

Absolventská práce

2007

Slavíček Jiří

Prohlašuji že jsem absolventskou práci na téma Navigační systémy vypracoval samostatně a použil jen pramenů, uváděných v seznamu použité literatury a zdrojů.

V Českých Budějovicích dne 7. května 2007

Studijní obor : Výpočetní technika a programování

Absolventská práce

Navigační systémy

Autor : Jiří SLAVÍČEK

Vedoucí absolventské práce : Mgr. Jan ČERNÝ

**Tímto bych chtěl poděkovat Mgr. Janu ČERNÉMU za odborné vedení,
připomínky a cenné rady při vypracování absolventské práce.**

1. Úvod.....	6
2. GNSS	6
2.1 Dálkoměrná metoda	9
2.1.1 Měření zdánlivé vzdálenosti	11
2.1.2 Techniky oddělení dálkoměrných signálů jednotlivých družic.....	12
2.2 GPS	12
2.2.1 Historie GPS	13
2.2.2 Složení systému.....	14
2.2.3 Signál GPS	16
2.2.3.1 Modulace.....	16
2.2.3.2 Dálkoměrné kódy.....	17
2.2.3.3 Navigační zpráva.....	18
2.2.4 Přesnost GPS.....	20
2.2.5 Modernizace systému.....	21
2.3 GLONASS	22
2.3.1 Složení systému.....	22
2.3.2 Signály GLONASS.....	23
2.3.2.1 Modulace.....	24
2.3.2.2 Dálkoměrné kódy.....	24
2.3.2.3 Navigační zpráva.....	24
2.3.3 Přesnost GLONASS.....	25
2.3.4 Historie a budoucnost GLONASS	25
2.4 Galileo.....	26
2.4.1 Hlavní výhody.....	27
2.4.2 Historie a budoucnost.....	27
2.4.3 Popis systému.....	28
2.4.3.1 Složení systému.....	28
2.4.3.2 Družice	29
2.4.3.3 Služby	29
2.4.4 Budování kosmického segmentu	30
3. Obtížný příjem	31
3.1 Omezená viditelnost družic.....	31
3.2 Vysoké hodnoty činitelů DOP	31
3.3 Mnohacestné šíření signálu.....	33
3.4 Odraz signálu	35
3.5 Útlum signálu.....	36
4. Městská zástavba.....	37
4.1 Rozdělení městské zástavby.....	37
4.2 Volba přijímače do městské zástavby	38
4.3 Metodika testovacích měření	40
4.4 Analýza městské zástavby	41
4.4.1 Místa s dobrým výhledem na oblohu	41
4.4.2 Příměstské aglomerace.....	42
4.4.3 Úzké ulice	42
4.4.4 Vysoké budovy (panelová sídliště).....	46
4.4.5 Mosty, víceúrovňové křižovatky apod.....	48
4.4.6 Místa se zakrytým výhledem na oblohu.....	48
4.4.7 Stromořadí.....	48
5. Závěr	50
Seznam použitých symbolů	51
Seznam použitých zkratek	52
Seznam použité literatury a zdrojů.....	56

GPS a GLONASS

1. Úvod

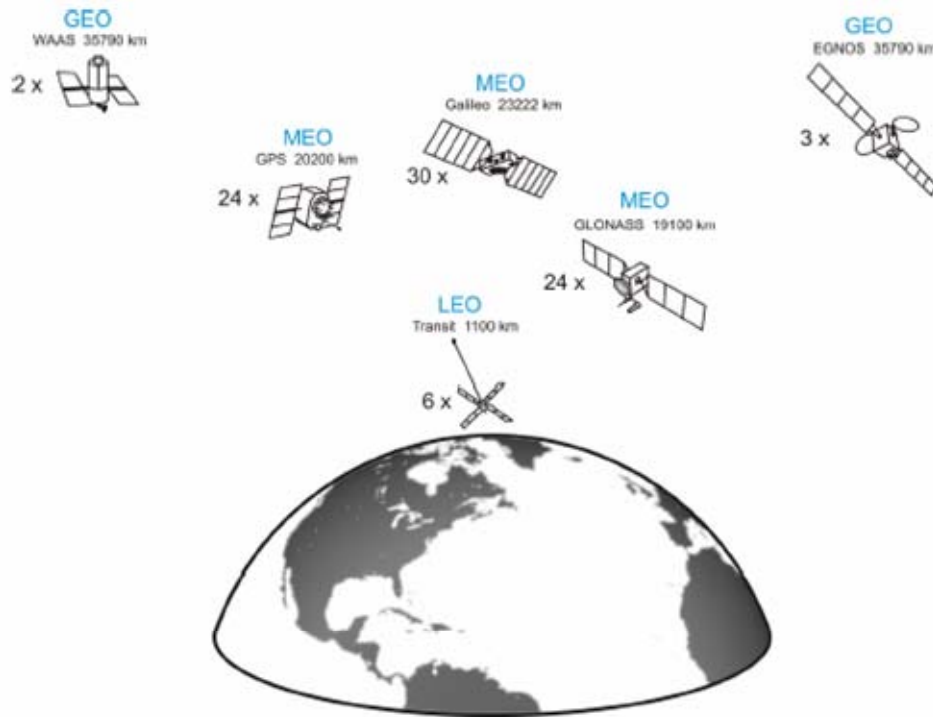
Cílem této práce je poskytnout představu o příjmu signálu družicových navigačních systémů v městské zástavbě. Ty se vyznačují poměrně vysokou přesností určení polohy pokud je volný výhled na oblohu. Zástavba ve městech však často blokuje signály družic a přesnost pak může výrazně klesat. Popis městské zástavby z hlediska příjmu signálu však není jednoduchý, protože je to velmi různorodé prostředí ať už se jedná o výšku, hustotu či charakter zástavby. Pro porozumění problematice je tedy nutné znát především možné příčiny snižující přesnost měření v dané lokalitě, které se mohou vyskytnout. Existuje jich více, mohou být ale způsobeny především nesprávným šířením signálu nebo nevhodným rozložením družic na obloze. Tyto příčiny jsou diskutovány ve třetí kapitole této práce. Pro jejich pochopení je také nutné znát také základní principy současných družicových navigačních systémů, zejména měření zdánlivé vzdálenosti. Popisu družicových navigačních systémů se věnuje druhá kapitola. Přečtení této práce by tedy mělo umožnit získat širší spojitosti o možnostech a omezeních navigace družicovými systémy v městské zástavbě.

2. GNSS

Družicové rádiové systémy určování polohy (RDSS – Radio Determination Satellite Systems) je obecný název přidělený navigačním systémům, které pro určování Polohy^[1], příp. navigaci^[2], využívají umělých družic obíhajících kolem Země. Jejich hlavní výhodou oproti systémům pozemním je potřeba relativně malého počtu vysílačů pro pokrytí velkého území, protože družice pracují vysoko nad zemským povrchem a pokrývají tak svými signály mnohem větší území než pozemní vysílače (radiomajáky). Jak ukazuje obr. 1, družice lze z hlediska nadmořské výšky oběžné dráhy rozdělit na družice s nízkou kruhovou dráhou (LEO – Low Earth Orbit), družice se střední kruhovou dráhou (MEO – Medium Earth Orbit) a geostacionární družice (GEO – Geostationary Earth Orbit). Nevýhodou systémů pracujících na nižších drahách je menší území pokryté signálem jednou družicí a krátká doba oběhu kolem Země a tedy i doba přeletu družice nad obzorem (odpovídá době, po kterou lze od dané družice přijímat signál). Naopak v čím vyšší nadmořské výšce družice vysílá, tím větší pokrytí má svým signálem, zvětšuje se však doba šíření signálu od družice.

[1] Určování polohy je stanovení zeměpisných souřadnic prostředku (uživatele).

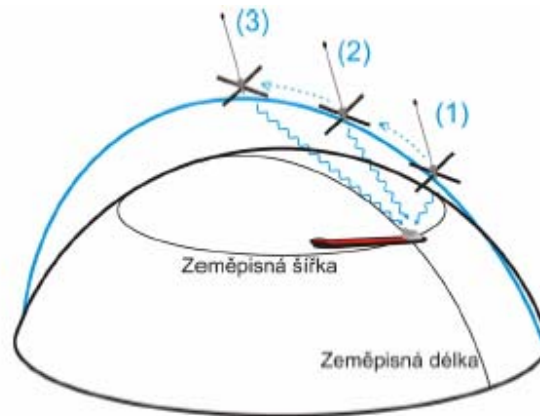
[2] Navigace je vedení dopravního prostředku po trati.



Obr.1: Navigační družice

Prvním skutečně funkčním družicovým navigačním systémem byl Transit. Byl to dopplerovský systém družicové navigace. To znamená, že výpočet polohy uživatele je založen na vzájemné změně^[3] frekvence signálu mezi družicí a uživatelským přijímačem v důsledku jejich vzájemného pohybu. Provedeme-li alespoň tři měření k jedné družici a známe-li její souřadnice v okamžicích měření, lze řešit soustavu tří rovnic o třech neznámých, kterými jsou souřadnice uživatele (obr. 2). Transit byl uveden do provozu v roce 1964, přičemž nejprve sloužil pouze potřebám námořnictva Spojených států. Od roku 1967 byl uvolněn pro civilní použití a poté využíván především v námořních aplikacích a pokusně i v letectví. Jeho největší slabinou byla skutečnost, že signál nebyl dostupný nepřetržitě, protože systém sice zajišťoval celosvětové pokrytí, ale používal pouze šest operujících družic pracujících na relativně nízkých orbitálních drahách LEO (1100km) s oběžnou dobou 106 minut. Takové družice se pohybují nad obzorem maximálně 18 minut a další prolétá nad daným místem na rovníku jednou za 2 hodiny, nad místem se zeměpisnou 45° jednou za 45 minut a nad místem se zeměpisnou šířkou 70° jednou za 25 minut. Činnost tohoto systému byla ukončena v roce 1996.

[3] Pokud se družice přibližuje k uživateli, frekvence přijímaného signálu je vyšší než vysílaného. Naopak pokud se vzdaluje, frekvence přijímaného signálu se snižuje.



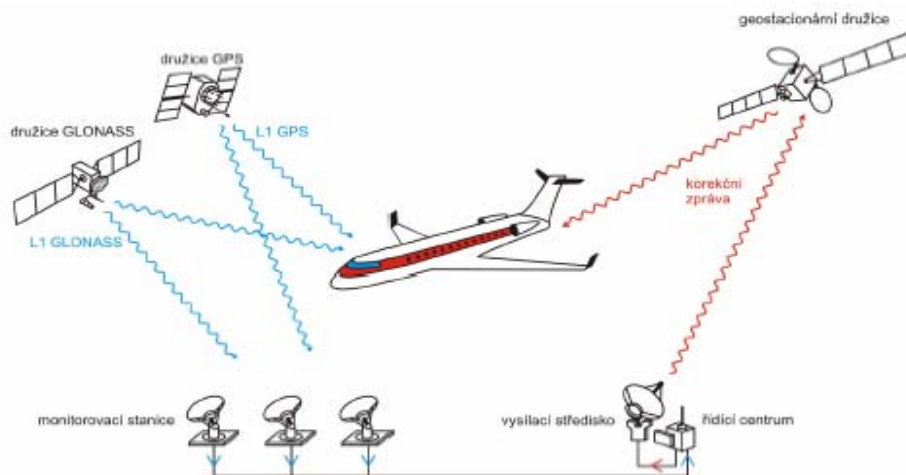
Obr.2: Princip systému tranzit

Pokud družicové systémy zajišťují celosvětové pokrytí signálem, pak se označují jako globální navigační satelitní systémy (GNSS – Global Navigation Satellite Systems). Jejich hlavní výhodou je schopnost určit polohu libovolného místa na Zemi s vysokou přesností a navíc pro celou Zemi poskytují jednotný souřadný systém. V tomto smyslu míníme hlavně navigační systémy jako americký GPS, ruský GLONASS a velmi očekávaný evropský systém satelitní navigace Galileo. Na rozdíl od systému Transit, který fungoval na principu Dopplerova jevu, využívají všechny tři právě jmenované včetně budoucího Galilea pasivní dálkoměrné metody (viz kapitola 2.1) určování polohy a pracují na středních kruhových drahách MEO.

Jedním z cílů družicové navigace je také zavedení samotných systémů GPS nebo GLONASS jako jediný navigační prostředek v letectví, to v dnešní době ještě není možné, neboť tyto systémy nespĺňují některé požadavky výhradního navigačního prostředku – zejména integrity zpráv a přesnost pro přesné přiblížení na přistání. Z tohoto důvodu se na území některých států či kontinentů budují lokální rozšiřující systémy, které v dané oblasti doplňují GPS (příp. GLONASS), aby bylo dosaženo právě potřebné přesnosti a integrity. Družice takových systémů využívají geostacionární orbity, v nichž zůstávají stále ve stejné pozici vůči zemskému povrchu. To znamená, že jejich oběžná doba je stejná jako rotace Země. Nadmořská výška takových oběžných drah je 35 790km.

Výhodou geostacionárních systémů je potřeba malého počtu navigačních družic, protože z jejich velké výšky pokrývají rozsáhlá území. Princip geostacionárních navigačních systémů je následující (obr. 3) – na daném území je rozmístěna síť referenčních stanic, které monitorují pohyb družic GPS a/nebo GLONASS. V řídicím centru se poté z odchylek jejich drah počítají korekce a ty se pak z vysílacího střediska předávají k distribuci uživatelům

prostřednictvím komunikační družice na geostacionární dráze. Uživatel pak tyto korekce použije pro zpřesnění určení své polohy. Tak lze s několika málo geostacionárními družicemi na daném území dosáhnout požadované přesnosti polohy, dostupnosti signálu a integrity zpráv, což umožní zavedení GPS (příp. GLONASS) jako výhradní navigační prostředek v letectví. Tyto rozšiřující systémy jsou známy pod pojmem SBAS (Space Based Augmentation Systems) a patří mezi ně zejména evropský EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), americký WAAS (Wide Area Augmentation System) a jeho japonská obdoba MSAS (Multi-Functional Satellite Augmentation System), (viz obr. 4) Existují ale i další.



Obr.3: Struktura systémů SBAS



Obr.4: Pokrytí SBAS

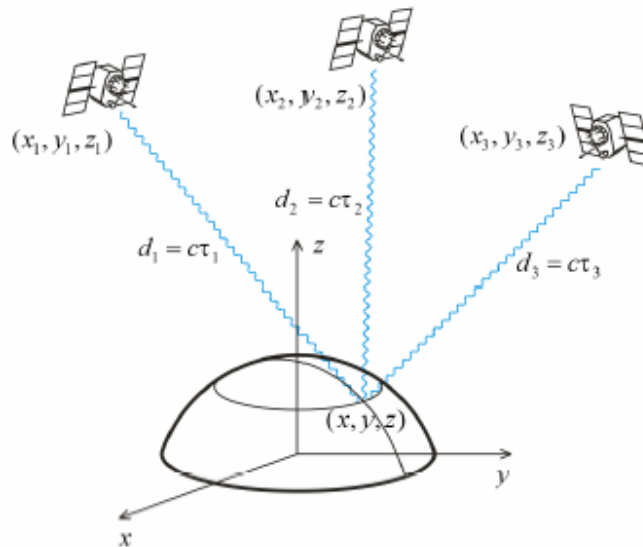
2.1 Dálkoměrná metoda

V družicové navigaci se nejvíce prosadila pasivní dálkoměrná metoda určování polohy^[4], která je zobrazena na obr. 5. Pasivní je tato metoda, protože uživatel systému signály pouze přijímá, žádné ale nevysílá. Princip této metody je založený na měření vzdáleností i d od jednotlivých družic pomocí Δt potřebných pro signál šířící se rychlostí c , aby překlenul vzdálenost družice – přijímač.

[4] Ještě existuje aktivní dálkoměrná metoda. Uživatel však musí být vybaven odpovídačem (musí být radiově aktivní). To však způsobuje hned několik nevýhod – může dojít k přetížení systému, je nutno používat směrové antény (problémy s miniaturizací přístroje) a vznikají komplikace s utajením uživatele (vojenské operace).

