

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Analýza vlivů působících na signály GPS a jejich
dopady na výslednou chybu vypočtené polohy**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Jakub JEDLIČKA
Osobní číslo: E09N0210P
Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika
Název tématu: Analýza vlivů působících na signály GPS a jejich dopadů na výslednou chybu vypočtené polohy
Zadávající katedra: Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací


Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte a popište navigační systém GPS a vlivy působící na kvalitu signálu.
2. Navrhněte metody a algoritmy analýzy vlivu poruchy měření signálu GPS na výslednou chybu vypočtené polohy.
3. Ověřte navržené řešení a zhodnoťte dosažené výsledky.


Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Hloušek, Ph.D.
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací
Konzultant diplomové práce: Ing. Petr Gurník
AŽD Praha
Datum zadání diplomové práce: 18. října 2010
Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2012


Doc. Ing. Jiri Hammarbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Václav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Název mé diplomové práce je Analýza vlivů působících na signály GPS a jejich dopady na výslednou chybu vypočtené polohy. Hlavním cílem této práce je provést zmapování a ověření všech nepříznivých vlivů, které působí na přesnost výpočtu polohy u GPS systému. Část práce je věnována návrhu metod měření jednotlivých vlivů, na kterou navazuje samotné praktické měření. Následuje vyhodnocení naměřených dat a uvedení možných opatření eliminujících působící vlivy na minimum. V poslední části práce jsou uvedena možná řešení vedoucí k použití GNSS v železničních bezpečnostně relevantních aplikacích.

Klíčová slova

GPS měření, zdroje chyb, minimalizace chyb, železniční prostředí, železniční bezpečnostně relevantní aplikace

Annotation

The name of my thesis is Analysis of the influences acting on GPS signals and their impact on the resulting accuracy of the calculated position. The main goal of this work is to map and verify all the adverse influences acting on the resulting accuracy of calculated position of GPS system. Part of the work is devoted to the design methods for measuring individual impacts, followed by the practical measurement. That is followed by evaluation of the measured data and introduction of possible precautions enabling minimization of the influences. In the last part of this work possible solutions leading to use of GNSS in safety-critical applications on the railway are presented.

Key words

GPS measurements, error sources, error mitigation, rail environment, safety-critical applications on the railway

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 9.5.2012

.....

Obsah

Seznam použitých symbolů

Seznam použitých zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Úvod	1
1. Základní koncepce globálních navigačních satelitních systémů	3
1.1 Popis a struktura GNSS	3
1.2 Určení polohy přijímače z přijímaných signálů	4
1.3 Korelace v GPS přijímači	8
2. Analýza vlivů působících na přesnost výpočtu polohy	10
2.1 Identifikace vlivů	10
2.1.1 Vlivy působící na signál při průchodu od satelitů k pozemním přijímačům	10
2.1.1.1 Fyzikální vlastnosti elektromagnetických vln a jejich šíření při průchodu od satelitu k pozemnímu přijímači	10
2.1.1.3 Vliv troposféry na GPS signály	19
2.1.2 Vlivy způsobené nepřesností korekčních parametrů v navigační zprávě	22
2.1.2.1 Predikce satelitního orbitu – chyba efemerid	22
2.1.2.2 Chyba atomových hodin	23
2.1.3 Vliv geometrického uspořádání satelitů vůči poloze přijímače	24
2.1.4 Vlivy působící na GPS signály v okolí přijímače	26
2.1.4.2 Mnohacestné šíření	26
2.1.5 Vliv šumu na vstupu GPS přijímače	28
2.2 Shrnutí vlivů působících na GPS signály	33
3. Metodika záznamu GPS raw dat	34
3.1 Popis měřicího systému	34
3.2 Metodika záznamu dat ovlivněných maskováním	36
3.3 Metodika záznamu dat ovlivněných mnohacestným šířením	38
3.4 Metodika zobrazení atmosférických vlivů	39
3.4.1 Metodika vyhodnocení ionosférického zpoždění	39
3.4.2 Metodika vyhodnocení troposférického zpoždění	39
3.5 Metodika zobrazení nestálosti atomových hodin	40
3.6 Metodika měření šumu GPS přijímačů	40
4. Vyhodnocení naměřených dat	41

