

ANOTACE

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. Následuje příklad volených zařízení pro realizaci systému pro určení polohy.

KLÍČOVÁ SLOVA

GPS přijímač, diferenční GPS, navigace, robot

ANNOTATION

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. Last part is about examples of basic equipments, which make hardware base of DGPS.

KEY WORDS

GPS receiver, differential GPS, navigation, robot

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MACEČEK, I. Diferenciální GPS. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 34 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

OBSAH

1. ÚVOD	7
2. DRUŽICOVÉ SYSTÉMY.....	8
2.1 Systém Navstar GPS.....	8
2.2 Systém GLONASS.....	9
2.3 Systém Galileo	10
3. PŘEHLED SYSTÉMU NAVSTAR GPS.....	12
3.1 Struktura systému	12
3.1.1 Kosmický segment.....	12
3.1.2 Řídící segment	13
3.1.3 Uživatelský segment	13
3.2 Datové zprávy	13
3.3 Přijímače signálu pro GPS.....	14
3.3.1 Princip přijímače GPS.....	14
3.3.2 Konstrukce přijímače GPS	16
3.4 Určení polohy pozorovatele.....	17
4. ZDROJE CHYB V SYSTÉMU GPS	19
4.1 Časová nestabilita.....	19
4.2 Atmosferické vlivy	19
4.3 Ostatní zdroje nepřesností.....	20
4.4 Metody zpřesňující určenou polohu	21
5. DIFERENČNÍ GPS.....	23
5.1 Princip diferenční GPS	23
5.2 Referenční stanice pro DGPS	25
5.2.1 Stanice pro korekce zdánlivé vzdálenosti	25
5.2.2 Stanice pro korekce souřadnic	27
5.3 Korekce a přesnost DGPS.....	27
5.4 Popis systému WADGPS.....	28

6. HARDWAREOVÁ REALIZACE DGPS.....	30
6.1 GPS přijímače Magellan DG14	30
6.2 Bezdrátový přenos dat pro DGPS	31
7. ZÁVĚR	33
8. POUŽITÁ LITERATURA.....	34

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 : Rozložení družic ruského systému GLONASS na oběžných drahách [5] ...	9
Obr. 3.1 : Rozložení družic na oběžných drahách v síti zeměpisných souřadnic	12
Obr. 3.2 : Obecné blokové schéma přijímače signálu GPS	15
Obr. 5.1 : Realizace principu diferenční GPS při navigaci vozidel.....	23
Obr. 5.2 : Diferenční GPS při použití doporučení RTCM SC-104	24
Obr. 5.3 : Blokové schéma referenční stanice pro korekce zdánlivých vzdáleností ..	26
Obr. 5.4 : Pokrytí území referenčními stanicemi pro systém WADGPS.....	28
Obr. 6.1 : Moduly Magellan DG14 pro realizaci DGPS.....	30
Obr. 6.2 : Fotografie bezdrátového modulu vysílače/přijímače ELPRO 805U	32

SEZNAM TABULEK

Tab. 6.1 : Charakteristické parametry GPS modulu Magellan DG14	31
Tab. 6.2 : Charakteristické parametry bezdrátového modulu ELPRO 805U.....	32

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 vyplívají 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.

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

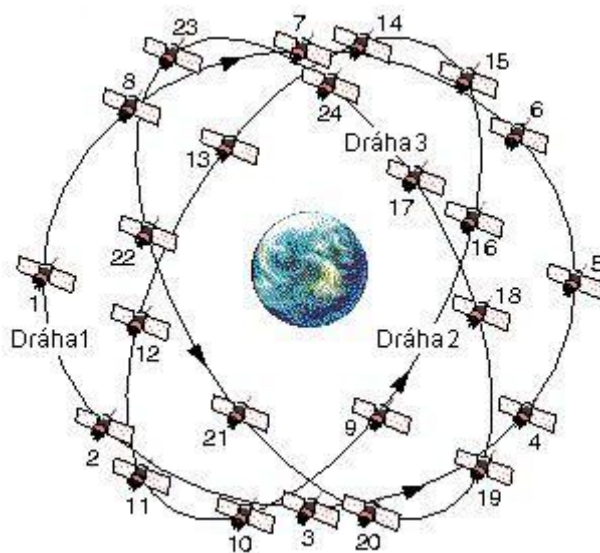
Princip systému vychází z modelu pozorovatele a vysílače. Tím je u GPS družice na oběžné dráze Země. Pozorovatelem se poté stává jakýkoli objekt vybavený přijímačem signálu, který je generován v jednotlivých vysílačích systému. Družice tedy v periodických intervalech vysílají datové zprávy obsahující 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 sistěma*) 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 19 100 km od zemského povrchu. Grafické zobrazení popsaného rozložení je na obrázku obr. 2.1.