Pokud budeme v daném okamžiku znát souřadnice tří družic, lze teoreticky určit polohu uživatele řešením soustavy tří rovnic pro tři neznámé (x,y,z) .

$$d_i = c\tau_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad i = 1,2,3$$



Obr.5: Princip dálkoměrné metody

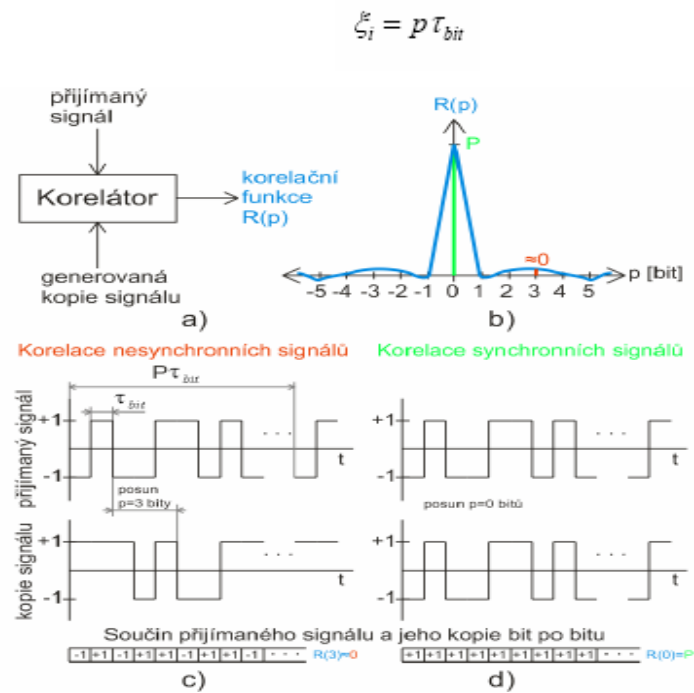
Ve skutečných realizacích pasivní dálkoměrné metody však nastává problém se synchronizací časové základny uživatele a systému. Družice mají na palubě přesné atomové hodiny, které jsou sledovány a korigovány řídicím segmentem. Hodiny přijímače však být atomové nemohou, jelikož přijímače (uživatelský segment) by pak byly nesrovnatelně dražší a drtivá většina uživatelů by byla nucena hledat jiné řešení pro navigaci. Uživatel tedy neměří skutečné vzdálenosti od družic, ale tzv. zdánlivé vzdálenosti D_i (Pseudorange), resp. jim odpovídající doby $i\tau$, které jsou v důsledku nepřesnosti hodin přijímače posunuty o stejný neznámý časový interval Δt oproti skutečné době šíření ir . K neznámým souřadnicím uživatele (x,y,z) tedy přibývá další neznámá Δt reprezentující posun časové základny uživatele k základně družicového systému. Z tohoto důvodu je ve skutečnosti nutno provést měření ke čtyřem družicím místo teoretických třech, čemuž odpovídá modifikace původní soustavy tří rovnic o třech neznámých na soustavu čtyř rovnic o čtyřech neznámých.

$$d_i = c\tau_i = c(\xi_i + \Delta t) = D_i + c\Delta t = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad i = 1,2,3,4$$

2.1.1 Měření zdánlivé vzdálenosti

Součástí signálu vysílaného družicí je tzv. dálkoměrný kód, který se využívá pro měření zdánlivé vzdálenosti. Je to dvoustavová pseudonáhodná posloupnost s periodou P , která nabývá hodnot ± 1 . Stejná pseudonáhodná posloupnost je generována také v přijímači. Aby mohla být zdánlivá vzdálenost změřena, je potřeba kopii dálkoměrného kódu generovanou v přijímači synchronizovat s přijímaným signálem. Tím se zjistí potřebný posuv^[5] p bitů kopie signálu oproti přijímanému signálu. Doba šíření $i \xi$ ^[6] se pak určí jako součin posuvu p s dobou trvání jednoho bitu τ , protože o tolik je nutno zpozdít kopii signálu, aby byla synchronizovaná s přijímaným signálem.

Základní vlastností dálkoměrného kódu je ostré maximum autokorelační funkce^[7] zajišťující přesné měření vzdáleností. Maxima se dosahuje pokud jsou dálkoměrné kódy družice a jeho kopie z přijímače synchronizované (mají nulový vzájemný posuv). Pokud synchronizované nejsou, korelační funkce R má malou hodnotu, viz obr. 6.



Obr.6: a) Korelátor, b) Korelační funkce dálkoměrného signálu
c) Korelace nesynchronních signálů d) Korelace synchronních signálů

[5] Pro jednoduchost je všude uvažován vzájemný posuv signálů o celý počet p bitů, pak lze konvoluční integrál korelační funkce nahradit sumou součinů jednotlivých bitů. Ve skutečnosti však korelátor pracuje spojité a signály se proti sobě posunují také spojité, tomu odpovídá i průběh korelační funkce na obr.6.

[6] Doba šíření je vůči posunutému časové základně přijímače, měříme totiž zdánlivou vzdálenost. Platí

$$D_i = c \xi_i$$

[7] Maximum korelační funkce dálkoměrného kódu má hodnotu P (počet bitů periody dálkoměrného kódu), vychází to z definice korelační funkce signálů pro posuv $0 = m$ bitů, tedy

Aby kopie vytvářená v přijímači byla synchronní s přijímaným signálem, je třeba řídit generátor kopií signálů napětím $u(p)$, jehož velikost a znaménko odpovídá velikosti a smyslu potřebného posuvu p , tzn. pokud je napětí $u(p)$ kladné, je potřeba kopii signálu zpoždit o velikost odpovídající velikosti $u(p)$, a pokud je záporné, je tomu naopak. Tuto vlastnost má obvod nazývaný diskriminátor zpoždění. Ten využívá dvou korelátorů, z nichž jeden je zpožděný a druhý předbíhá, a odečítá od sebe jejich výstupy, čímž získává potřebnou závislost napětí na posuvu signálů ($p \propto u$). Diskriminátor měří časové zpoždění odpovídající zdánlivé vzdálenosti).

$$R(0) = \sum_{k=0}^{P-1} c(k+0)c(k) = \sum_{k=0}^{P-1} 1 = P, \quad k \text{ je pořadí bitu v periodě dálkoměrného kódu.}$$

2.1.2 *Techniky oddělení dálkoměrných signálů jednotlivých družic*

KÓDOVÝ MULTIPLEX CDM (Code Division Multiplex)

Všechny navigační družice systému vysílají na nosné frekvenci se stejným kmitočtem, ale každá má přidělený jiný dálkoměrný kód. Díky tomu se signály družic nemohou zaměnit, protože vzájemná korelační funkce dvou různých kódů odpovídá přibližně nule. Kódového multiplexu využívá navigační systém GPS (viz kapitola 2.2.)

FREKVENČNÍ MULTIPLEX FDM (Frequency Division Multiplex)

Oddělení signálu jednotlivých družic je zajištěno díky tomu, že každá družice vysílá na jiné nosné frekvenci. Pro systém je pak však potřeba vyhradit širší frekvenční pásmo než při použití kódového multiplexu. Frekvenčního multiplexu využívá ruský systém GLONASS (viz kapitola 2.3).

2.2 *GPS*

Americký družicový navigační systém GPS (Global Positioning System) označovaný také jako NAVSTAR (Navigation System Using Time And Range) je v současné době nejdokonalejší a nejpoužívanější ze všech družicových navigačních systémů. Je to systém původně vojenský, který však našel velké uplatnění i v civilních aplikacích a díky nedostatku konkurence na trhu si právě v civilním sektoru vydobyl prakticky monopolní postavení. Je to dáno zejména finančními prostředky, které jsou na něj vynakládány a tím, že jeho největší konkurent, ruský GLONASS, se díky vysoké poruchovosti svých družic a nedostatku finančních prostředků na výstavbu nových příliš neprosadil.

2.2.1 Historie GPS

Systém GPS je budován americkým ministerstvem obrany (U.S.Department of Defence) od poloviny 70.let. Hlavní práce na výstavbě až do dosažení plného operačního stavu FOC (Full Operational Capability) systému lze rozdělit do tří fází.

Fáze I: 1973 – 1979

V této fázi byly nejprve ověřeny stěžejní principy systému. V prosinci 1978 byla na oběžnou dráhu vypuštěna 4. družice bloku I – to umožňovalo třírozměrnou navigaci po omezenou dobu v testovacím polygonu Yuma Proving Ground v Arizoně. Družice bloku I rozvíjely technologii GPS, bylo jich vypuštěno celkem 11. Každá nesla troje atomové hodiny – jedny s cesiovým a dvoje s rubidiovým normálem. Rovněž byla v tomto období zkonstruována první pokusná uživatelská zařízení.

Fáze II: 1979 – 1985

Firma Rockwell byla v roce 1980 vybrána pro vývoj 28 družic bloku II^[8]. Tyto družice jsou vybaveny přístrojem na detekci jaderných explozí, mají vylepšené odstínění před kosmickým zářením, nesou čtveřici atomových hodin (dvoje rubidiové a dvoje cesiové) a dokáží pracovat 14 dní bez nutnosti korekcí z MCS. Některé družice bloku II dodnes pracují. Pro vývoj armádního uživatelského zařízení byly vybrány firmy Rockwell – Collins a Magnavox. V této fázi také byly vybudovány pozemní střediska systému.

Fáze III: 1985 – 1994 (dosažení FOC)

Postupně byly vyráběny a na oběžnou dráhu vyneseny družice bloku II a IIA, které také postupně nahrazovaly družice bloku I. Počátečního operačního stavu IOC (Initial Operational Capability), tzn. stavu kdy operuje předepsaných 24 družic a kdy provozovatel oznamuje změny provozního stavu civilním uživatelům 48 hodin předem, systém dosáhl 8. prosince 1993. Plného operačního stavu FOC, ve kterém jsou již všechny zbylé družice bloku I nahrazeny družicemi bloku II a IIA, bylo dosaženo 17.července 1995 po důkladném testování. Nejmodernější typ družic v současnosti umístěných na oběžné dráze představuje blok IIR^[9]. Tyto družice mohou stejně jako družice bloku IIA mohou pracovat 180 dní bez kontaktu

[8] 10. až 28. družice bloku II se označuje jako IIA. Je to lehce modifikovaná verze s možností pracovat po dobu 180 dnů bez kontaktu s řídicím střediskem a s laserovými odražeči umožňujícími velmi přesné měření polohy družice. Z hlediska civilního uživatele však poskytují družice bloku II a IIA identickou službu.

[9] Výrobce Lockheed Martin.

se střediskem, navíc mají opět vylepšené odstínění, troje atomové hodiny s rubidiovým standardem a budou moci komunikovat mezi sebou a zjišťovat svou polohu, což umožní např. rychlé zjištění chybné funkce některé družice. Technologie GPS byla původně určena pouze vojenské účely jako lokalizační a navigační prostředek, v 80. letech však americká vláda rozhodla o jeho uvolnění i pro civilní účely. Od té doby došlo k obrovskému rozšíření systému GPS do mnoha oblastí lidské činnosti.

Protože přesnost systému pro civilní uživatele byla velmi přesná vzhledem k požadavku na strategickou bezpečnost spojených států, rozhodla 25. března 1990 vláda o zavedení výběrového přístupu SA (Selective Availability). Výběrový přístup je způsob záměrné degradace přesnosti určení polohy pomocí systému GPS modifikací C/A kódů. Po jeho zavedení poskytovala služba SPS, která je určena pro civilní uživatele, horizontální přesnost určení polohy 100 m (95%) a vertikální přesnost určení polohy 156 m (95%).

Kvůli velkému tlaku civilních uživatelů mohutně využívajících technologii GPS byl výběrový přístup 2. května 2000 zrušen rozhodnutím prezidenta USA Billa Clintona. Přesto si Spojené státy vyhrazují právo omezit sílu nebo přesnost signálu GPS, nebo dokonce veřejný přístup zamezit úplně, aby v době války nemohl systém užívat nikdo kromě autorizovaných uživatelů.

2.2.2 Složení systému

Systém GPS se skládá ze tří segmentů:

- Kosmický (Space Segment)
- Řídící (Control Segment)
- Uživatelský (User Segment)

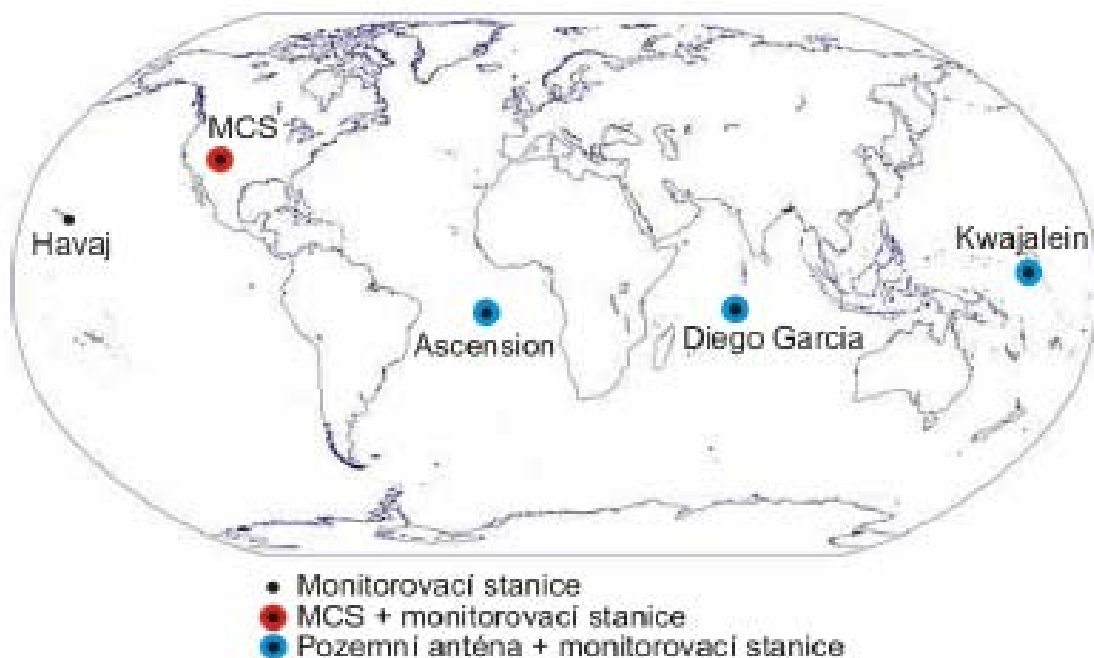
Kosmický segment tvoří 24 družic včetně 3 záložních, které je možno při poruše nějaké družice okamžitě použít. Tato konstelace je rozdělena na 6 orbitálních rovin s inklinací^[10] 55°. V každé rovině obíhají 4 družice, roviny jsou vůči sobě natočeny o 60° a pokryjí tak plný úhel. Výška drah je 20200 km a oběžná doba 11 hodin 58 minut. Takto rozmístěná konstelace umožňuje vidět z každého místa na Zemi alespoň 5 družic. Řídící segment se skládá ze tří hlavních částí:

1. Hlavní řídicí stanice MCS (Master Control Station)
2. Monitorovacích stanic
3. Pozemních antén

[10] Úhel mezi oběžnou rovinou a rovníkem.

MCS, umístěná na letecké základně Falcon v Colorado Springs, je řídicí bod celé GPS konstelace družic. Zajišťuje a udržuje nepřetržitou funkčnost systému a jeho přesnost ve shodě s předepsanými standardy, sleduje dráhy družic a v případě potřeby je může měnit, zajišťuje synchronizaci atomových hodin družic a výpočet parametrů jejich drah (efemerid). Dále zajišťuje údržbu družic a v případě závady na družici se stará o okamžitou nápravu.

Monitorovací stanice pasivně sledují družice a přijímají jejich data, která předávají MCS. Pozemní antény provádějí dálková měření (Telemetrii) družic a výsledky těchto měření předávají MCS. Opačným směrem předávají od MCS ke družicím příkazy a navigační data. Monitorovacích stanic^[11] je 5 – Kwajalein (Tichý oceán), Ascension (Atlantický oceán), Diego Garcia (Indický oceán), Havaj (Tichý oceán) a jedna je přímo v MCS. Pozemní antény pro komunikaci mají první tři jmenované. Rozmístění MCS, monitorovacích stanic a pozemních stanic je zobrazeno na obr. 7. Uživatelský segment se skládá z GPS přijímačů jednotlivých uživatelů. Jejich provoz není spojen s žádnými poplatky za využívání služby. Protože přijímače nekomunikují s družicemi (pouze přijímají signály), je systém GPS schopen obsloužit neomezený počet uživatelů.



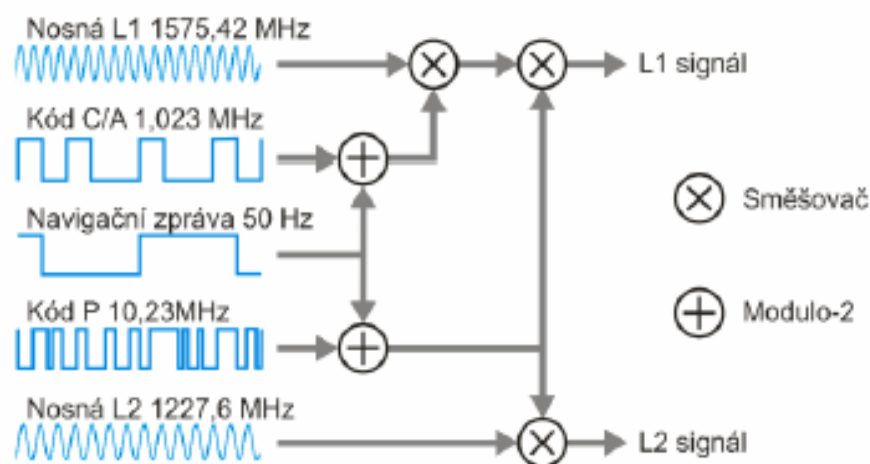
Obr.7: Rozmístění stanic pozemního segmentu

[11] Všechny jsou rozmístěné poblíž rovníku.