4.1	Vyhodnocení vlivu maskování satelitních signálů	41
4.1.1	Statické případy	41
4.1.2	Dynamické případy	54
4.1.3	Shrnutí získaných poznatků při měření maskování satelitních signálů .	61
4.2	Vyhodnocení vlivu mnohacestného šíření satelitních signálů	62
4.3	Vyhodnocení vlivu ionosférického zpoždění	64
4.4	Vyhodnocení vlivu troposférického zpoždění	69
4.5	Vyhodnocení vlivu nestálosti atomových hodin	71
5.	Návrh metod pro potlačení nepříznivých vlivů	74
5.1	Technická opatření eliminující působení nepříznivých vlivů	74
5.1.1	Možná opatření eliminující vliv maskování satelitních signálů	74
5.1.2	Možná opatření eliminující vliv ionosférického a troposférického zpoždění	77
5.1.3	Možná opatření eliminující vliv mnohacestného šíření.....	79
5.2	Návrh možných opatření vedoucích k zajištění potřebné úrovně integrity	80
6.	Závěr	84
	Seznam literatury.....	85
	Příloha A_popis měřících stanovišť	
	Příloha B_rozložení satelitů na obloze během doby měření	

Seznam použitých symbolů

- ρ_{rec}^{sat} [m] – vzdálenost mezi satelitem a přijímačem
- c [m/s] – rychlost světla ve vakuu
- Δt [s] – doba šíření signálu od satelitu k přijímači
- ω_E [°/hod] – rychlost otáčení Země
- t_{GPS} [s] – GPS referenční čas
- t_{OC} [s] – systémový čas satelitu
- T_R [s] – systémový čas přijímače
- dt^{sat} [s] – offset atomových hodin
- dt_{rec} [s] – offset systémových hodin přijímače
- C_{rec}^{sat} [m] – pseudovzdálenost
- ϵ_S [m] – vliv šumu při výpočtu pseudovzdálenosti
- rel_{rec}^{sat} [m] – vliv relativistického efektu při výpočtu pseudovzdálenosti
- $Trop_{rec}^{sat}$ [m] – troposférické zpoždění
- Ion_{rec}^{sat} [m] – ionosférické zpoždění
- n [-] – index lomu
- v [m/s] – rychlost šíření elektromagnetických vln v daném prostředí
- ϵ_r [F/m] – relativní permitivita
- μ_r [H/m] – relativní permeabilita
- ϵ_0 [F/m] – permitivita vakua
- μ_0 [H/m] – permeabilita vakua
- Δl [m] – prodloužení trajektorie elektromagnetické vlny
- ΔT [s] – zpoždění elektromagnetických vln
- v_p [m/s] – fázová rychlost
- v_g [m/s] – skupinová rychlost
- n_p [-] – index lomu fázové rychlosti
- n_g [-] – index lomu skupinové rychlosti
- f [Hz] – frekvence
- n_e [elektron/m³] – elektronová hustota

TEC [10^{16} elektron/ m^2] – celkový obsah elektronů

$TEC_{VERTICAL}$ [10^{16} elektron/ m^2] – celkový obsah elektronů po vertikální ose

OF [-] – faktor zaoblení

R_E [km] – průměrný poloměr Země

h_1 [km] – střední výška ionosféry

$I(\nu)$ [m] – ionosférické zpoždění závislé na elevačním úhlu

I_Z [m] – ionosférické zpoždění při zenitu

t [s] – lokální čas

F [°] – míra sklonu rotační osy Země

P [-] – perioda kosinové funkce

DC [ns] – konstantní časový offset v noci

A [-] – amplituda kosinové funkce přes den

Φ [°] – fáze maximální hodnoty vertikálního zpoždění

φ [°] – geomagnetická šířka

$I_{GD L1}$ [m] – odhad ionosférického skupinového zpoždění L1 signálu GPS systému