**Obr. 2.1 : Rozložení družic ruského 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 zajištěnu 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 zmíněných 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 vypouštěny 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 rezervovanou pro potřeby státních institucí. Její využití se předpokládá u policejních složek, záchranářů, pobřežní služby a dalších.

3. PŘEHLED SYSTÉMU NAVSTAR GPS

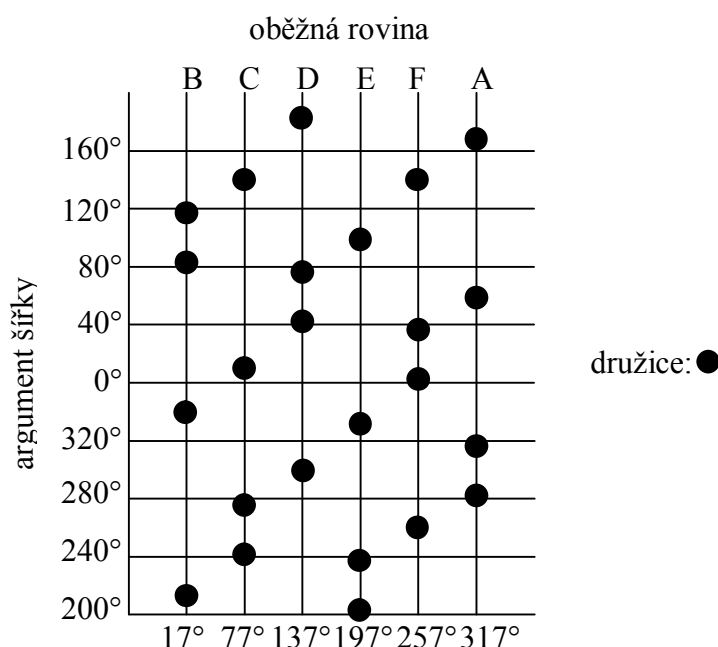
Tato kapitola se věnuje celkovému přehledu realizace systému GPS. Jsou podrobně konzultovány způsoby vzniku, přenosu i vyhodnocení dat získaných přijímačem od družic. V následujících kapitolách je také věnována pozornost samotným řešením přijímačů pro GPS.

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 20 200 km. Doba oběhu jednotlivých modulů byla stanovena na 11 h a 56 min.

3.1.2 Řídící segment

Následující je část řídící. Ta je tvořena monitorovací stanicí, která má na starost správu družic. Přijímá jejich data a ty postupuje hlavní řídící 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 řídící 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 dekoduje 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.