2.2.3 Signál GPS

Každá družice generuje navigační zprávu s frekvencí 50 Hz na základě periodicky přijímaných dat z řídicího segmentu a binárně ji sčítá (operace modulo 2) s dálkoměrným kódem C/A, který má frekvenci 1,023 MHz. Vzniká tak signál s rozprostřeným spektrem. Ten je poté modulován na nosnou frekvenci L1 1575,42 MHz, čímž vznikne výsledný signál vhodný pro přenos radiovou cestou, který je pomocí pole spirálových antén s pravotočivou polarizací vyslán směrem k Zemi. Každá družice má vlastní unikátní kód C/A, což umožňuje rozlišit jednotlivé družice konstelace. Jedná se tedy o kódové dělení CDM (Code Division Multiplex).

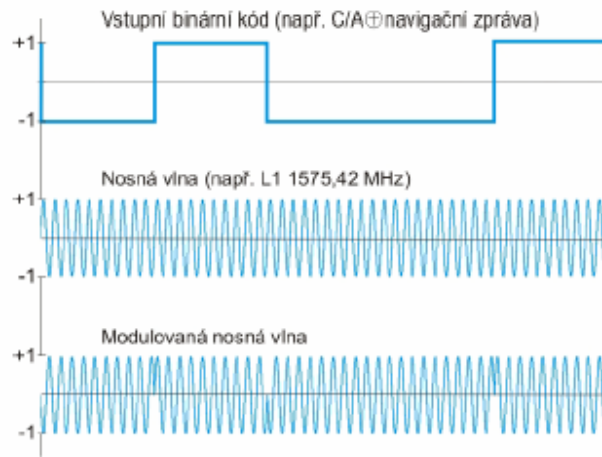
Obdobně družice sčítají navigační zprávu i s druhým dálkoměrným kódem označovaným jako P kód, který má frekvenci desetkrát vyšší než C/A kód, tedy 10,23 MHz. Ten moduluje nejenom nosnou frekvenci L1 jako C/A kód, ale také nosnou frekvenci L2 1227,6 MHz. Generaci signálu znázorňuje obr. 8.



Obr.8: Generace signálů družic

2.2.3.1 Modulace

Systém GPS používá dvoustavové fázové klíčování BPSK (Bipolar Phase Shift Keying), které má tu vlastnost, že při minimálním vysílací výkonu dokáže přenést signál na velkou vzdálenost, neboť symboly jsou vzdálené o 180° – to činí BPSK velmi odolnou proti chybám. Když totiž dojde ke změně hodnoty vstupního binárního kódu, posune se fáze nosné vlny o polovinu vlnové délky (obr.9). Binární jednička je reprezentována hodnotou +1, binární nula pak hodnotou -1.



Obr.9: Modulace BPSK (obrázek: není ve správném měřítku, ve skutečnosti je 1 bit C/A kódu reprezentován 1540 periody nosné L1)

2.2.3.2 Dálkoměrné kódy

Dálkoměrné kódy systému GPS jsou unikátní pseudonáhodný sekvence, které modulují nosné vlny a zajišťují tak přesné měření zdánlivých vzdáleností a jednoznačnou identifikaci družic. Označují se také jako tzv. PRN kódy (Pseudo Random Noise), protože se podobají náhodnému šumu. Jsou generovány pomocí posuvných registrů nebo v moderních přijímačích mohou být uloženy v paměti.

C/A KÓD

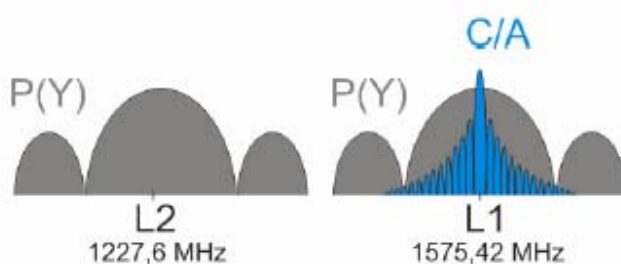
Tento kód je vyhrazen především pro neautorizované uživatele a je označován jako kód pro hrubé měření (Coarse Acquisition). Má délku 1023 bitů a je vysílán frekvencí 1,023 MHz, takže se opakuje každou milisekundu. Moduluje nosnou vlnu v pásmu L1 a rozprostírá se v pásmu širokým 2,046 MHz se středem na frekvenci L1(obr. 10).

P(Y) KÓD

Kód P (Protected) je vyhrazen pouze autorizovaným uživatelům (ozbrojené složky USA a jejich spojenci). Je rychlejší než C/A kód, má frekvenci 10,23 MHz a tedy i desetinásobnou bitovou rychlost 10,23 Mbit/s. Tím dochází k většímu kmitočtovému rozptýlení signálu (obr. 10) a zvyšuje se přesnost měření. K dalšímu zvyšování přesnosti tímto kódem dochází díky tomu, že moduluje obě nosné frekvence L1 i L2. Tím se podstatně omezuje vliv ionosférických a troposférických refrakcí. P kód je velmi dlouhý – 2,354·10¹⁴ bitů. Při bitové rychlosti 10,23 Mbit/s tak dostáváme periodu trvající přibližně 266 dní. Kód je rozdělen na 37 částí týdních

částí, které jsou přiděleny jednotlivým družicím. Vždy o půlnoci ze soboty na neděli dochází ke změně vysílaných částí kódu.

Pokud je P kód šifrován, označuje se jako Y kód. K jeho dekódování je potřeba kryptografický klíč, s kterým však pracují pouze autorizované přístroje, tedy většinou armáda. Zakódování je součástí režimu A-S (Anti-Spoofing). A-S je způsob ochrany vojenského P kódu před případným podvržením nebo zneužitím nepřítelem.



Obr.10: Spektrum signálu GPS

2.2.3.3 Navigační zpráva

Navigační zpráva jsou vlastně užitečná data vysílaná družicí potřebná pro stanovení přesného času a polohy uživatele. Zpráva však neobsahuje přímo polohu družice, nýbrž parametry své dráhy a další nezbytné informace potřebné pro výpočty polohy, rychlosti a času, které se provádí v přijímači.

Protože navigační zpráva je generována s frekvencí pouze 50 Hz (bitový tok 50 bit/s), je přenášena spolu s dálkoměrným kódem pomocí techniky rozprostřeného spektra (obr. 11), tzn., že jeden bit navigační zprávy je přenášen pomocí mnoha bitů (chipů) rozprostírací sekvence – tento poměr se nazývá rozprostírací faktor SF (Spreading Factor).

$$SF = \frac{f_{rozprostiraci}}{f_{data}}$$

Pokud do vztahu dosadíme frekvence dálkoměrných kódů a navigační zprávy, vypočteme rozprostírací faktory SFC/A=20460 a SFP=204600, tzn., že jeden bit navigační zprávy je přenášen 20460 bity C/A kódu, resp. 204600 bity P kódu. Dekódování zprávy v přijímači je prováděno opačným způsobem (obr.11), tedy rozprostřená data se binárně sečtou (operace modulo-2) s rozprostíracím kódem (C/A nebo P).

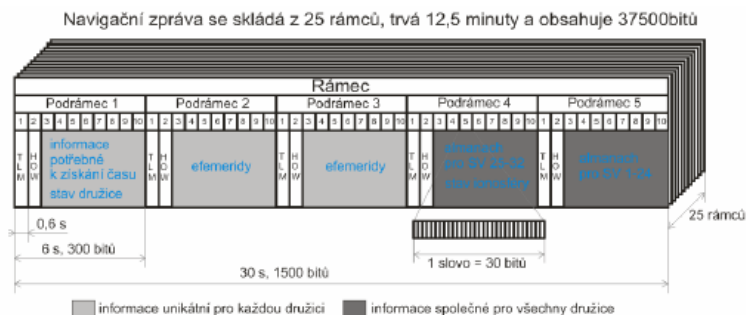


Obr.11: Přenos navigační zprávy pomocí rozprostřeného spektra

Navigační zpráva, která je zobrazena na obr.12, se skládá z 25 rámců a její přenos trvá 12,5 minuty. Každý rámeček trvající 30 sekund obsahuje 1500 bitů rozdělených do 5 šestisekundových podrámečků po 300 bitech. Každý podrámeček se dále dělí na deset slov.

Slovo trvá 0,6 sekundy a se skládá ze 30 bitů, z nichž 6 slouží pro zabezpečení přenosu pomocí Hammingova kódu. Ten umožňuje detekci 3 chyb a opravu jedné. Význam prvních dvou slov je u všech podrámečků stejný. Slovo TLM (Telemetry Word) se stará o synchronizaci podrámeček a také nese telemetrickou informaci určenou pro řídicí segment. Slovo HOW (HandOver Word) obsahuje informaci o pořadí podrámeček od začátku týdne, o čísle podrámeček v rámci a o tom, zda-li je zapnut režim A-S. Pokud ano, pak je místo kódu P použit kód Y. Zbylá slova 1. podrámeček obsahují detailní informace o stavu družice, údaje o

týdnu GPS a další informace potřebné pro korekci času. Obsahem 2. a 3. podrámeček jsou efemeridy družice, pomocí kterých lze určit polohu družice v daném okamžiku. 5. podrámeček a část 4. jsou vyhrazeny pro almanach. Almanach nese méně přesné informace o poloze a stavu ostatních družic – to umožňuje při příjmu signálu alespoň jedné družice snáze vyhledávat ostatní. 4. podrámeček obsahuje také údaje, pomocí nichž lze potlačit zpoždění signálu způsobené ionosférou.



Obr.12: Navigační zpráva GPS

2.2.4 Přesnost GPS

Přesnost určení polohy navigačního systému GPS je nejčastěji udávána buď jako střední kvadratická chyba RMS (také efektivní chyba) nebo jako chyba (95%). Hodnota chyby (95%) udává údaj o hranici, kterou chyba určení pozice nepřekročí s pravděpodobností 0,95. V případě jednorozměrných veličin jako výška je touto hranicí úsečka, v případě dvourozměrných veličin (horizontální chyba) je jí poloměr kružnice, a konečně prostoru je jí poloměr koule. Následující tabulka č.1 udává průměrné hodnoty chyby (95%) systému GPS pro civilní uživatele, tedy přesnost určení pozice s pravděpodobností 95% pro průměrné místo na Zemi při plném výhledu na oblohu při příjmu na jednom či dvou kmitočtech (hodnoty jsou převzaty z [1]).

Veličina / Počet kmitočetů	Jeden kmitočet	Dva kmitočty
Prostorová chyba (95%) [m]	51	37
Horizontální chyba (95%) [m]	29	21
Vertikální chyba (95%) [m]	46	34

Tab.1: Hodnoty chyby 95% pro celou Zemi

Střední hodnota kvadratické chyby RMS udává údaj o hranici, ve které se nachází zhruba 68% hodnot radiálních chyb. Opět je můžeme rozdělit na jedno, dvou i třírozměrné. Tyto chyby jsou oblíbené hlavně u výrobců přijímačů GPS, neboť poskytují menší hodnoty (obsahují pouze 68% hodnot) než ekvivalentní chyby 95% (obsahují 95% hodnot). Zejména je pak oblíbená horizontální efektivní chyba (označována jako 2D RMS), protože poskytuje nejmenší číselné hodnoty ze všech, což ze strany výrobce působí na zákazníky dojmem přesnějšího přijímače. Ekvivalentní efektivní chyby RMS pro průměrné místo k hodnotám z předchozí tabulky jsou uvedeny v tabulce č.2:

Veličina / Počet kmitočetů	Jeden kmitočet	Dva kmitočty
Prostorová ef.chyba [m]	31	23
Horizontální ef.chyba [m]	16	10
Vertikální ef.chyba [m]	23	17

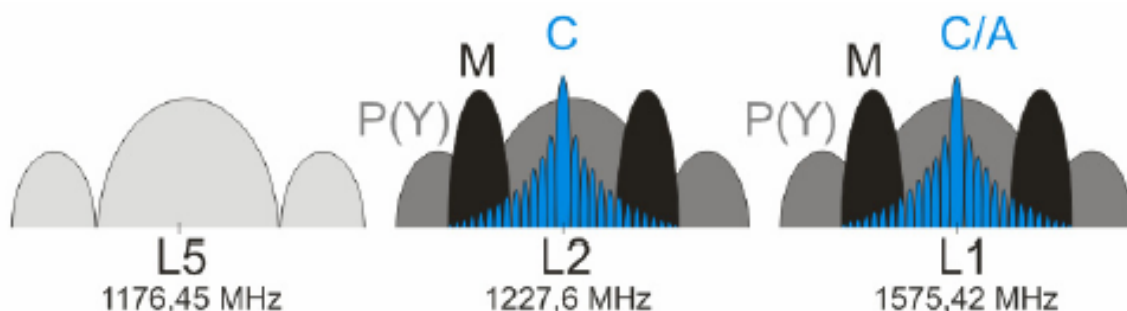
Tab.2: Průměrné hodnoty RMS

Příčin chyb systému je celá řada. Největší chybu při příjmu na jednom kmitočtu způsobuje ionosférická a troposférická refrakce. Družice způsobují chybu odchýlením od oběžné dráhy a drobnou nestabilitou kmitočtového normálu atomových hodin. Šum přijímače také způsobuje

jistou chybu a ve výše udávaných číslech je započtena i jistá malá chyba způsobená^[12] mnohacestným šířením. Všechny tyto chyby jsou součástí směrodatné odchylky efektivní chyby RMS vzdálenosti $d \sigma$. Výsledná efektivní chyba RMS je však dána součinem směrodatné odchylky a činitelem DOP (viz kapitola 3.2).

2.2.5 Modernizace systému

Přítomný čas „budován“ byl na začátku kapitoly o historii GPS i přesto, že je již systém GPS v plném nasazení, použit oprávněně, neboť technologie GPS prochází neustálým vývojem z důvodů zvyšujících se požadavků na navigaci a přesnost určení polohy vojenským i civilním sektorem. Další pohnutkou modernizace systému GPS je zcela zřejmě i opětovný pokus o širší uplatnění navigačního systému GLONASS, ale hlavně současná výstavba navigačního systému Galileo, který bude poskytovat mnohem vyšší přesnost určení polohy než současný systém GPS. Z hlediska civilního uživatele bude velkým přínosem pro zvýšení přesnosti určení polohy brzké zavedení nového civilního C (Civil) kódu, který bude modulovat frekvenci L2 a umožní tak civilním uživatelům měření na dvou frekvencích, což významně eliminuje vliv ionosférické a troposférické refrakce. Ve stejné době bude zaveden také nový vojenský M (Military) kód s mnohem silnějším šifrováním, který by měl zamezit možnému podvržení nepřítelem. M kód bude vysílán na frekvenci L1 i L2. Zároveň dojde ke zdokonalení technik umožňující odepření přístupu na určitém území například při válečném konfliktu. O něco později je naplánováno vytvoření zcela nové frekvence L5 s kmitočtem 1176,45 MHz, která bude přizpůsobena především potřebám letecké navigace, zejména přistávání letadel. Kompletní spektrum budoucího signálu je zobrazeno na obr.13.



Obr.13: Spektrum budoucího signálu GPS

¹² Malá protože se bere průměrné místo na Zemi, ale při volném výhledu na oblohu.

Zavedení nových frekvencí L1 M, L2 M a L2 C umožní modernizované družice bloku IIR-M. Zároveň budou tyto družice disponovat zvýšeným vysílacím výkonem. Jejich koncepce vycházející z bloku IIR však neumožňuje zavést vysílání na frekvenci L5. To umožní až družice bloku IIF, které jsou v současné době vyvíjeny firmou Boeing. Jejich velkou předností bude také zavedení digitálních atomových hodin s césiovým standardem. Tyto procesorem řízené hodiny dokáží kompenzovat měnící se podmínky okolního prostředí, provádět diagnostické testy, upravit své vnitřní parametry a zajistit tak co nejpřesnější chod. To je jedinečná výhoda oproti klasickým atomovým hodinám. Ty po nastavení při výrobě již nelze upravovat a vlivem stárnutí klesá jejich frekvenční stabilita.

2.3 GLONASS

Ruský globální navigační satelitní systém GLONASS (Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistema) je pasivní dálkoměrný navigační systém stejně jako GPS. Spravují ho ruské vesmírné síly. Tehdejší Sovětský svaz ho přihlásil jako civilní a jeho parametry zveřejnil v r.1988 na konferenci mezinárodní organizace civilního letectví ICAO. V oficiální dokumentaci [4] je napsáno, že účel tohoto globálního navigačního systému je poskytovat neomezený počet třírozměrného určování polohy, měření rychlosti a času za každého počasí kdekoliv na světě nebo v blízkém vesmírném prostoru pro letecké a námořní aplikace nebo jiné uživatele.

Ještě před samotným popisem systému je nutno podotknout, že navigační systémy GLONASS a GPS jsou si více než podobné. Princip systémů i jejich technická realizace je u obou systémů obdobná. Ať už se jedná o složení systému, služby, počet družic, modulaci, použití dálkoměrných kódů pro měření vzdáleností a navigačních zpráv pro výpočet polohy družice. Jejich jediný větší rozdíl zřejmě spočívá v rozdílném způsobě multiplexování pro oddělení družic.

