)

Příloha 1

Tabulka měřených hodnot pro porovnání GPS a DGPS

Bod	-	1	2	3	4	5	6
DGPS	X [m]	23,366	5,391	1,702	2,208	3,181	5,649
	U_X [m]	0,159	0,026	0,055	0,002	0,250	0,087
	Y [m]	4,889	3,722	-0,881	-2,241	-6,442	-12,320
	U_Y [m]	1,199	0,178	0,023	0,076	1,742	0,232
GPS	X [m]	24,012	6,138	0,844	4,828	7,181	9,499
	U_X [m]	0,028	0,034	0,026	0,049	0,024	0,021
	Y [m]	0,905	-7,833	-3,507	-6,491	-11,298	-14,378
	U_Y [m]	0,340	0,273	0,048	0,196	0,042	0,043
Reference	X [m]	22,95	5,29	0	1,16	2,79	4,93
	Y [m]	8,35	1,93	0	-3,18	-7,67	-13,56

Příloha 2

Tabulka měření azimutu pomocí GPS pro různé rychlosti

Měření	$\varphi_{v=0}$ [°]	$\varphi_{v=0.68}$ [°]	$\varphi_{v=11.3}$ [°]
1	23,65	233,53	313,17
2	239,56	233,71	312,87
3	265,50	248,13	313,12
4	265,43	225,04	313,03
5	219,27	198,23	313,30
6	296,88	239,18	313,70
7	269,90	228,50	313,19
8	293,10	236,79	313,40
9	0,00	241,68	313,30
10	259,23	223,95	313,32
11	261,83	260,59	313,13
12	58,28	218,50	312,80
13	278,79	237,91	312,78
14	251,99	238,76	312,63
15	301,97	237,63	313,10
16	248,29	222,12	312,72
17	264,25	250,20	310,80
18	271,62	240,33	311,47
19	283,75	220,11	313,52
20	202,75	262,73	314,68
21	72,13	215,67	314,53
22	0,00	227,91	314,16
23	253,92	203,59	313,88
24	259,34	234,86	313,77
25	279,81	231,63	312,81
26	267,57	243,86	313,05
27	224,84	244,04	312,50
28	265,24	233,40	312,07
29	258,65	243,94	312,74
30	0,00	258,52	313,05
31	270,71	237,48	313,16
32	260,45	232,71	313,25

Měření	$\varphi_{v=0}$ [°]	$\varphi_{v=0.68}$ [°]	$\varphi_{v=11.3}$ [°]
33	196,41	253,16	312,86
34	267,36	229,66	313,23
35	95,32	230,89	313,25
36	334,87	236,16	313,56
37	82,87	230,43	313,29
38	0,00	234,92	313,95
39	70,64	245,80	313,00
40	100,30	246,63	312,99
41	315,36	230,05	313,02
42	267,42	258,43	312,99
43	61,85	240,58	313,05
44	96,30	234,02	312,56
45	276,16	225,34	312,79
46	301,58	257,68	313,04
47	209,01	200,71	312,96
48	68,19	248,47	313,23
49	252,77	250,65	313,85
50	97,43	254,00	312,49