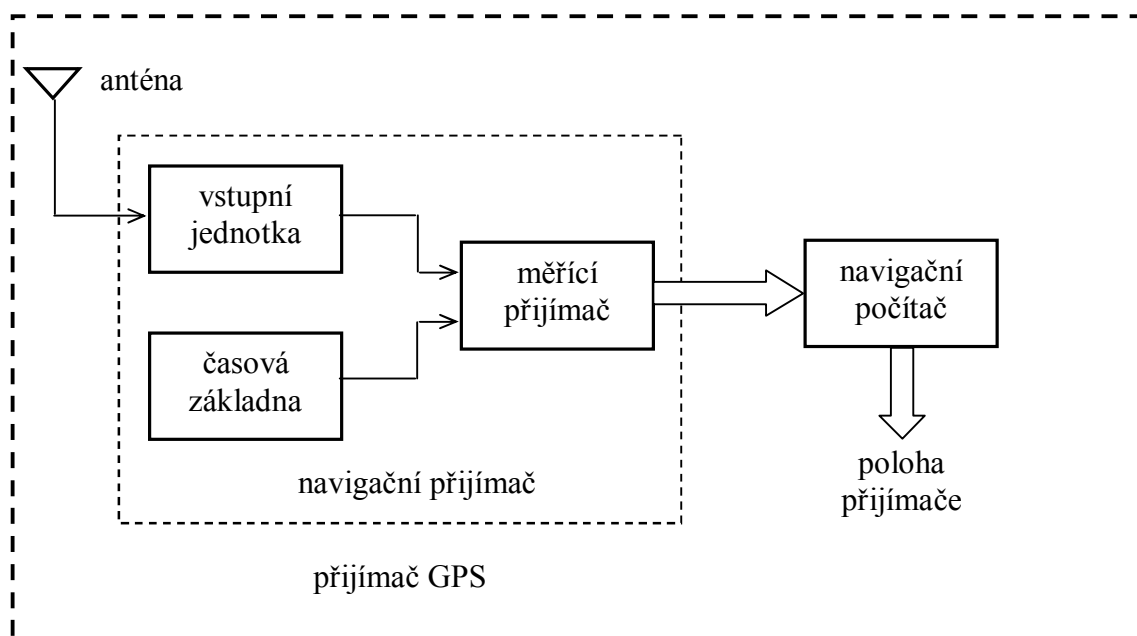
3.3 PŘIJÍMAČE SIGNÁLU PRO GPS

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 podrámcích může být určeno časové zpoždění, které je později zahrnuto do výpočtu polohy. Následně dochází ke zpracování v navigačním počítači a blocích měřících 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 měřící, multiplexní a mnohokanálové přijímače.

Sekvenčně měřící 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 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 vybaveny 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. Případům použití přijímače v outdoorovém

prostředí odpovídá také jeho provedení. Bývá vybaven interní anténou s možným rozšířením. 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 6. 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 časové 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).

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

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) 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 přepočet souřadnic vektoru \mathbf{r} do soustavy souřadnic vztažené 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. Případně 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 VLVY

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

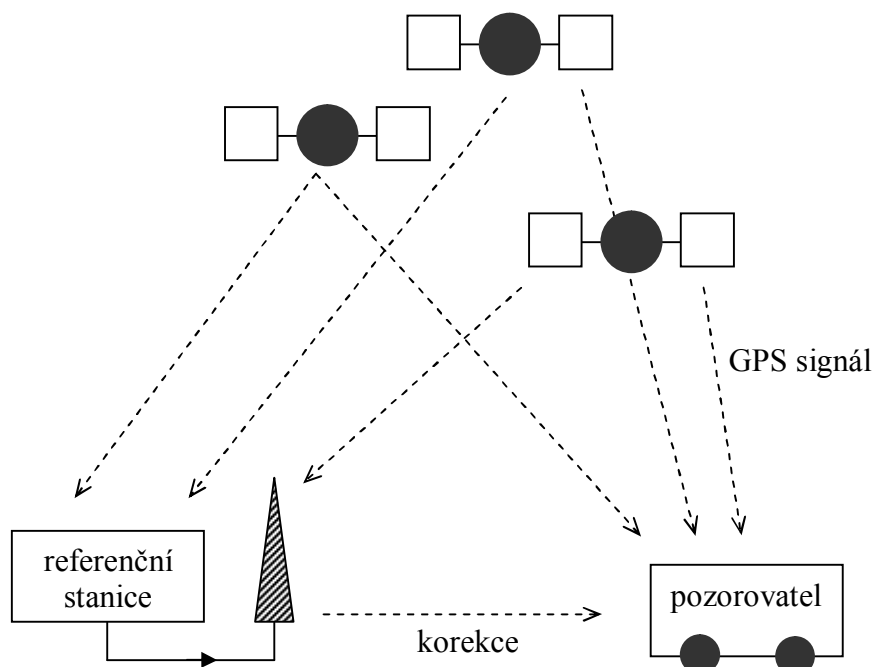
Dalším způsobem je užití DGPS. Jedná se o způsob práce se systémem GPS, kdy uživatel pro zpřesnění užívá více spolupracujících přijímačů. Přesný popis principu, způsoby realizace a možnosti použití jsou popsány v kapitole 5.