2.3.1 Složení systému

Stejně jako GPS i GLONASS se skládá ze tří segmentů:

- Vesmírný
- Řídící
- Uživatelský

Kompletně rozmístěná konstelace obsahuje 24 družic, z nichž 21 je aktivní a 3 jsou záložní. Tyto družice obíhají v třech orbitálních rovinách (na rozdíl od 6 orbitálních rovin konstelace

GPS), které jsou vůči sobě natočeny o 120° a s rovinou rovníku svírají úhel $64,8^\circ$. V každé z těchto rovin je rovnoměrně po 45° rozmístěno 8 družic tak, aby pokryly plný úhel. Každá družice obíhá po přibližně kruhové dráze v nadmořské výšce 19100km s oběžnou dobou 11 hodin 15 minut. Rozmístění satelitů poskytuje viditelnost alespoň 5 satelitů kdekoliv na světě^[13]. Kontrolní segment se skládá z řídicího centra nedaleko Moskvy a sítě referenčních stanic rozmístěných na území Ruska. Kontrolní segment monitoruje celou konstelaci, vytváří korekce a vysílá (upload) je družicím. Uživatelský segment je přijímač s procesorem, který přijímá a zpracovává GLONASS navigační radiosignály a umožňuje tak uživateli vypočítat souřadnice, rychlost a čas.

2.3.2 Signály GLONASS

Systém GLONASS poskytuje 2 služby. Standardní SP (Standard Precision) na nosné frekvenci L1 pro civilní uživatele a přesnou HP (High Precision) na nosné frekvenci L2 pro armádu. Oddělení signálů jednotlivých družic je uskutečněno pomocí frekvenčního dělení FDM. To znamená, že každá družice GLONASS vysílá na své vlastní frekvenci, která se liší od frekvence ostatních družic. Konkrétní číselné hodnoty všech nosných frekvencí L1 i L2 lze získat z následujících vztahů:

$$L1 = f_{01} + k\Delta f_1$$

$$L2 = f_{02} + k\Delta f_2$$

$f_{01} = 1602$ MHz a $f_{02} = 1246$ MHz jsou nominální frekvence, $\Delta f_1 = 5,562$ kHz a $\Delta f_2 = 5,437$ kHz jsou nejmenší rozestupy nosných frekvencí a k může nabývat hodnot celých čísel z intervalu $13 ; 7 -$. Pokud do vztahů dosadíme, získáme pro L1 krajní hodnoty nosných frekvencí 1598,0625 MHz a 1609,3125 MHz. Pro L2 pak 1242,9375 MHz a 1251,6875 MHz. Každé pásmo tak poskytuje 21 nosných frekvencí. Protože v systému GLONASS je však plánováno s 24 družicemi, některé musí pracovat na stejných frekvencích – ty jsou vždy umístěny antipolárně ve stejné oběžné rovině a uživatel tak nikdy nemůže přijmout dva signály se stejnou frekvencí.

13 Ovšem za podmínky 24 družic na oběžné dráze. To v současné době není splněno.

2.3.2.1 Modulace

Generace navigačního signálu je také podobná jako u GPS. Použitá modulace je BPSK. Pomocí ní se na nosné vlny moduluje sekvence bitů, která je vytvořena modulo-2 sčítáním následujících signálů:

- Dálkoměrný kód (511 kbit/s), navigační zpráva (50 Hz) a pomocná sekvence (100Hz) pro signál L1
- Dálkoměrný kód (511 kbit/s) a pomocná sekvence (100 Hz) pro signál L2

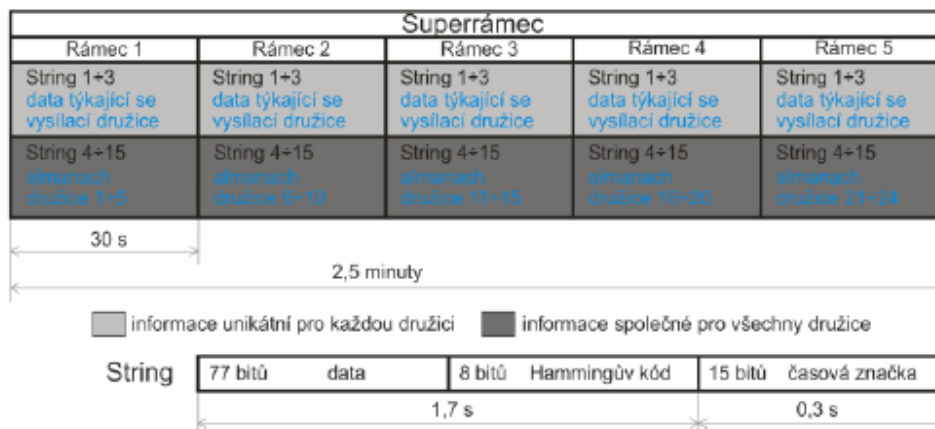
2.3.2.2 Dálkoměrné kódy

Dálkoměrný kód je u služby SP pseudonáhodná posloupnost délky 511 bitů s frekvencí 0,511MHz a periodou trvající 1 ms. U služby HP je v dokumentaci [4] napsáno, že používá speciální kód a že jeho neoprávněné používání bez povolení ministerstva obrany Sovětského svazu se nedoporučuje.

2.3.2.3 Navigační zpráva

Navigační zpráva má frekvenci 50 Hz a obsahuje dva typy dat. Jedny jsou určeny pro okamžité použití a souvisí s družicí, která je vysílala. Tento typ zahrnuje efemeridy, rozdíl mezi časem družice a systémovým časem^[14] GLONASS a relativní rozdíl mezi nosnou frekvencí satelitu a nominální frekvencí. Druhým typem dat je almanach, který má delší platnost a popisuje celou konstelaci družic. Navigační data jsou přenášena pomocí opakujících se superrámců (obr.14). Superrámec trvá 2,5 minuty a se skládá z 5 půlminutových rámců. Každý rámec se skládá z 15 dvouvteřinových řetězců (Stringů), které obsahují 100 bitů–77 bitů data, 8 bitů zabezpečení Hammingovým kódem a 15 bitů časové značky. Vždy první 3 řetězce každého rámce obsahují informace o vysílající družici, zbylých 12 pak almanach pro 5 družic, kromě 5. rámce, který nese almanach pouze pro 4 družice a poslední 2 řetězce zůstávají nevyužité.

[14] Systémový čas GLONASS předbíhá o 3 hodiny světový čas UTC (Universal Time Coordinated).



Obr.14: Navigační zpráva GLONASS

2.3.3 Přesnost GLONASS

Přesnost navigačního systému GLONASS (když byl na vrcholu své funkčnosti):

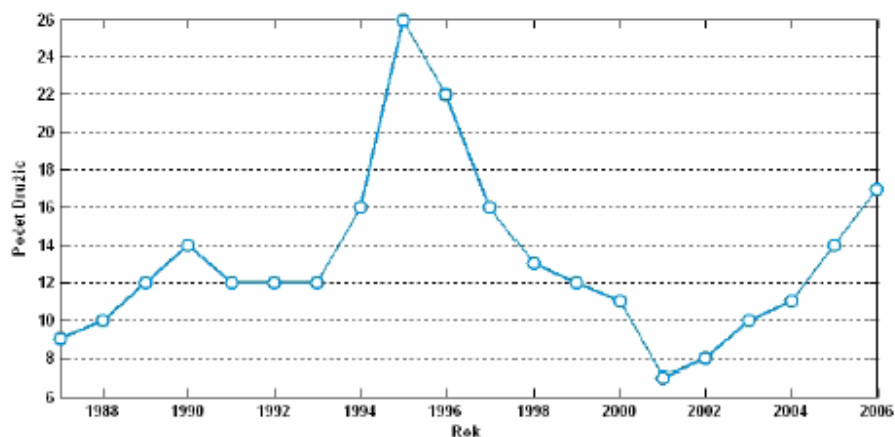
- horizontální přesnost určení pozice 57 až 70m (99,7%)
- vertikální přesnost určení pozice 70m (99,7%)
- přesnost vektoru rychlosti 15cm/s
- přesnost času 1 μ s

2.3.4 Historie a budoucnost GLONASS

První testovací družice byla vypuštěna na orbitální dráhu v říjnu roku 1982, v prosinci roku 83 pak již na svých drahách bylo umístěno pět družic systému GLONASS, což již umožňovalo pokusně využívat systém pro určování pozice. Původně bylo zamýšleno, že systém bude uveden do provozu v roce 1991, oficiálně pak bylo oznámeno datum 24.zář 1993, ale nakonec byl systém kompletní až v prosinci roku 1995, kdy obsahoval 26 družic (Obr.15). Vzhledem k vysoké poruchovosti družic a špatné ekonomické situaci v Rusku porozpadu Sovětského svazu klesl počet operujících družic v roce 2001 až na pouhých 7 (obr.15) a systém byl pro navigaci v globálním měřítku prakticky nepoužitelný.

Poté co se ekonomická situace v Rusku začala zlepšovat, začala vláda program opět plně podporovat. V současné době globální navigační systém GLONASS obsahuje na orbitálních drahách 17 družic (obr.15). Jsou to družice dvou typů. Původní typ družic GLONASS označovaný jako Uragan a modernizované Uragan-M družice, jejichž hlavní výhodou je přidání civilního kódu na frekvenci L2 podobně jako u družic GPS bloku IIRM.

Uragan-M navíc vydrží 7 let, má dvojitě solární panely a césiové atomové hodiny poskytující systému přesnost vyšší než 1000 nanosekund. Rusko navíc nyní ve spolupráci s Indií vyvíjí úplně nové Uragan-K družice, které budou o polovinu lehčí a umožní tak významně snížit náklady na jejich umístění na orbitální dráhu, neboť nová ruská nosná raketa Sojuz-2 jich dokáže při jednom startu vynést až 6 . Uragan-K také nabídne nové frekvenční pásmo 1164 až 1215 MHz určené pro navigaci letadel a jeho provozní doba se bude pohybovat mezi deseti a dvanácti lety. Odhaduje se, že 24 družic by znovu mělo být na oběžné dráze kolem roku 2010.



Obr.15: Počet družic kosmického segmentu v jednotlivých letech

2.4 Galileo

Galileo je v současné době budovaný družicový navigační systém, který bude evropskou alternativou k americkému GPS a ruskému GLONASSu. Tento systém však bude ryze komerční záležitostí, což je velký rozdíl oproti předchozím dvěma systémům, které byly zkonstruovány původně pro vojenské účely a až poté se začaly využívat v civilních aplikacích. V případě válečného konfliktu však může být civilním uživatelům odepřen přístup k těmto systémům. Proto chce Evropa mít svůj globální družicový navigační systém, který bude neotřesitelný politickou situací ve světě a stát se v tomto směru nezávislou na americkém GPS. S využitím Galilea se již nyní počítá po celém světě, protože bude nabízet mnoho nových možností uplatnění v řadě aplikací, které nynější navigační systémy nejsou schopny zajistit. Je to z toho důvodu, že Galileo je od začátku projektováno zejména pro maximální možné komerční využití. Galileo bude umožňovat navigaci i v tunelech a budovách. Počítá se s mnoha zajímavými službami jako např. navigace nakupujících v obchodních centrech, vyhledávání

osob nebo různých objektů (nejbližší kino,...) nebo zabezpečování důležitých dat posílaných přes síť Internet pomocí fyzické polohy počítače – to má velký potenciál pro internetové bankovníctví. Již nyní je o tento systém velký zájem po celém světě, který dokazuje zájem mnoha států i nadnárodních společností, které se budou finančně spolupodílet na jeho vybudování. Není těžké najít důvody proč si od tohoto budoucího navigačního systému tolik slibovat – enormní podpora evropského hospodářství, vymanění se ze závislosti na GPS a v neposlední řadě množství pracovních příležitostí. Odhaduje se, že jich jen v EU bude kolem 140 000. Galileo by mělo být v provozu do roku 2010, o dva roky později než se původně předpokládalo. Je pojmenované po slavném italském astronomovi, který se jmenoval Galileo Galilei.

2.4.1 Hlavní výhody

- Větší přesnost než poskytují současné navigační systémy dostupnou pro všechny uživatele.
- Větší pokrytí signálem družic obíhajících na vyšších oběžných drahách. Z této výhody bude těžit například Skandinávie, jakožto nejsevernější evropská oblast.
- Záruka dostupnosti a kvality signálu, která je velmi důležitá pro komerční služby^[15].

2.4.2 Historie a budoucnost

V roce 1999 byly nejednotné koncepty jednotlivých zemí (Německo, Francie, Itálie a Velká Británie) pro Galileo porovnány a redukovány na jeden společný projekt. 7.prosince 1999 byl mezi Evropskou kosmickou agenturou ESA (European Space Agency) a Evropskou komisí EC (European Commission) podepsán kontrakt na studii Galileo. Pro další vývoj měla Evropská komise potíže zajistit potřebné financování další fáze projektu, protože kvůli celkově nepříznivé evropské ekonomické situaci se jednotlivé evropské státy lišily v tom, jakou část nákladů by měly konkrétní země pokrýt. Navíc po teroristickém útoku 11.zář 2001 vláda Spojených států vyvinula nebyvalý tlak na Evropu, aby od projektu družicové navigace ustoupila. Oficiálně to bylo zdůvodňováno tak, že komerční systém znamená konec americké možnosti redukovat přesnost signálu v dobách vojenských operací. Nicméně v dalších měsících se situace dramaticky změnila. Částečně jako reakce na nátlak vytvořený americkou vládou se členské státy EU shodly na důležitosti mít svůj vlastní nezávislý satelitní systém a dohodli

[15] Americký GPS žádné takové záruky neposkytuje, to je jeho velkou nevýhodou. Nejde o to, že by Pentagon se signálem nakládal kdovíjak svévolně nebo jej dle libosti vypínal a zapínal. Ale jde o to, že pro komerční nasazení jsou určité záruky nezbytné.

se na financování projektu. 26.května 2003 se Galileo stalo realitou – začala první fáze projektu, jejíž náklady byly odhadnuty na 1,1 mld. €^[16]. Dále je dohodnuto, že 30 plánovaných družic by mělo být vypuštěno v době od r.2006 do r.2010 a poté by systém měl přejít pod civilní kontrolu. Celkové náklady jsou pak odhadovány na 3,4 mld. € včetně infrastruktury na Zemi, která by měla být vybudována v letech 2006 a 2007. Evropská kosmická agentura se má podílet částkou 15 až 20 procent a podíl soukromého sektoru bude představovat 1,5 mld. €. Zbytek zajistí Evropská komise ze společného rozpočtu EU. Zájem o Galileo je již nyní opravdu nevídaný. V září 2003 se k projektu připojila Čína, která do něj investuje 230 milionů €. V červenci 2004 podepsal s EU dohodu také Izrael a stal se partnerem projektu. V červnu 2005 Ukrajina počala jednání o připojení se k projektu. V září 2005 podepsala Indie dohodu o spolupráci na projektu a o založení svého rozšiřující systému založeného na principech EGNOS. Dále se pak v listopadu 2005 připojilo Maroko a Saudská Arábie a v lednu 2006 také Jižní Korea. S dalšími státy, které se chtějí k projektu připojit nebo s kterými se vedou jednání jsou abecedně.Argentina, Austrálie, Brazílie, Kanada, Čile Japonsko, Malajsie, Mexiko, Norsko,Pákistán a Rusko.

2.4.3 Popis systému

2.4.3.1 Složení systému

Systém Galileo se bude skládat z následujících komponent:

- Globální – jádro systému, zahrnuje kosmický a pozemní segment.
- Regionálních – tato část obsahuje systémy zajišťující integritu služeb^[17] nezávislou na systému Galileo v mimoevropských zemích, aby byly aručeny kompletní služby systému např. i z hlediska legislativy. Tyto regionální systémy budou také budované a spravované mimoevropskými organizacemi i státy.
- Místních – tyto komponenty budou rozmíst'ovány lokálně tak, aby poskytl pokrytí signálem v takových místech, kde družicové signály nemohou být přijímány (v budovách či tunelech). Místní komponenty budou poskytovat sprostředkovatelé zpoplatněných služeb.

[16] Skutečné náklady první fáze zřejmě budou o 400 mil. € vyšší.

[17] ERIS - External Region Integrity Systems

2.4.3.2 Družice

- 30 satelitů
- Nadmořská výška 23200km
- 3 orbitální roviny, v každé 9 operačních satelitů a jeden záložní
- 56° inklinace
- Životní doba 12 let
- Váha 675kg
- Rozměry: 2.7m x 1.2m x 1.1m
- Rozteč solárních panelů: 18.7m
- Výkon solárních panelů: 1500W

2.4.3.3 Služby

Galileo bude poskytovat čtyři navigační služby a jednu službu pro záchranné operace, čímž pokryje požadavky všech vrstev uživatelů – profesionálních, vědeckých, vojenských, záchranných i masového trhu.