Příloha 3

Tabulka datové fúze GPS a kompasu

Měření	v [m·s ⁻¹]	azimut [°]	GPS		Dead Reckoning	
			x [m]	y [m]	x [m]	y [m]
1	0,69	219,4	0,0000	0,0000	-	-
2	0,95	219,4	-0,9706	0,3405	-	-
3	0,69	218,0	-2,1759	0,4976	-	-
4	0,37	219,4	-3,0054	0,0994	-	-
5	0,39	219,4	-5,0455	0,0420	-	-
6	0,71	219,4	-5,6406	-0,1586	-	-
7	0,80	219,4	-6,5903	-0,5602	-	-
8	0,39	218,0	-6,5851	-0,7440	-	-
9	0,52	219,4	-6,8094	-1,3020	-	-
10	0,92	219,4	-7,1588	-1,6867	-	-
11	0,66	219,4	-7,8689	-2,0745	-7,6724	-2,1086
12	0,34	219,4	-8,4581	-2,4660	-7,9352	-2,3245
13	0,95	219,4	-9,0532	-2,6666	-8,6718	-2,9295
14	0,73	218,0	-9,6426	-3,0510	-9,2484	-3,3800
15	0,29	219,4	-10,1122	-3,4391	-9,4754	-3,5664
16	0,64	219,4	-10,5819	-3,8201	-9,9691	-3,9720
17	0,96	218,0	-11,1717	-4,2116	-10,7284	-4,5652
18	0,29	219,4	-12,0014	-4,6027	-10,9514	-4,7484
19	0,81	218,0	-12,9559	-4,8135	-11,5889	-5,2465
20	0,78	219,4	-10,6447	-5,8661	-12,1941	-5,7436
21	0,38	219,4	-11,2341	-6,2505	-12,4848	-5,9823
22	1,00	218,0	-11,7090	-6,4478	-13,2725	-6,5978
23	0,87	219,4	-12,2936	-7,0230	-13,9454	-7,1505
24	0,35	219,4	-12,6432	-7,4006	-14,2122	-7,3697
25	0,89	219,4	-13,1128	-7,7887	-14,8970	-7,9322
26	0,61	219,4	-13,7073	-7,9894	-15,3669	-8,3181
27	0,44	219,4	-14,1771	-8,3704	-15,7093	-8,5994
28	0,95	219,4	-14,6467	-8,7585	-16,4459	-9,2045
29	0,60	219,4	-15,2366	-9,1429	-16,9078	-9,5839
30	0,55	218,0	-15,7056	-9,5310	-17,3382	-9,9201
31	0,93	218,0	-16,2956	-9,9154	-18,0691	-10,4912
32	0,52	219,4	-16,7705	-10,1126	-18,4673	-10,8182
33	0,84	218,0	-17,3597	-10,5041	-19,1291	-11,3353

Měření	v [m·s ⁻¹]	azimut [°]	GPS		Dead Reckoning	
			x [m]	y [m]	x [m]	y [m]
34	0,68	218,0	-17,8346	-10,7013	-19,6651	-11,7541
35	0,51	219,4	-18,4246	-11,0858	-20,0593	-12,0779
36	0,87	218,0	-18,8942	-11,4738	-20,7415	-12,6108
37	0,60	219,4	-19,3588	-12,0386	-21,2033	-12,9902
38	0,61	218,0	-19,9480	-12,4301	-21,6825	-13,3646
39	0,91	218,0	-20,6524	-13,0016	-22,3971	-13,9229
40	0,47	218,0	-21,2421	-13,3931	-22,7666	-14,2116
41	1,05	219,4	-21,8267	-13,9683	-23,5749	-14,8755
42	0,52	218,0	-22,4212	-14,1690	-23,9850	-15,1959
43	0,79	219,4	-23,1256	-14,7405	-24,5942	-15,6963
44	0,66	218,0	-23,5952	-15,1286	-25,1180	-16,1056
45	0,75	218,0	-24,1852	-15,5130	-25,7068	-16,5656
46	0,81	218,0	-24,7743	-15,9044	-26,3443	-17,0636
47	0,31	218,0	-25,1245	-16,2821	-26,5919	-17,2571
48	0,68	218,0	-25,7137	-16,6736	-27,1239	-17,6727
49	1,06	218,0	-26,4238	-17,0613	-27,9562	-18,3230
50	0,48	218,0	-27,0078	-17,6366	-28,3339	-18,6181
51	0,90	219,4	-27,6029	-17,8372	-29,0307	-19,1904
52	0,74	218,0	-28,3125	-18,2250	-29,6113	-19,6441
53	0,76	219,4	-28,8971	-18,8002	-30,2006	-20,1281
54	0,88	218,0	-29,6066	-19,1880	-30,8950	-20,6706
55	0,70	218,0	-30,1958	-19,5794	-31,4472	-21,1021
56	0,86	218,0	-31,0255	-19,9706	-32,1253	-21,6318
57	0,56	218,0	-31,6101	-20,5458	-32,5679	-21,9776
58	1,07	218,0	-32,3197	-20,9336	-33,4084	-22,6343
59	0,75	219,4	-33,0244	-21,5122	-33,9897	-23,1118
60	0,97	218,0	-33,6138	-21,8966	-34,7571	-23,7114
61	0,66	218,0	-34,3180	-22,4752	-	-
62	1,04	219,4	-34,9080	-22,8596	-	-
63	0,63	218,0	-35,4977	-23,2511	-	-
64	0,84	218,0	-36,4419	-23,8293	-	-
65	0,29	218,0	-36,9114	-24,2174	-	-
66	0,81	218,0	-37,2662	-24,4113	-	-
67	0,86	219,4	-37,8560	-24,8028	-	-
68	0,45	218,0	-38,3258	-25,1838	-	-
69	1,12	218,0	-39,0299	-25,7624	-	-
70	0,56	218,0	-39,6199	-26,1468	-	-