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

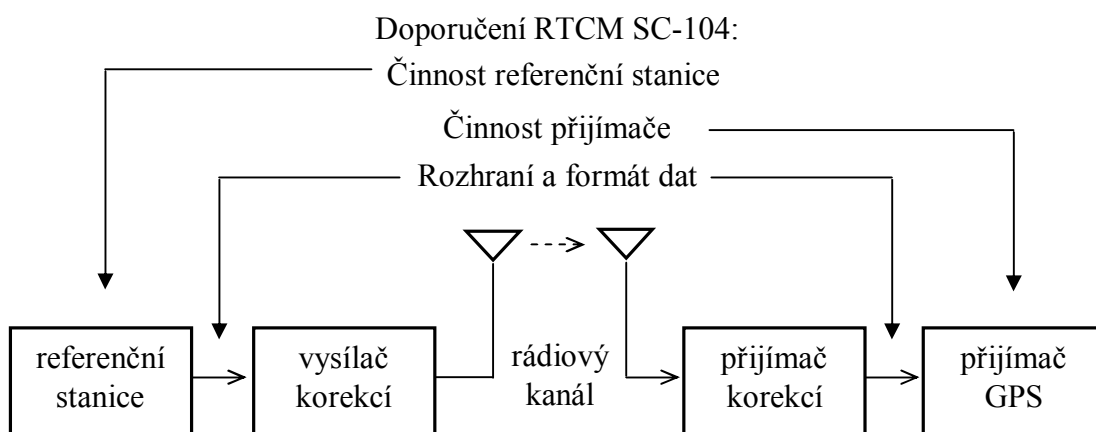
Princip diferenční GPS vychází z vyhodnocování polohy neznámého místa, které představuje naváděný objekt, a referenční pozice. Realizace DGPS v praxi je zakreslena na obrázku 5.1.



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

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 stanici 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

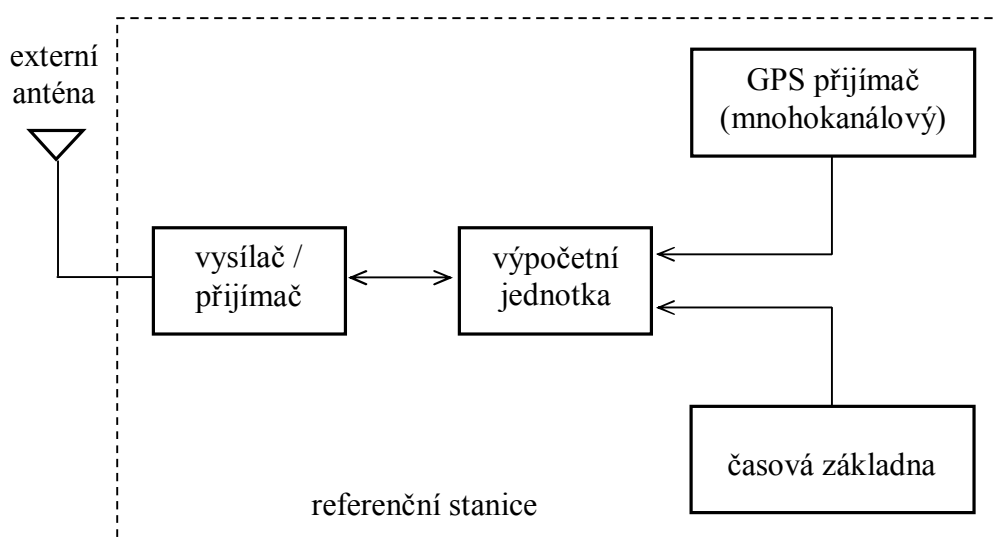
Referenční stanice pro DGPS se liší podle zvolené realizace systému. Nezávisle na této volbě však vždy potřebuje pro určení korekcí znát přesnou geocentrickou polohu. V systému GPS se pro určení polohy užívá také časové informace. Z tohoto důvodu je nejdůležitější částí referenční stanice časová základna.