- The Open Service (OS) bude služba, které nebude zpoplatněna. Její signály budou využívat 2 pásma: 1164 – 1214 MHz a 1563 – 1591 MHz. Přijímače budou mít horizontální přesnost <4m a vertikální přesnost <8m při použití obou pásem, případně horizontální přesnost <15m a vertikální přesnost <35m při použití pouze jednoho pásma, srovnatelnou s jinými GNSS. Předpokládá se, že budoucí přijímače masového trhu budou přijímat jak signály OS Galileo, tak GPS C/A pro maximální pokrytí ve městech.

- The Commercial Service (CS) bude zpoplatněná šifrovaná služba s přesností lepší než 1m. V kombinaci s pozemními stanicemi bude dosahovat přesnosti až 10cm. Tato služba bude využívat 3 přenosová pásma. První 2 stejná jako služba OS, třetí ve frekvenčním pásmu 1260 až 1300 MHz. Navíc pro ni bude poskytována záruka. Služba bude také poskytovat omezenou přenosovou kapacitu (500 b/s) pro zprávy z center k uživatelům.

- The Safety of Life Service (SoL) bude služba, která bude primárně zlepšovat základní službu OS tím, že během deseti sekund varuje uživatele v případě, že z nějakého důvodu dojde k nedodržení garantovaných limitů systému (přesnost apod.). Využijí ji především složky

záchranných služeb nebo kritické dopravní aplikace (řízení letového provozu, automatické systémy přistávání letadel apod.).

- The Public Regulated Service (PRS) bude služba poskytovaná výhradně pro vládami autorizované uživatele (policie, armáda, tajné služby apod.), kteří požadují vysokou kontinuitu služby s kontrolovaným přístupem. Bude poskytována pomocí 2 zakódovaných signálů. Signály služeb PRS a SoL budou navrhované tak, aby byly maximálně odolné proti rušení.
- The Search and Rescue Service (SAR) bude služba nouzové lokalizace v rámci celosvětové družicové záchranné služby COSPAS-SARSAT. Galileo satelity budou schopny zachytit nouzové signály lodí, letadel či osob a vysílat je do národních záchranných center. Ty tak zjistí přesnou pozici nouzového vysílání. Družice pak zpětnou vazbou oznámí, že nouzové vysílání bylo zachyceno.

2.4.4 Budování kosmického segmentu

ESA již úspěšně vypustila první ze dvou testovacích družic GIOVE(Galileo In-Orbit Validation Element). GIOVE-A, vyrobený firmou Surrey Satellite Technologies byl na oběžnou dráhu vynesena 28.12.2005 ruskou nosnou lodí Soyuz. Zatímco operační družice budou emitovat deset navigačních signálů pro pětici služeb, zkušební družice vysílá jen dva. Vysoká kvalita signálu je zajištěna dvojicí redundantních rubidiových atomových hodin se stabilitou 10 nanosekund za den. GIOVE-A je také vybavena zařízením k určení míry radiace na dané oběžné dráze. Druhá experimentální družice GIOVE-B bude mít velmi odlišnou konstrukci, bude totiž vyrobená jinou firmou – Galileo Industries. Bude pokročilejší než GIOVE-A, neboť již bude vysílat všechny navigační signály. Jejich přesnost zajistí nejpřesnější hodiny kdy poslané do vesmíru – vodíkové atomové hodiny se stabilitou 1 nanosekunda za den. Zálohu budou tvořit dvojice rubidiové hodiny stejně jako nese GIOVE-A. GIOVEB by zřejmě měla být vynesena na oběžnou dráhu v srpnu tohoto roku. Po prověření technologií testovacích družic budou vypuštěny (plánováno na konec roku 2008) první 4 operační družice, které umožní pokusně určovat trojrozměrnou polohu. Jakmile i tyto prověří správnost koncepce, bude na oběžné dráhy dopraveno zbývajících 26 družic.

3. Obtížný příjem

V této části budou rozebrány různé vlivy projevující se při příjmu signálu, které snižují přesnost měření. Obecně se lokality, v nichž takové vlivy působí, označují jako místa s obtížným příjmem. Jelikož je systém GPS^[18] založen na satelitním příjmu, je základním předpokladem pro získání hodnověrných dat volný výhled na oblohu, aby mohl být zpracován signál co nejvíce satelitů. V takovém případě je poloha vypočítávána až od 10 družic a přesnost určení polohy odpovídá hodnotám z tab.č.1 a 2. Pokud se však výhled na oblohu. Přesnost měření se však nesnižuje pouze v důsledku snížení počtu viditelných satelitů (i když to většinou bývá prvotní jev), protože pro přesné určení pozice stačí při vhodném rozložení satelitů na nebeské báni zpracovat signál pouze od 4 satelitů, ale díky faktu, že zakrytí části oblohy doprovázejí ještě další jevy jako mnohacestné šíření signálu, vysoké hodnoty činitelů zhoršení přesnosti DOP (Dilution of Precision) způsobené nevhodným rozložením družic na obloze, útlum^[19] a výpadky signálu.

3.1 Omezená viditelnost družic

Systém je navržen tak, aby z každého místa na Zeměkouli bylo vidět minimálně 5 družic. V našich zeměpisných šířkách se při plném výhledu lze po většinu času zaměřit až 10 družic. Pokud však budeme chtít zjistit polohu v místech, kde není přímá viditelnost dostatečně velké části oblohy, může v závislosti na dalších okolnostech (momentální rozložení satelitů na obloze, hydrometeorologická situace, rušení v místě příjmu) dojít ke ztrátě signálu od většiny družic. Potenciální objekty, které mohou nejspíše zakrývat oblohu:

- obloha zakrytá koruny stromů
- budovy městské zástavby
- členitý terén (reliéf, terénní ráz, charakter krajiny)

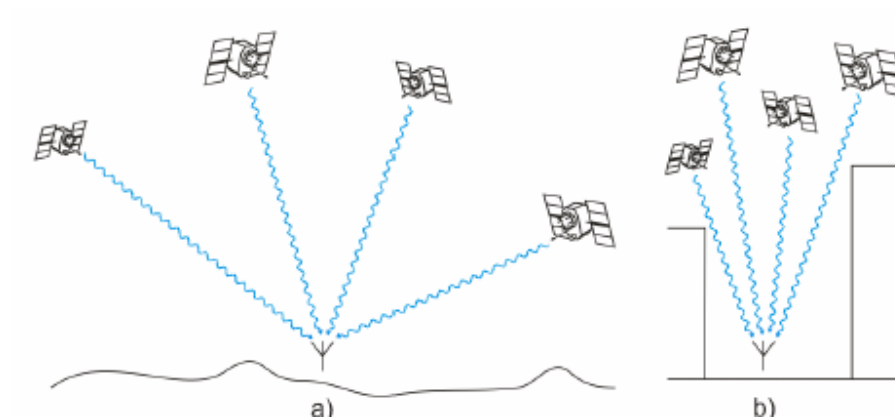
3.2 Vysoké hodnoty činitelů DOP

DOP je indikátor kvality geometrie rozložení družic na obloze. Vypočtená pozice tedy závisí na skutečnosti, které družice jsou použity pro měření. Čím větší jsou úhly mezi satelity, tím jsou hodnoty činitelů DOP menší a přesnost určení pozice roste. Stejně tak platí, že činitel DOP jsou nejmenší, když jsou družice rovnoměrně rozloženy na nebeské báni co nejdále

[18] V této části bude popisován převážně systém GPS, uvedené jevy však obecně platí pro všechny systémy družicové navigace zmenšuje, počet viditelných družic může značně klesat a chyba určení polohy pak většinou rychle roste.

[19] Je myšlen dodatečný útlum signálu oproti signálu měřenému za příznivých podmínek

od sebe (obr.16a). Naopak při omezeném výhledu na oblohu jsou si viditelné družice blíže, činitelé DOP rostou a degradují přesnost měření (obr.16b). [19] Je myšlen dodatečný útlum signálu oproti signálu měřenému za příznivých podmínek



Obr.16: a) Malá hodnota činitelů DOP, b) Velká hodnota činitelů DOP

Chybu určení pozice chceme obvykle stanovit v místní souřadné soustavě s počátkem reprezentující průměrné hodnoty měření. Osy N a E směřují na sever a na východ a leží v rovině tečné k Zemi, zatímco třetí osa, výška H je normálou k povrchu Země. Pak prostorovou efektivní chybu získáme jako:

$$3D \text{ RMS} = \sqrt{E[N^2 + E^2 + H^2]} = \sigma_d \sqrt{\sigma_N^2 + \sigma_E^2 + \sigma_H^2} = \sigma_d PDOP$$

Ve dvourozměrném případě získáme horizontální chybu:

$$2D \text{ RMS} = \sqrt{E[N^2 + E^2]} = \sigma_d \sqrt{\sigma_N^2 + \sigma_E^2} = \sigma_d HDOP$$

V jednorozměrném případě se jedná o efektivní chybu výšky:

$$1D \text{ RMS} = \sqrt{E[H^2]} = \sigma_d \sqrt{\sigma_H^2} = \sigma_d VDOP$$

kde σ_H , σ_E , σ_N jsou směrodatné odchylky souřadnic ve směrech N, E, H. PDOP (Positional Dilution of Precision) je prostorový činitel zhoršení přesnosti, HDOP (Horizontal Dilution of Precision) je horizontální činitel zhoršení přesnosti a VDOP (Vertical Dilution of Precision) je vertikální činitel zhoršení přesnosti. Znamená to tedy, že efektivní chyby RMS

jsou součinem směrodatné odchylky chyby měření zdánlivé vzdálenosti σ_d a činitelů zhoršení přesnosti DOP. Pro dosažení vysoké přesnosti je tedy nutné dosáhnout nejen malé hodnoty chyby měření vzdálenosti, ale využít také co nejvyššího počtu viditelných družic, které jsou od sebe co nejvíce vzdáleny, a tím zmenšit činitel zhoršení DOP.

Dále platí:

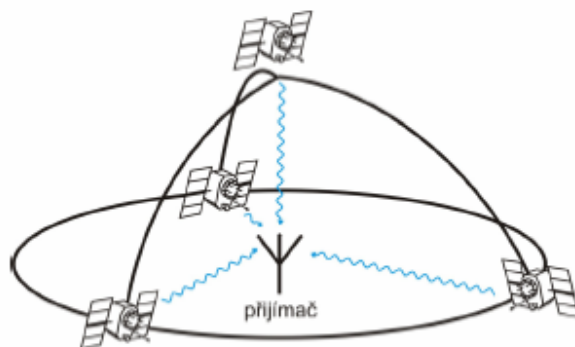
$$PDOP = \sqrt{HDOP^2 + VDOP^2}$$

Nejmenší hodnoty činitelů DOP pro 4 a 5 družic jsou uvedeny v následující tabulce (hodnoty převzaty z [1]):

Počet družic	4	5
PDOP	1,63	1,5
HDOP	1,15	1
VDOP	1,15	1,12

Tab.3: Nejmenší hodnoty činitelů DOP

Při určování pozice ze čtyř družic bude nejpřesnější, budou-li družice na nebeské báni od sebe co nejvíce vzdáleny, tedy jedna bude v nadhlavníku a tři rovnoměrně na horizontu (obr. 17).



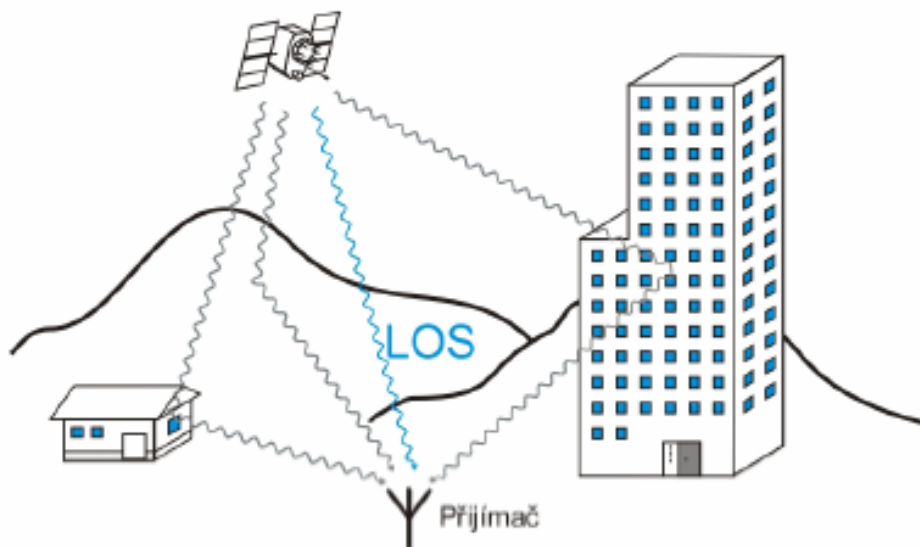
Obr.17: Rozložení 4 družic s nejmenšími činiteli DOP

Z předchozích vztahů vyplývá, že pokud budou hodnoty DOP malé (tab.č.3), bude přesnost určení pozice vysoká (viz tab.č. 1 a č. 2). Naopak v místech s obtížným příjmem budou činitele zhoršení přesnosti růst a chyba určení pozice se bude zvětšovat. Může dosáhnout i stovky metrů.

3.3 Mnohacestné šíření signálu

Koncepce pasivních dálkoměrných systémů je založena na měření vzdálenosti přijímače od družice pomocí doby, kterou se paprsek šíří volným prostředím. Aby tato vzdálenost byla

určena co nejpřesněji, je potřeba změřit dobu šíření signálu, který se od družice k přijímači šíří přímou cestou (LOS – Light Of Sight). Signál jakožto elektromagnetická vlna se však ve skutečných situacích šíří nejenom touto cestou, ale také se odráží od různých objektů stojících v cestě – pak musí urazit delší vzdálenost než když se šíří přímo (obr.18).



Obr.18: Princip mnohacestného šíření

Na anténu přijímače tak dopadají vedle přímého i zpožděné odražené signály a pokud přijímač změří odražený signál, pak používá pro výpočet polohy chybnou zdánlivou vzdálenost – v důsledku toho roste chyba měření. Mnohacestné šíření signálu je typické pro členitý terén nebo městskou zástavbu, kde je nutné uvažovat značný počet odražených signálů. V takovém případě se přímá vlna vektorově^[20] sčítá s vlnami odraženými, které jsou vůči ní fázově posunuty (zpožděny), a vzniká výsledná vlna s interferenčním charakterem. Pro přijímač je pak obtížné „vyselektovat“ správný signál, protože přijímaný signál je dán, jak ukazuje následující výraz, součtem příspěvků jednotlivých cest.

$$x(t) = \sum_n \alpha_n(t) s(t - \tau_n)$$

$s(t)$... vysílaný signál

α_n číselný útlumu n -tého kanálu

τ_n zpoždění n -tého signálu

20 Amplituda a fáze

Chyba způsobená mnohacestným šířením signálu bývá za normální situace do jednoho metru. Za velmi nepříznivých podmínek však může dosáhnout i několik desítek metrů. Takové podmínky mohou nastat hlavně v husté městské zástavbě s vysokými domy mezi kterými jsou malé rozestupy, když je od většiny družic budovami zastíněna přímá cesta a signál se k přijímači může dostat pouze pomocí mnohanásobných odrazů – ty jsou však již fázově výrazně zpožděny. Omezení vlivu mnohacestného šíření se většinou zajišťuje pomocí směrových antén. To v systému GPS ale není možné, neboť anténa přijímače musí mít poměrně širokou směrovou charakteristiku, aby za normálních podmínek mohla přijímat signál od všech družic na obloze. Vhodnou anténou lze tedy potlačit pouze signály přicházejících z malých nebo záporných elevačních úhlů.

Částečného potlačení odražených signálů lze dosáhnout použitím antény s pravotočivou kruhovou polarizací, protože tu má také signál GPS. Při každém odrazu se totiž mění směr polarizace z pravotočivé na levotočivou a opačně. Liché odrazy jsou tak potlačeny.

3.4 Odraz signálu

Pro signál GPS nemusí platit Snellův zákon odrazu, tedy že úhel odrazu a dopadu je stejný. Ten totiž ideálně platí pouze pro nekonečně rozlehlou dokonale hladkou rovinu. V praxi za takovýto povrch můžeme považovat jakýkoliv hladký rovný povrch ne úplně malých rozměrů - hladké kovové povrchy, plechy, vodní hladinu, odrazivé sklo,... Nejlépe se signál odráží od vodivých povrchů. Pokud bude v cestě signálu obecná překážka, pak o tom, zda-li se signál po dopadu odrazí nebo ne, rozhoduje zejména úhel dopadu, velikost nerovností povrchu překážky a její permitivita. Signál se nejlépe odráží při kolmém dopadu a od vodivých překážek, se zvětšujícím úhlem dopadu odraz klesá. Nerovnost povrchu se většinou posuzuje podle tzv. Rayleighova kritéria (viz [2]). Odraz nastane v případě, pokud je splněna podmínka

$$h < \frac{\lambda}{32 \sin \alpha}$$

Kde h je výška nerovností, λ je vlnová délka^[21] a α je úhel dopadu.