C_{recIF}^{sat} [m] – pseudovzdálenost bez vlivu ionosférického zpoždění

f_{L1}, f_{L2} [MHz] – frekvence GPS signálů L1 a L2

N [-] – refraktivita

P_d [kPa] – parciální tlak suchého vzduchu

P_w [kPa] – parciální tlak vodních par

Z_d [-] – kompresní koeficient suchého vzduchu

Z_w [-] – kompresní koeficient vodních par

N_d [-] – refraktivita suchého vzduchu

N_w [-] – refraktivita vodních par

ΔI_d [m] – prodloužení trajektorie vlivem složky suchého vzduchu

ΔI_w [m] – prodloužení trajektorie vlivem složky vodních par

$\Delta \tilde{I}_h$ [m] – celkové zpoždění složky suchého vzduchu při zenitu

$\Delta \tilde{I}_w$ [m] – celkové zpoždění složky vodních par při zenitu

\mathcal{E}_{xT} [m] – chyba polohy satelitu vertikální složky

\mathcal{E}_{xT} [m] – chyba polohy satelitu horizontální složky

ϵ_R [m] – chyba polohy satelitu radiální složky

δt_{CLK} [s] – korekce offsetu atomových hodin

a_{f_0} [s] – zkreslení atomových hodin

a_{f_1} [s/s] – drift atomových hodin

a_{f_2} [s/s²] – frekvenční drift atomových hodin

Δt_r [s] – korekce relativistického efektu

F_s [-] – šumový činitel dvojbranu

S_i [W] – vstupní signál

N_i [W] – vstupní šum

S_o [W] – výstupní signál

N_o [W] – výstupní šum

G [-] – zisk dvojbranu

N_A [W] – šum přidaný dvojbranem

k [JK⁻¹] – Boltzmannova konstanta

T_0 [K] – pokojová teplota

B [Hz] – šířka frekvenčního pásma

T_E [K] – efektivní teplota

NF [dB] – šumové číslo

Seznam použitých zkratk

SIL – *Safety Integrity Level*

RAMS – *Reliability, Availability, Maintainability, Safety*

GNSS – *Global Navigation Satellite System*

HW – *Hardware*

SW – *Software*

GPS – *Global Positioning System*

GLONASS – *Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Systema*

ECEF – *Earth-Centered, Earth-Fixed*

UHF – *Ultra High Frequency*

TEC – *Total Electron Content*

OF – *Obliquity Factor*

IP – *Ionospheric Pierce Point*

UT – *Universal Time*

ČR – *Česká Republika*

RHCP – *Right-Hand Circular Polarization*

LHCP – *Left-Hand Circular Polarization*

DOP – *Dilution Of Precision*

HDOP – *Horizontal Dilution Of Precision*

VDOP – *Vertical Dilution Of Precision*

PDOP – *Position Dilution Of Precision*

NGS – *National Geodetic Survey*

WAAS – *Wide Area Augmentation System*

DGPS – *Differential Global Positioning System*

INS – *Inertial Navigation System*

LADGPS – *Local Area DGPS*

WADGPS – *Wide Area DGPS*

EGNOS – *European Geostationary Navigation Overlay System*

OS – *Open Service*

SOL – *Safety of Life*

SIS – *Signal in Space*

RAIM – *Receiver Autonomous Integrity Monitoring*

Seznam obrázků

Obrázek 1_Struktura GNSS systému

Obrázek 2_Určení polohy pomocí měření vzdáleností

Obrázek 3_Geometrická vzdálenost mezi satelity a přijímačem

Obrázek 4_Změna polohy satelitu během šíření signálu od satelitu k přijímači

Obrázek 5_Princip korelace

Obrázek 6_Autokorelační funkce

Obrázek 7_Trajektorie signálu mezi satelitem a přijímačem

Obrázek 8_Odraz a lom elektromagnetických vln

Obrázek 9_Trajektorie elektromagnetické vlny při průchodu měnícím se prostředím

Obrázek 10_Závislosti elektronové hustoty na nadmořské výšce

Obrázek 11_Globální mapa závislosti množství TEC na geografické poloze

Obrázek 12_Průběh solárního cyklu a jeho předpověď z března roku 2012

Obrázek 13_Závislost ionosférického zpoždění na elevačním úhlu

Obrázek 14_Poloha hlavního řídicího centra a monitorovacích stanic

Obrázek 15_Znázornění chyby při predikci polohy satelitu

Obrázek 16_Určení polohy přijímače

Obrázek 17_Jednoduchý 2D příklad vlivu geometrického rozložení satelitů vůči přijímači

Obrázek 18_Mnohacestné šíření – odrazy signálu od objektů

Obrázek 19_Konstruktivní a destruktivní interference

Obrázek 20_Kaskádní zapojení dvojbranů_vyjádření velikosti šumu

Obrázek 21_Blokové schéma vstupní části GPS přijímače

Obrázek 22_Měřicí systém v terénu při měření statických případů

Obrázek 23_Umístění antény na automobilu při měření dynamických případů

Obrázek 24_Blokové schéma měřicího systému

Obrázek 25_Oblast softwarového zpracování vstupních dat programem gLAB

Obrázek 26_Lesní porost v okolí tratě

Obrázek 27_Budovy v okolí tratě

Obrázek 28_Zářez na trati

Obrázek 29_Most nad tratí

Obrázek 30_Blokové schéma měřicího systému při měření šumu

Obrázky 31-33_Mapa s naměřenými daty - případ "*Volný výhled na oblohu s minimálním množstvím okolních objektů*"