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 zajištění 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 a objektem jehož polohu korigujeme. Komunikačním kanálem se rozumí bezdrátový rádiový přenos, který může být volně realizován na frekvencích 400MHz nebo 800MHz. Formát vysílaných korekcí je nezávisle na jejich obsahu stejný. Rámcem 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.

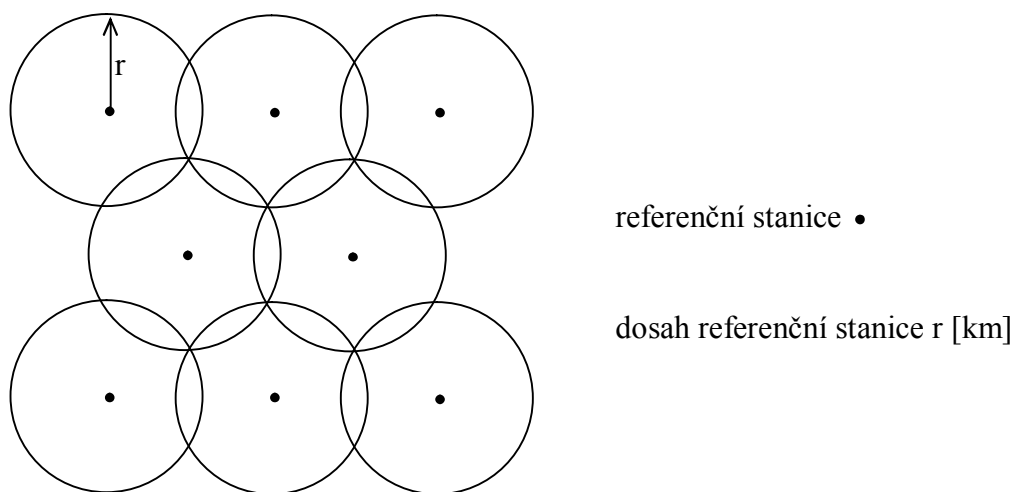
Přesnost diferenčního měření ovlivňuje několik faktorů. Diferenční metody se využívají k potlačení chyb, které působí na referenční stanici i pozorovatele stejnou měrou. Do této skupiny patří hlavně ionosferické a troposferické zpoždění, chyba efemerid nebo časové základny družic. Tyto faktory jsou detailně 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. Nedochází 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 měřících 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*). Ten vznikl jako rozšíření systému GPS pro zkvalitnění jeho výsledků, ale pro příjem takto poskytovaných korekcí je nutné, aby byla v přijímači zabudována speciální podpora.

6. HARDWAREOVÁ REALIZACE DGPS

V předchozí kapitole 5 byl popsán teoretický princip včetně různých koncepcí řešení DGPS. Tato část je zaměřena na seznámení s technickými parametry a možnostmi plánovaného zařízení pro realizaci DGPS na venkovním mobilním robotu.

6.1 GPS PŘIJÍMAČE MAGELLAN DG14

Hardwareová část navigačního subsystému robotu se zakládá na GPS přijímači v referenční stanici a na straně pozorovatele. Jedná se o zařízení od firmy Magellan s typovým označením DG14. Na obrázku 6.1 jsou zobrazeny zmíněné GPS moduly včetně mechanického zabezpečení pro aplikaci v terénu.