21 Pro L1 je λ přibližně 19 cm a pro L2 přibližně 24,5 cm.

3.5 Útlum signálu

Ve specifikaci služby SPS (Standard Positioning Service) [3] je uvedeno, že signál C/A L1 je družicemi GPS vysílán s dostatečným výkonem, aby na výstupu lineárně polarizované antény se ziskem 3 dB na zemském povrchu měl výkon alespoň $-160 \text{ dBW}^{[22]}$ za předpokladu ztrát v atmosféře 2 dB a minimální elevaci 5° . Signál je tedy velmi slabý – úroveň -160 dBW odpovídá výkonu 10-16 W. Dnešní přijímače tento signál přesto za normálních podmínek bez problémů detekují. Pokud je ale signál ještě tlumen, může se svým výkonem dostat pod úroveň citlivosti přijímače. Dále tlumen signál je, pokud mu v cestě může stojí nějaká překážka. Pak dochází buď k odrazu (viz odraz), průchodu nebo úplnému pohlcení signálu překážkou. O tom, zda signál překážkou projde nebo v ní bude utlumen záleží především na tloušťce a materiálu překážky. Např. sklo, plast nebo textil v menší vrstvě signál příliš netlumí, naproti tomu takové zdi budov jej utlumí víc než dostatečně. Signál je dále tlumen vegetací, neprostupné jsou pro něj např. koruny stromů. Na počasí je signál závislý jen málo, udává se, že hustý déšť způsobí útlum signálu $0,02 \text{ dB/km}$. Útlum nebo i výpadky signálu jednotlivých družic může být také způsobena rušením signálu z důvodu silného elektromagnetického pole v místě příjmu způsobeného elektrickými přístroji.

22 Jednotka výkonu udávaného v decibelové míře vztažené k 1 wattu.

4. Městská zástavba

4.1 Rozdělení městské zástavby

Městská zástavba je z hlediska příjmu signálu velmi komplikovaným prostředím, protože se v ní mohou vyskytnout všechny vlivy, které snižují přesnost měření. Pokud budeme GPS signál ve městech měřit, zjistíme, že toto prostředí nelze jednoduše popsat jednotným způsobem. Velmi totiž záleží na konkrétní městské lokalitě. Určitě totiž nastávají rozdílné podmínky při měření pozice v příměstské aglomeraci, kde největší objekty, které by mohly bránit příjmu signálu, jsou nejspíše rodinné domy, než v centru velkoměsta s výškovými budovami, které zastiňují výhled velké části oblohy. Je tedy zřejmé, že městskou zástavbu nelze brát jako celek, ale je nutno vysledovat určitý počet charakteristických typů prostředí, která poskytnout představu o chování signálu v tomto mnohotvárném prostředí. K tomu je potřeba stanovit, podle čeho různé typy městských prostředí porovnávat. Údaj o přesnosti určení polohy je sice rozhodující a pro navigaci v reálných aplikacích nejdůležitější, neposkytne nám však komplexnější pohled na danou lokalitu. Je to totiž „výsledný produkt“ více jevů uplatňujících se v daném místě. Proto je nutné pohlížet i na další faktory.

Podle čeho tedy porovnávat:

- Přesnost určení polohy
- Počet družic použitelných pro výpočet polohy
- Činitel zhoršení přesnosti DOP
- Mnohacestné šíření
- Odstup signálu od šumu

Přesnost určení polohy je údaj charakterizující přesnost systému v dané oblasti. Počet použitelných družic poskytuje představu o tom, zdali je volný výhled na oblohu či nikoliv. Činitel zhoršení přesnosti DOP vypovídá o aktuální rozložení družic na obloze. Pokud se v daném místě uplatňuje mnohacestné šíření, je měřena chybná vzdálenost ke družicím. Odstup signálu od šumu vypovídá o síle přijatého signálu. Pokud je odstup signálu od šumu příliš malý, pak daná družice nemůže být použita pro výpočet polohy. Pokud je signál utlumen ještě více, může dojít i k jeho výpadku (ztráta družice). V souvislosti s přijímači se spíše mluví o odstupu nosné signálu k úrovni výkonu šumu v pásmu 1 Hz (dBHz). Je to klíčový parametr k jejich porovnávání, neboť přímo ovlivňuje přesnost měření zdánlivé

vzdálenosti. Čím menší hodnota potřebná hodnoty odstup, tím lepší přijímač. Dnešní průměrné přijímače potřebují odstup nosné od šumu alespoň 15 dBHz.

V městské zástavbě jsou primárními objekty, které by mohly bránit volnému výhledu, budovy. O tom jak velkou část oblohy budova zakryje, rozhodují její rozměry a vzdálenost přijímače od budovy. Důležité jsou také rozestupy sousedních budov, příp. jiných překážek. Pokud budeme měřit v úzké ulici, nemusí být budovy příliš vysoké, a přesto bude vidět pouze malá část oblohy. Rozdělení městské zástavby:

- Místa s dobrým výhledem na oblohu (náměstí, parkoviště, travnaté plochy,...)
- Příměstské aglomerace
- Úzké ulice
- Vysoké budovy (panelová sídliště)
- Mosty, víceúrovňové křižovatky apod.
- Místa se zakrytým výhledem na oblohu (budovy, tunely, krytá parkoviště,...)
- Stromořadí

4.2 Volba přijímače do městské zástavby

V dnešní době existuje velké množství výrobců, kteří vyrábějí přijímače GPS pro nejrůznější aplikace. Od konkrétního potřeb použití se také odvíjí jejich požadované vlastnosti a samozřejmě i cena. Pokud budeme potřebovat GPS přijímač, který budeme chtít používat pro navigaci ve městech, bude nejdůležitější kritériem při výběru přijímače jeho citlivost. Citlivost je nejnižší úroveň výkonu signálu, kterou je přijímač ještě schopen zpracovat. Jinými slovy čím je přijímač citlivější, tím slabší signál detekuje. Na výslednou citlivost přijímače má vliv především anténa a chipset. Protože u běžných přijímačů jsou antény obdobné, je rozhodující použitá čipová sada. Následující tabulka č.4 ukazuje citlivosti neznámějších chipsetů, poslední sloupec vyjadřuje násobek citlivosti nejhojněji používaného chipsetu SiRFstar IIe/LP.

Chipset	Citlivost [dBW]	Násobek citlivosti SiRFstar IIe/LP [-]
EverMore BP 1202	-165	0,20
Garmin	-165	0,20
Sanav	-168	0,40
Furuno GH-80	-171	0,79
SiRFstar IIe/LP	-172	1,00
Xemics SlimGPST [™] RGPSM202	-173	1,26
Nemerix NJ-1030 v2	-177	3,16
Analog ADSST NAV2400	-178	3,98
u-Nav uN8031B/2100	-180	6,31
Sony CXD2951GA-2	-182	10,00
Maxim MAX2741	-185	19,95
uBlox TIM-LH SuperSense GPS	-188	39,81
SiRFXTrac	-188	39,81
SiRFstar III	-189	50,12

Tab.4: Citlivosti chipsetů

Pro svá měření jsem měl k dispozici jednofrekvenční bluetooth GPS přijímač Leadtek 9537 se zabudovanou keramickou patch anténou. Tento přijímač nese chipset SiRFstar IIe/LP, který má citlivost -172 dBW. Jak je vidět z tabulky č.4, jeho citlivost není v porovnání s některé dalšími chipsety příliš vysoká. Je to totiž již starší typ^[23], nicméně je velmi kvalitní, zřejmě stále nejpoužívanější ze všech. Jeho výhodou je také velmi nízká spotřeba v módu Trickle Power. Další důležité parametry přijímače jsou v tabulce č.5.

Když uvážíme minimální garantovaný výkon signálu -160 dBW^[24] při zemské povrchu, pak „rezerva“ pro jevy uplatňující se v městské zástavbě je pouze -12 dB. Lze tedy očekávat časté výpadky signálu jednotlivých družic v místech se zvýšeným útlumem signálu – úzkých ulicích, mezi vysokými budovami či v hustě zalesněných prostorech.

Frekvence	L1 1575,42 MHz
Dálkoměrný kód	C/A 1,023 MHz
Počet kanálů	12
Přesnost polohy	10 m 2D RMS
Přesnost rychlosti	0,1 m/s
Přesnost k času GPS	1 μs
Elevační maska	5°
Primární protokol	NMEA-0183
Defaultní zprávy NMEA	GGA, GSA, GSV, RMC, VTG
Sekundární protokol	SiRF binary

Tab.5: Vlastnosti přijímače Leadtek 9537

[23] Jeho nástupci jsou SiRFXTrac a SiRFstar III – v současné době nejlepší chipset.

[24] Naopak maximální výkon při zemském povrchu nepřekročí -153 dBW, pak je „rezerva“ až 19 dB

4.3 Metodika testovacích měření

Součástí dokumentu [3] jsou normy minimální výkonnosti civilní služby SPS. Ty jsou koncipovány tak, aby co nejlépe zachycovaly dynamický charakter globálního systému a neustálou proměnlivost jeho parametrů. Výkonnost služby SPS popisují 4 statistické^[25] parametry, přičemž platnost jednoho parametru je podmíněná platností všech předchozích.

1. Pokrytí
2. Dostupnost služby
3. Spolehlivost služby
4. Přesnost

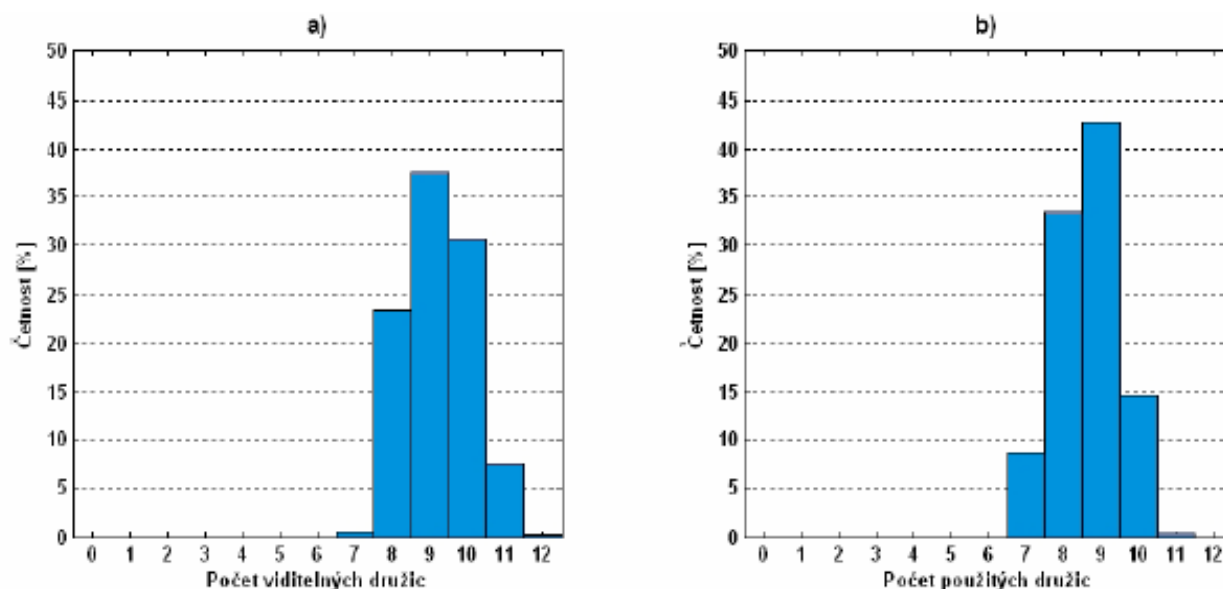
Normy minimální výkonnosti sice dobře popisují vlastnosti služby SPS, nicméně nevypovídají nic o místech s obtížným příjmem, protože předpokládají volný výhled na oblohu. V městské zástavbě ale často není splněn hned první parametr normy minimální výkonnosti – pokrytí. Pokrytí udává procento časového intervalu, po které lze v jakémkoli místě na Zemi (nebo v jejím okolí do 200 km) vidět alespoň 4 družice s činitelem PDOP ≤ 6 . To často není splněno např. v úzkých ulicích. Pro popis městského prostředí tedy bylo nutné provést sadu měření v příznačných místech. Měřil jsem víceméně v oblastech uvedených v kapitole 4.1. Vzhledem k technickým možnostem, které jsem měl – GPS přijímač připojený přes bluetooth k notebooku s výdrží baterie kolem 90 až 120 minut, jsem prováděl jedno až dvou hodinová měření. Na každém místě jsem provedl většinou 3 až 4 měření s tím, že jsem měřil vždy v jinou denní dobu tak, aby se neopakovalo rozložení družic na obloze, protože družice obíhají každý den dvakrát po stejných drahách. Samozřejmě pokud bychom požadovali větší věrohodnost neměřených dat, museli bychom na každém místě měřit alespoň jednu periodu opakování konstelace družic (11 hodin 58 minut), aby měření nebylo závislé na aktuálním rozložení družic na obloze. Nejprve jsem měřil na místech s dobrým výhledem na oblohu jako příměstské aglomerace, náměstí či travnaté plochy, abych pak výsledky s těchto přesných měření mohl porovnávat s ostatními obtížnějšími městskými lokalitami. Při zpracování měření jsem používal zprávy GGA, GSA, GSV protokolu NMEA- 0183, neboť poskytují dostatečné informace potřebné pro vyhodnocení měření. Konkrétně zpráva GGA obsahuje potřebné údaje o čase, zeměpisných souřadnicích a nadmořské výšce. Zpráva GSA obsahuje údaje o módu určení polohy, počtu družic použitých pro výpočet polohy, jejich ID a činitele zhoršení přesnosti PDOP, HDOP, VDOP. Poslední zpráva GSV nese informaci o jednotlivých družicích: elevaci, azimut a odstup signálu od šumu.

25 Každý z nich vyjadřuje procento časového intervalu, po který je daný parametr výkonnosti splněn

4.4 Analýza městské zástavby

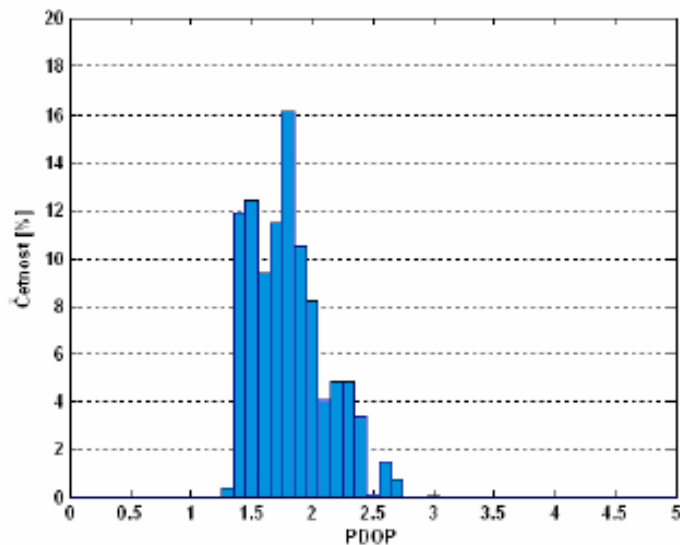
4.4.1 Místa s dobrým výhledem na oblohu

Místa s dobrým výhledem míníme v městské zástavbě především velká otevřená prostranství jako parkoviště, travnaté parky, dlouhé mosty přes řeku nebo velká náměstí. Volný nebo jen z malé části zakrytý výhled na oblohu umožňuje po většinu času sledovat signály 8 až 11 družic, z toho lze většinu, 7 až 10, použít pro výpočet polohy (obr. 19). Průměrný odstup signálu od šumu všech použitých družic spočítaný pomocí programu Matlab vychází 40,7 dBHz. To je velmi vysoká hodnota, která zajišťuje stabilní příjem bez jakýchkoliv výpadků signálu. Typický signál pouze jedné družice nelze použít. Bývá to většinou způsobeno menším elevačním úhlem některé družice než je nastavená elevační maska přijímače (5°).



Obr.19: Histogram a) viditelných družic b) použitých družic

Příjem signálu mnoha družic umožňuje dosáhnout malých hodnot činitelů DOP, prostorový činitel zhoršení polohy PDOP zobrazuje obr.20. 100% případů určení polohy má činitel PDOP menší než 3. Dokonce 73% je menší 2. Mnohacestné šíření signálu se prakticky vůbec neuplatňuje.



Obr.20: Histogram PDOP

Přesnost určení polohy v těchto místech dosahuje přesnosti udávané pro systém GPS (viz např. tab. 1 a 2).

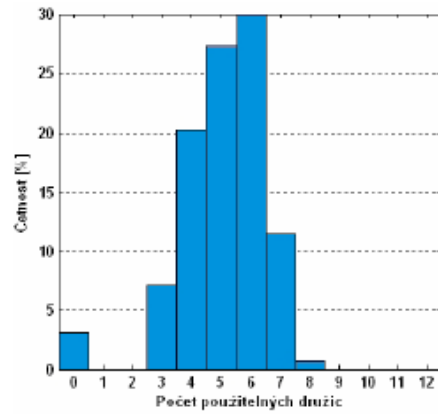
4.4.2 Příměstské aglomerace

Situace v příměstských oblastech je z hlediska navigace poměrně bezproblémová. Zástavbu v takových oblastech tvoří většinou jedno či dvoupatrové rodinné domy, příp. stromy. Rozestupy mezi domy bývají dostatečně velké, aby bylo možno přijmout signály většiny družic na obloze a určit polohu s vysokou přesností. Neuplatňuje se výrazněji vícecestné šíření signálu ani útlum. Výsledky jsou srovnatelné s předchozí kapitolou.

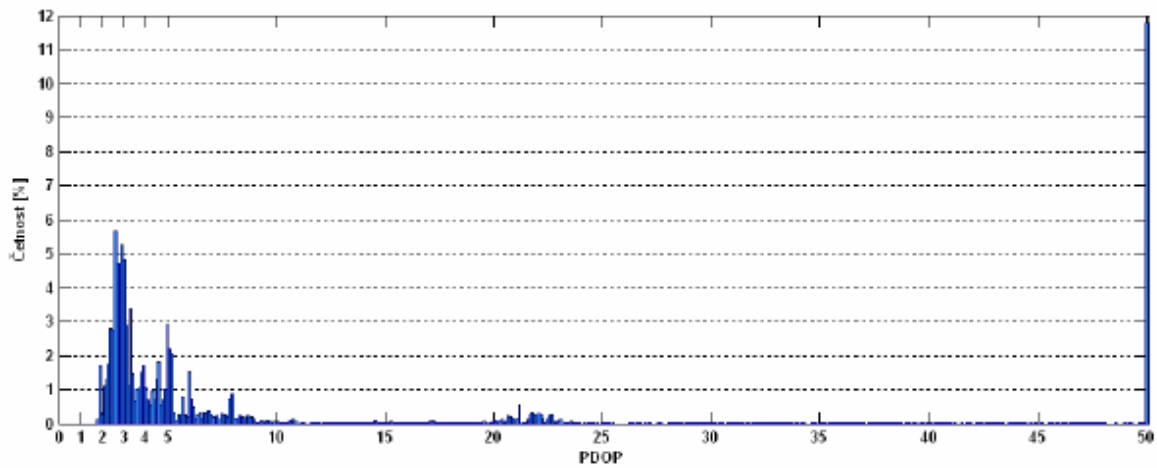
4.4.3 Úzké ulice

Z úzkých ulic je vidět pouze úzký pruh oblohy, a proto je počet družic použitelných pro navigaci družic o dost menší než počet družic, které jsou v tu chvíli na obloze, neboť nelze přijmout signály družic s malými elevačními úhly, ty se do úzké ulice nedostanou. Ve většině případů (89%) sice lze použít signál alespoň 4 družic (obr.21), takže může být určena trojrozměrná poloha, přesnost určení polohy však nebývá vysoké, protože družice jsou na obloze blízko sebe a způsobují poměrně vysoké hodnoty PDOP (obr.22.). Pouze 32% hodnot PDOP dosahuje hodnoty nižší než 3, kde je vysoká přesnost určení polohy. 48% hodnot je v rozmezí mezi 3 a 10, kde je již vyšší, většinou však ještě akceptovatelná chyba. Téměř ve 12% měření dosahuje činitel PDOP hodnoty 50, kdy dochází ke ztrátě třírozměrného určení

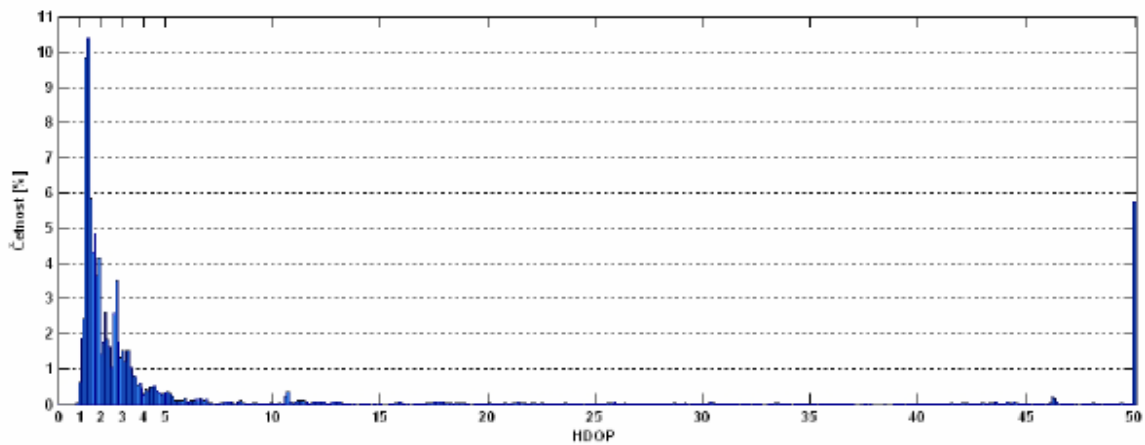
polohy nebo jsou družice natolik blízko, že činitel PDOP dosáhne hodnoty 50. Zbýlých 8% měření nabývá hodnot z intervalu 10 až 50. Zhruba ve 20% tedy dochází k hrubým nepřesnostem měření, kde chyba pozice dosahuje až stovky metrů (viz kapitola 3.2.), případně dochází i ke ztrátě pozice.



Obr.21: Histogram použitelných družic v úzkých ulicích

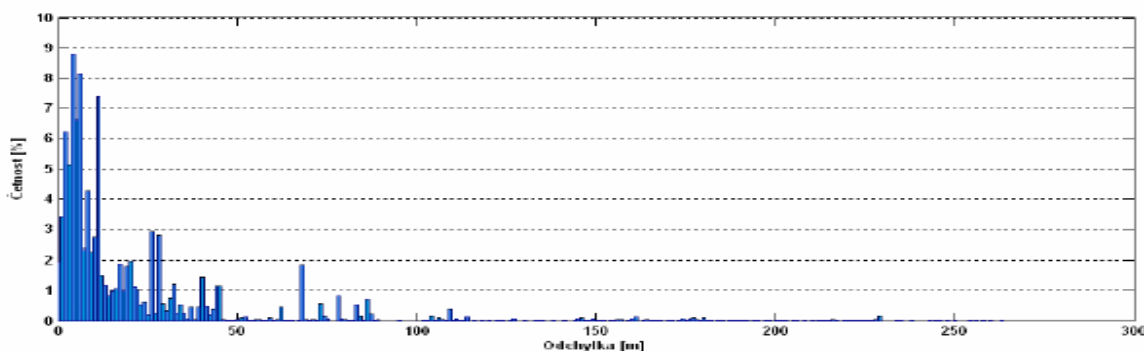


Obr.22: Histogram PDOP v úzkých ulicích



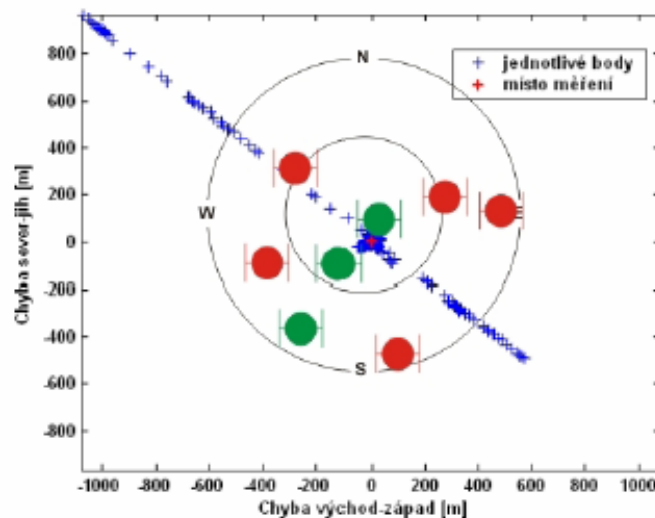
Obr.23: Histogram HDOP v úzkých ulicích

Pokud jsou k dispozici signály jen 3 družic, lze ještě určit polohu v horizontálním směru s tím, že výšku považujeme za konstantní. To má smysl právě ve městech při navigaci vozidel či chodců pomocí mapy, kdy údaj o výšce není příliš důležitý. Z obr.23 lze vidět, že četnost činitele horizontálního zhoršení polohy HDOP pro hodnotu 50 je 6%, to je o polovinu méně než četnost PDOP pro hodnotu 50, kde to je 12%. Tento rozdíl odpovídá právě módu navigace 2D, kdy pro navigaci používáme právě 3 družice. Při příjmu 2 nebo méně družic dochází ke ztrátě určení polohy (zbylých 6%). Na obr. 21 to znázorňuje sloupec pro 0 družic, protože pokud přijímáme signál pouze 2 nebo 1 družice, použitelných pro výpočet polohy je jich stále 0, protože jí vypočítat nemůžeme. Tyto hodnoty byly získány pomocí měření v několika různých úzkých ulicích v Českých Budějovicích a jedné ulici v Praze. Záměrně jsem volil odlišně vypadající ulice, abych postihl problematiku úzkých ulic obecně. Při skutečné navigaci by podmínky neměly být horší než v nejhorší ulici, kterou jsem měřil. Ta měla šířku zhruba 3 metry a výšku minimálně 12 metrů. Nejmenší měřený činitel PDOP zde dosahoval poměrně vysoké hodnoty 2,7. PDOP menší než 3 dosahovalo pouhých 7% hodnot. Za to většina hodnot (61%) ležela v intervalu mezi 3 až 10. Interval mezi 10 a 50 obsahoval 32% hodnot. Z toho více než polovina byla právě 50. Chyba určení polohy je v úzkých ulicích způsobena především vysokými činiteli DOP, mnohacestným šířením signálu (nepřesné měření zdánlivých vzdáleností) a častými výpadky signálu některých družic, protože signály od družic, která nejsou v přímě viditelnosti, jsou v důsledku mnohonásobných odrazů slabé. Průměrný odstup signálu od šumu je totiž pouze 28 dBHz. Obr.24 ukazuje histogram rozložení odchylek v horizontálním směru. Byl stanoven pomocí odchylek od středních hodnot měřených míst. Je vidět, že chyba může dosahovat i stovky metrů. A je nutno podotknout, že je to pouze chyba v horizontálním směru! Třírozměrná chyba může být více než o polovinu větší, neboť chyby výšky bývají dokonce ještě vyšší než horizontální chyby.



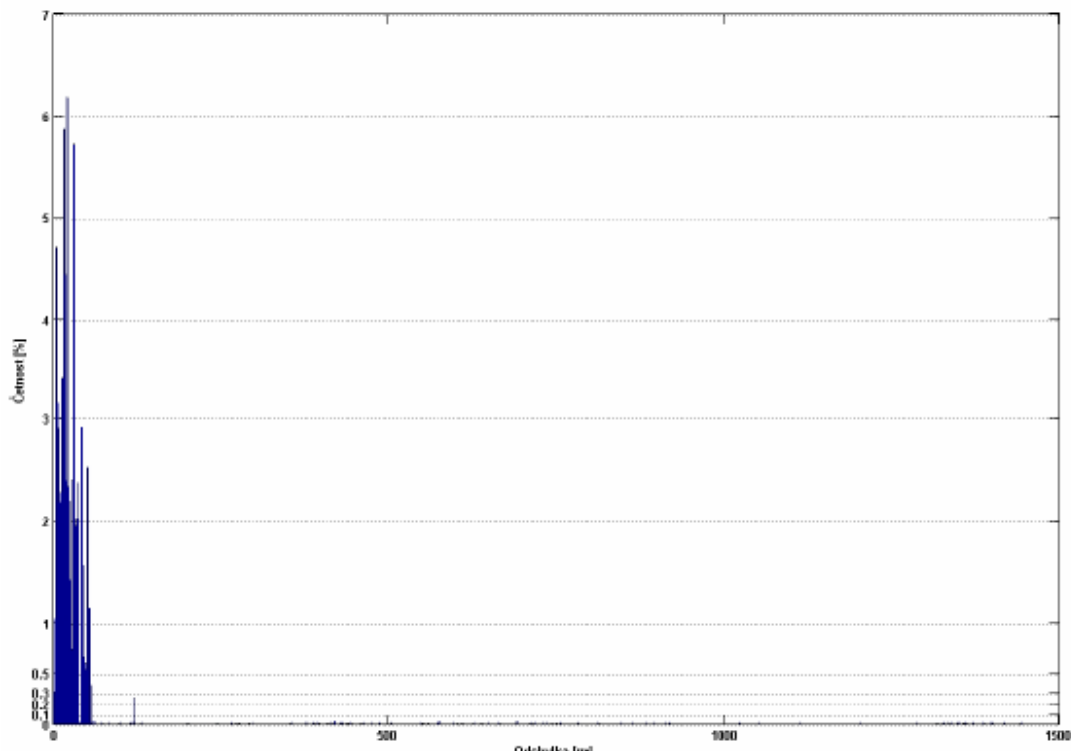
Obr.24: Histogram odchylek

Jelikož je většina chyb určení polohy v horizontální rovině menší než 50 metrů, má výsledná chyba 95% hodnotu 78 m. To je ale poměrně hodně, pokud tuto hodnotu porovnáme s hodnotou 29 m udávanou pro systém GPS při volném výhledu. Nutno také podotknout, že histogram nezobrazuje všechny hodnoty. Při jednom měření totiž vznikla chyba, která dosahovala extrémních hodnot, v jednu chvíli až 1500 m (obr.26). Vznikla nevhodným postavením 3 družic v řadě (obr.25 zelené družice), které navíc byly poměrně blízko sebe. Chyba vznikla ve směru kolmém na přímkou protínající tyto družice, protože při postavení družic v řadě je v tomto směru velmi malá přesnost systému. Tato chyba však prakticky nezatěžuje celkový výsledek daného měření, neboť netrvala dlouho a má tak malou četnost. V úzkých ulicích podobné chyby, kdy poloha jakoby po přímce odjede z měřeného bodu, vznikají poměrně často, vždy když je signál přijímán pouze od 3 nebo 4 družic a ty vyrovnávají do řady. Je to poměrně nepříjemná záležitost, protože chyba dosahuje až několik set metrů. Většinou ale netrvaly příliš dlouho, stačí přijmout signál z jedné další družice, která nestojí v řadě s ostatními.



Obr.25: Chyba dosahující hodnoty až 1500 m

Z důvodu omezené viditelnosti družic v úzkých ulicích je určování polohy velmi závislé aktuálním rozložením družic na obloze. Ve stejné ulici tak mohou nastat velmi rozdílné výsledky měření. Při dobrém příjmu může být poloha určena poměrně přesně. Naopak pokud bude konstelace nevhodně rozložena, může chyba i několik stovek metrů.

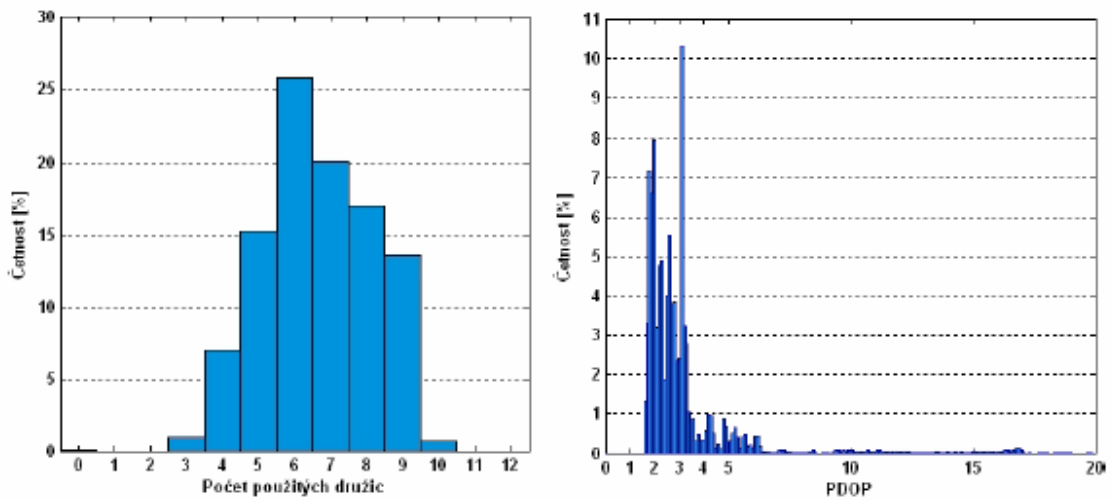


Obr.26: Histogram měření s velkou chybou

Z měření v úzkých ulicích plyne, že přesnost určení polohy je poměrně nejednoznačná záležitost. Vždy velmi záleží na konkrétní situaci, na výšce a šířce ulice a na počtu družic a jejich okamžitém uspořádání. Průměrná chyba 78 metrů je však již poměrně hodně vysoká hodnota, která může způsobovat nepříjemné problémy např. při navigaci automobilů. Navigační systémy většinou totiž „přilepují“ vypočtenou polohu na nejbližší komunikaci na mapě, pak může dojít k umístění automobilu na mapě na špatnou silnici.