Obr. 6.1 : Moduly Magellan DG14 pro realizaci DGPS

Výstupní data moduly podávají ve formě nezpracovaných dat, pro jejich aplikaci na určení korekcí, nebo jako zpracovaná data ve formátu NMEA protokolu. Pro případné potřeby uživatele však tyto typy zpráv rozšiřují o některé další. Především je to přímý výstup souřadnic polohy v souřadném systému UTM, který je pro matematické zpracování navigačních dat snadnější než defaultní systém WGS-84.

Firemní algoritmy DG14 umožňují využití Kalmannovy filtrace a další módy pro statické měření polohy (tato nastavení jsou důležitá z pohledu referenční stanice). Naopak u mobilního pozorovatele je zásadní nastavení dynamickým režimů. Výrobce nabízí volbu z 8 různých profilů, které jsou podmíněny maximální rychlostí dosahovanou navigovaným objektem. Detailní přehled nastavení a definic režimů lze získat v literatuře [7].

Dle manuálu výrobce [7] je definovaná přesnost určení polohy horizontálních souřadnic 0,9m a pro určení výšky je to 1,6m. Napájení modulů je 5V a je tedy možné jeho provedení pomocí baterií. 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 6.1.

Tab. 6.1 : 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

6.2 BEZDRÁTOVÝ PŘENOS DAT PRO DGPS

Pro bezdrátové vysílání dat od referenční stanice k pozorovateli lze použít modulů ELPRO 805U. Pro komunikaci umožňují připojení přes RS232 nebo RS485. Bezdrátový radiový přenos je realizován v pásmu volných frekvencí Přesná frekvence, kterou zařízení používají, je 869 MHz. Další specifikace jsou zapsány v tabulce 6.2.

Tab. 6.2 : 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

Na obrázku 6.2 je zobrazen bezdrátový modul zapojený do stanice. Připojení přes rozhraní RS232, přívod napájení realizován pomocí PC konektoru a všesměrová externí anténa na SMA koaxiálním konektoru.



Obr. 6.2 : Fotografie bezdrátového modulu vysílače/přijímače ELPRO 805U

Výše zmíněné komponenty vytváří základ realizace systému DGPS. Dalším krokem, k jeho úplné implementaci do řídicího systému mobilního robota, je vytvoření vyhodnocovacích a řídicích programů. Dále pak případná fúze dat s ostatním senzorickým vybavením (zvláště elektronickým kompasem) pro zlepšení navigačních schopností.

7. ZÁVĚR

V kapitole 2 jsou představeny různé možnosti lokalizace mobilních zařízení ve venkovním prostředí. Pro řešení tohoto problému slouží družicové systémy, kterých je v současnosti realizovaných nebo ve vývoji velké množství. Pro navigaci robotu byl zvolen systém GPS, který ve vývoji postoupil nejdále. Pokud by byl v budoucnosti spuštěn některý z plánovaných systémů, pak je zajištěna jeho kooperace s GPS.

Vzhledem k poměrně velké nepřesnosti při určování polohy pozorovatele je věnována zvláštní pozornost různým zdrojům chyb působících v měřicím i vyhodnocovacím řetězci GPS. Na tuto problematiku je zaměřena kapitola 4 a na základě získaných poznatků je navržena metoda pro jejich minimalizaci. Jedná se o užití principu diferenční GPS, který je naznačen na obrázku 5.1.

Při realizaci DGPS na mobilním robotu je podmínkou zajistit užití totožných přijímačů družicového navigace. Dalším úkolem je zajištění bezdrátového přenosového kanálu mezi robotem a referenční stanicí. Byla navržena příslušná přístrojová řešení a shrnutí jejich parametrů je v tabulkách č. 6.1. a 6.2. Pro bezdrátovou komunikaci se využívá volné frekvence 800MHz a GPS přijímače mají v DGPS uspořádání přesnost určení polohy přibližně 0,9m.

V dalších částech projektu bude hlavním úkolem realizace řídicího a vyhodnocovacího programového vybavení. Pro zajištění lepších navigačních vlastností je také předpokládána fúze dat společně s magnetometrem, který je součástí senzorového vybavení robotu.

8. 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]