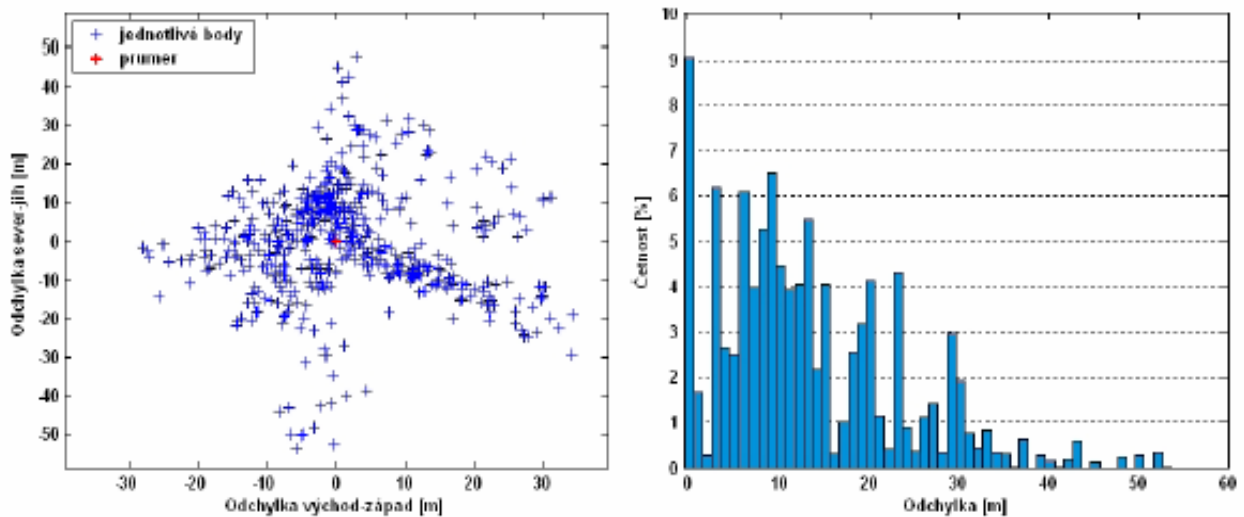
4.4.4 Vysoké budovy (panelová sídliště)

Vysoké budovy se u nás vyskytují převážně na panelových sídlištích, kde jich bývá vysoká koncentrace. Jsou to převážně čtyř, osmi nebo dvanáctipatrové budovy. Dá se tedy očekávat, že na sídlištích bude komplikovaný příjem signálu. O to překvapivější se mohou zdát výsledky měření, které jsem na sídlišti prováděl. Na obr. 27 vlevo je zobrazeno rozložení družic. Prakticky stále byly pro výpočet polohy používány alespoň 4 družice. Na pravé straně je zobrazena četnost činitele PDOP. 95% hodnot má činitel menší než 10 a dokonce 61% menší než 3. Zbýlých pouze 5% má PDOP větší než 10.



Obr.27: Histogram použitých družic a PDOP

Na obr.28 jsou znázorněny odchylky od průměrných hodnot všech měření. Zdá se to až příliš málo, ale maximální chyba byla pouze 53 m a chyba a chyba 95% dokonce jen 31m. Je to zřejmě způsobeno poměrně velkými rozestupy mezi domy na sídlištích a také tím, že signál se od panelových domů dobře odráží. Tomu by nasvědčoval i fakt, že chyby jsou z velké části způsobeny mnohacestným šířením, protože činitelé PDOP dosahují malých hodnot.



Obr.28: Horizontální chyba a její četnost

4.4.5 Mosty, víceúrovňové křižovatky apod.

Při podjíždění mostů se dopravní prostředek na chvíli dostává do situace, kdy má zakrytý výhled na oblohu. Signál se do těchto míst šíří pomocí odrazů (nejčastěji od družic s menšími elevačními úhly). Může se dostat pouze do malé vzdálenosti, než jeho výkon klesne pod práh citlivosti přijímače. Záleží tedy na šířce podjížděného mostu, který dopravní prostředek podjíždí. Měření je z důvodu odrazů zatíženo chybou měření zdánlivé vzdálenosti. Některé přijímače GPS mohou určitou dobu po ztrátě pozice pracovat v degradovaném módu hrubého určení polohy DR (Dead Reckoning), kdy dopočítávají polohu z určitého počtu posledních známých pozic. Od ztráty pozice však nesmí být změněn směr pohybu.

4.4.6 Místa se zakrytým výhledem na oblohu

Vzhledem k malému výkonu signálu je navigace v místech se zakrytým výhledem na oblohu pomocí běžných přijímačů v dnešní době nemožná. Zdi budov signál dostatečně utlumí. V případě navigace automobilů v tunelech či krytých parkovištích řešením může být odvozování odhadu polohy z poslední známé pozice pomocí externích senzorů. Senzorů existuje celá řada – mohou sledovat směr, rychlost nebo vzdálenost. Méně častěji i výšku, ta však není pro navigaci automobilů zas tak důležitá. Sensorové odhady poloh mají jeden nedostatek – nepřesnosti senzorů se kumulují v čase a tím roste celková chyba (obr. 29). Lze je tedy použít pouze po určitou dobu. Jak velkou, to záleží na přesnosti senzorů.



Obr.29: Navigace pomocí čidel

4.4.7 Stromořadí

Zvláštním prostředím je stromořadí, zvláště pak z listnatých stromů. Listí ze stromů (zvláště mokré) tlumí elektromagnetické vlny dosti značným způsobem. Stromořadí může mít vliv především při navigaci automobilů, protože mnoho silnic je lemováno alejemi stromů.

Signály přicházející od družic, které nejsou v přímé viditelnosti LOS prochází korunami stromů, které jsou pro signál dosti neprostupné, a ztrácí tak značnou část svého výkonu nebo jsou utlumeny zcela. Záleží samozřejmě na hustotě zalesnění podél komunikace a na vzrůstu a mohutnosti stromů. Pokud je hustota stromů malá (řekněme jeden strom nejméně po 50 metrech, nezpůsobí nejspíš takové stromořadí žádný útlum signálu ani snížení přesnosti. Pokud by se však jednalo o souvislou alej vzrostlých stromů (koruny sousedních stromů se dotýkají), mohla by se chovat pro signál jako neprostupná zeď, ve které se zcela utlumí. Pak lze zpracovat signál pouze s malým počtem družic v přímé viditelnosti. Takové stromořadí se pak do jisté míry podobá úzkým ulicím, narůstá činitel zhoršení přesnosti DOP.

5. Závěr

Družicové navigační systémy patří k nejmladším, ale zároveň také k nejperspektivnějším odvětvím radiotechniky. Od původních pouze vojenských záměrů jejich používání se postupně dostávají do stále více oblastí lidské činnosti. A tento trend by se v příštích letech neměl měnit, ba naopak. Uvádí se, že jen v oblasti mobilních telefonů bude v roce 2020 na světě zhruba 2,5 mld. kusů přístrojů se zabudovanou aplikací družicové navigace! Celkový obrat hardwaru spojeného s družicovou navigací by ve stejném roce měl být 25 mld. eur - obrat služeb bude nejméně dvojnásobně až trojnásobně vyšší. Velké očekávání je spojováno zejména s příchodem ryze komerčního Galilea a jeho zapojením do trhu družicové navigace. Ovšem ani dosavadní systémy GPS a GLONASS nechtějí zůstat pozadu a již nyní probíhají modernizace těchto systémů. V budoucnu budou tyto systémy zajišťovat mnoho nových služeb. Jmenujme například lokalizační služby (vyhledávání osob nebo různých míst), zabezpečení důvěrných dat aktuální fyzickou polohou příjemce a odesílatele, automatizované vybírání mýtného na dálnicích, kontrola dodržování povolené rychlosti na dálnicích i dalších komunikacích, navigace ve velkých budovách a nákupních centrech, řízení silničního provozu nebo navigace nevidomých.

V dnešní době jsou ale jejich možnosti použití přeci jen stále ještě limitované především přesností určení polohy. Jak je vidět z výsledků této práce, v místech se špatným výhledem na oblohu jako jsou úzké ulice není určení polohy příliš přesné. Dochází k poměrně velkým chybám, které jsou pro mnohé aplikace nepřijatelné. Představme si například nevidomého člověka, který je v cizím prostředí zcela závislý na navigačním systému. Pak je jasné, že chyba i pouhých 5 metrů v určení polohy může mít nedozírné následky. Problém příjmu signálu v místech s omezeným výhledem by v budoucnu měl být řešen integrovanými přijímači GPS/GLONASS/Galileo. To umožní příjem signálu od dostatečného počtu družic i ve velmi úzkých ulicích. Druhou velkou nevýhodou současných navigačních systémů je nedostupnost signálu v budovách a uzavřených prostorech obecně. V dnešní době sice již existují techniky příjmu GPS signálu v budovách, je k tomu ale zapotřebí velmi citlivých přijímačů a algoritmů pro příjem velmi slabých signálů. Zřejmě bude potřeba hledat i další řešení pro příjem signálu v budovách. Cíl družicové navigace je tedy zřejmý – zajistit velmi přesné a spolehlivé určení polohy nezávislé na místě měření. Jednou ze zajímavých otázek však je, jestli se o to budou jednotlivé systémy snažit samostatně a soupeřit spolu nebo se budou navzájem doplňovat.

Seznam použitých symbolů

α	Úhel dopadu
α_n	Činitel útlumu n-tého kanálu
$\Delta f_1, \Delta f_2$	Nejmenší rozestupy nosných frekvencí systému GLONASS
$\Delta\varphi$	Akumulovaná chyba směru
Δt	Rozdíl mezi τ_i a ξ_i
σ_d	Směrodatná odchylka chyby měření zdánlivé vzdálenosti
$\sigma_N, \sigma_E, \sigma_H$	Směrodatné odchylky souřadnic ve směrech N, E, H
λ	Vlnová délka
ξ_i	Doba potřebná k překlenutí zdánlivé vzdálenosti k i-té družici
τ_{bit}	Doba trvání jednoho bitu dálkoměrného kódu
τ_i	Doba potřebná k překlenutí skutečné vzdálenosti k i-té družici
τ_n	Zpoždění n-tého kanálu
c	Rychlost šíření signálu v daném prostředí
d	Akumulovaná chyba vzdálenosti
d_i	Skutečná vzdálenost přijímače od i-té družice
D_i	Zdánlivá vzdálenost přijímače od i-té družice
f_{01}, f_{02}	Nominální frekvence systému GLONASS
h	Výška nerovností povrchu překážky
i	Pořadí družice
L_1, L_2	Nosné frekvence
p	Potřebný posun
P	Perioda dálkoměrného kódu
R	Autokorelační funkce
$s(t)$	Vysílaná signál
t	Čas
x, y, z	Souřadnice přijímače
x_i, y_i, z_i	Souřadnice i-té družice
$x(t)$	Přijímaný signál daný příspěvky jednotlivých cest

Seznam použitých zkratk

A-S	- Anti-Spoofing Způsob ochrany vojenského P kódu před případným zneužitím nebo podvržením nepřítelem šifrováním na Y kód
BPSK	- Bipolar Phase Shift Keying Bipolární fázové klíčování
C	- Civil Budoucí civilní kód systému GPS, který bude vysílán na frekvenci
L2	
C/A	- Coarse Acquisition Dálkoměrný kód systému GPS, který je vysílán na frekvenci L1
CDM	- Code Division Multiplex Kódové dělení
CS	- Commercial Service Budoucí zpoplatněná služba systému Galileo
dBW	- deciBell Watt Jednotka výkon v decibelové míře vztažená k hodnotě 1 Watt
DGPS	- Diferential GPS Diferenční GPS
DOD	- U.S. Department of Defence Americké ministerstvo obrany
DOP	- Dilution of Precision Činitel zhoršení přesnosti
DOT	- U.S. Department of Transportation Americké ministerstvo dopravy
DR	- Dead Reckoning Degradovaný mód určování polohy
EC	- European Commission Evropská komise
EGNOS	- The European Geostationary Navigation Overlay Service Evropský geostacionární navigační systém rozšiřující systémy GPS a GLONASS

ERIS	- External Region Integrity Systems Mimoevropské systémy, které budou nezávisle zajišťovat integritu systému Galileo
ESA	- European Space Agency Evropská vesmírná agentura
FAA	- Federál Aviation Administration Letecký úřad USA
FDM	- Frequency Division Multiplex Frekvenční dělení
FOC	- Full Operational Capability Plný operační stav systému GPS
GEO	- Geostationary Earth Orbit Geostacionární oběžná dráha
GIOVE	- Galileo In-Orbit Validation Element Testovací družice systému Galileo
GLONASS	- Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistema Ruský globální navigační satelitní systém
GNSS	- Global Navigation Satellite Systems Globální navigační satelitní systémy
GPS	- The Global Positioning System Globální polohovací systém
HDOP	- Horizontal Dilution of Precision Horizontální činitel zhoršení přesnosti
HOW	- Handover Word 2.slovo každého podřamce v navigační zprávě GPS
HP	- High Precision Vojenská přesná služba systému GLONASS
ICAO	- International Civil Aviation Organization Mezinárodní organizace pro civilní letectví
IOC	- Initial Operational Capability Počáteční operační stav systému GPS
LEO	- Low Earth Orbit Nízká oběžná dráha

LOS	- Light of Sight Přímá viditelnost
M	- Military Budoucí vojenský kód systému GPS, který bude vysílán na frekvenci L1 a L2
MCS	- Master Control Station Řídící centrum systému GPS
MEO	- Medium Earth Orbit Středně vysoká oběžná dráha
MSAS	- Multi-Functional Satellite Augmentation System Japonský rozšiřující systém podobný systému WAAS
NAVSTAR	- Navigation System Using Time And Range Navigační systém používající čas a vzdálenost
OS	- Open Service Budoucí služba systému Galileo, která bude volně přístupná
P	- Precision Přesný dálkoměrný kód systému GPS určený pro vojenské účely
PDOP	- Positional Dilution of Precision Prostorový činitel zhoršení přesnosti
PPS	- Precise Positioning Service Přesná služba systému GPS zahrnující kód P
PRS	- Public Regulated Service Budoucí služba systému Galileo určená výhradně pro vládami autorizované uživatele
PRN	- Pseudo Random Noise Pseudonáhodný šum - jiné označení pro dálkoměrný kód
RDSS	- Radio Determination Satellite Systems Družicové rádiové systémy určování polohy
RMS	- Root Mean Square Střední kvadratická chyba (efektivní chyba) obsahují 68% hodnot
SA	- Selective Availability Výběrový přístup, záměrná degradace přesnosti určení polohy systémem GPS, v roce 2000 byl SA zrušen

SAR	- Search and Rescue Service Budoucí služba nouzové lokalizace v rámci celosvětové družicové záchranné služby COSPAS-SARSAT poskytovaná systémem Galileo
SBAS	- Space Based Augmentation Systems Geostacionární družicové systémy zvyšující přesnost globálních družicových navigačních systémů
SF	- Spreading Factor Rozprostírací faktor
SoL	- Safety of Life Service Služba OS systému Galileo vylepšená o integritu zpráv
SP	- Standart Precision Civilní služba poskytovaná systémem GLONASS
SPS	- Standard Positioning Service Civilní služba systému GPS využívající kód C/A
SV	- Space Vehicle Družice
TLM	- Telemetry Word 1.slovo každého pod rámce navigační zprávy systému GPS
USA	- United States of America Spojené státy americké
UTC	- Universal Time Coordinated Světový čas
VDOP	- Vertical Dilution of Precision Vertikální činitel zhoršení přesnosti
WAAS	- Wide Area Augmentation System Americký geostacionární navigační systém rozšiřující systémy

Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] Hrdina, Z., Pánek, P., Vejražka, F.: Rádiové určování polohy (družicový systém GPS). Vydavatelství ČVUT, Praha 1995.
- [2] Mazánek, M., Pechač, P.: Šíření elektromagnetických vln a antény. Vydavatelství ČVUT, Praha 2005.
- [3] Global Positioning System SPS Signal Specification. Druhé vydání, 1995.
- [4] GLONASS Interface Control Document. Moskva 1998.
- [5] Hrdina, Z., Vejražka, F.: Signály a soustavy. Vydavatelství ČVUT, Praha 2000.
- [6] Willsher, B.: TIM GPS Receivers Protocol Specification – Application Note. ublox, 2001.
- [7] ANTARIS Positioning Engine – NMEA and UBX Protocol Specififacion. u-blox, 2003.
- [8] u-center ANTARIS™ Edition GPS Evakuation Software – User’s Guide, u-blox, 2002.
- [9] LEADTEK Bluetooth GPS Receiver 9537 – User’s Manual, Leadtek, 2003.
- [10] Satelitní navigace, CHIP (Listopad 2005), str.28-30.
- [11] <http://en.wikipedia.org/> - Internetová encyklopedie
- [12] <http://www.esa.int/esaNA> - Evropská vesmírná agentura
- [13] <http://www.glonass-center.ru/purposes.html> - Družicový systém GLONASS
- [14] <http://www.gpsweb.cz> - Internetový portál zabývající se tématikou GPS
- [15] [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2005_02_gps.php /](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2005_02_gps.php/) - Server katedry fyziky
- [16] <http://www.mapy.cz> – Zdroj map s možností kalibrace pro GPS
- [17] <http://www.galileo-navigationssystem.com/indexe.htm> - Družicový systém Galileo