Obrázek 34_Mapa s naměřenými daty - případ "*Hustý lesní porost v okolí železniční tratě*"

Obrázek 35_Mapa s naměřenými daty - případ "*Hustý lesní porost v okolí železniční tratě*" - zoom

Obrázek 36_Mapa s naměřenými daty1 - případ "*Budovy v okolí železniční tratě*"

Obrázek 37_Mapa s naměřenými daty 2 - případ "*Budovy v okolí železniční tratě*"

Obrázek 38_Mapa s naměřenými daty - případ "*Most nad železniční tratí*"

Obrázek39_Typické blokové schéma měřící jednotky inerciální navigace

Obrázek 40_Možné architektury hybridního systému navigace

Obrázek 41_Obecné schéma DGPS

Obrázek 42_Mapá EGNOS

Obrázek 43_Vertikální vyzařovací charakteristika antény

Obrázek 44_Autokorelační funkce s úzkým korelačním vzorkováním

Obrázek 45_Využití digitálních map tratí

Obrázek 46_Redundantní systém detekce poruchy v okolí přijímače

Seznam tabulek

Tabulka 1_Typické parametry hlavních zdrojů šumu na vstupu GPS přijímače

Tabulka 2_Naměřená data - Statika_Střecha AŽD

Tabulka 3_Naměřená data - Statika_Lesy

Tabulka 4_Naměřená data - Statika_Budovy

Tabulka 5_Naměřená data - Statika_Zářez

Tabulka 6_Naměřená data - Statika_Most

Tabulka 7_Naměřená data - Dynamika_Volný prostor

Tabulka 8_Naměřená data - Dynamika_Lesy

Tabulka 9_Naměřená data - Dynamika_Budovy

Tabulka 10_množství vzorků - Dynamika_Budovy

Tabulka 11_Naměřená data - Dynamika_Mosty

Tabulka 12_Naměřená data - Statika_Multipath

Tabulka 13_Popis měřících stanovišť

Tabulka 14_Přesnost systému EGNOS

Úvod

Tato práce vznikla na základě požadavků firmy AŽD Praha s.r.o. Jejich požadavkem bylo provést analýzu působících vlivů na GPS signály a jejich dopad na velikost výsledné chyby při výpočtu polohy.

V současné době jsou globální navigační systémy platným a hojně využívaným nástrojem v dopravě, kde se zejména využívá lokalizace mobilních zařízení. Největší oblibě a masovému rozšíření se jim v posledních letech dostává především v automobilové dopravě. Avšak globální navigační systémy lze uplatnit také v ostatních oblastech dopravy, jako jsou například lodní doprava, letecká doprava a v neposlední řadě i železniční doprava.

Hlavní oblastí využití globálních navigačních systémů v železniční dopravě je lokalizace vlakové jednotky, či celé vlakové soupravy. Díky této funkci by bylo umožněno sledování vlakových souprav v daném úseku a mohlo by se dosáhnout flexibilnějšího řízení železničního provozu. Principiálně se tedy jedná o možnost záměny některých současně používaných zabezpečovacích zařízení, sloužících k detekci kolejových vozidel, jako jsou kolejové obvody, počítače náprav, balízové systémy, a nebo doplnění tohoto systému na tratě, které nejsou vybavené zabezpečovacími zařízeními.

Jednou z nejdůležitějších vlastností železničních zabezpečovacích zařízení je samotný parametr bezpečnosti, který se vyjadřuje pomocí dosažené úrovně integrity bezpečnosti, tzv. úrovněmi SIL. Na zařízení, která jsou používána na železnicích, jsou velmi striktně kladeny požadavky na spolehlivost, pohotovost, udržovatelnost a bezpečnost zařízení. Souhrnně se tyto požadavky označují, jako specifikace RAMS.

Z bezpečnostních důvodů je nutné provést důslednou analýzu, zda je vůbec možné využít současné globální navigační systémy v železničních bezpečnostních aplikacích, jmenovitě systém GPS. Analýza musí zahrnovat všechny možné příčiny a stavy, které by mohly vést k neakceptovatelné chybě určení polohy vlakové jednotky.

V této práci budou teoreticky zmapovány všechny vlivy působící na přesnost výpočtu polohy. Následně se vytvoří metodika měření všech nepříznivých vlivů a

provede se praktické měření. Po vyhodnocení naměřených dat budou navržena taková opatření, která co nejvíce omezí působící vlivy.

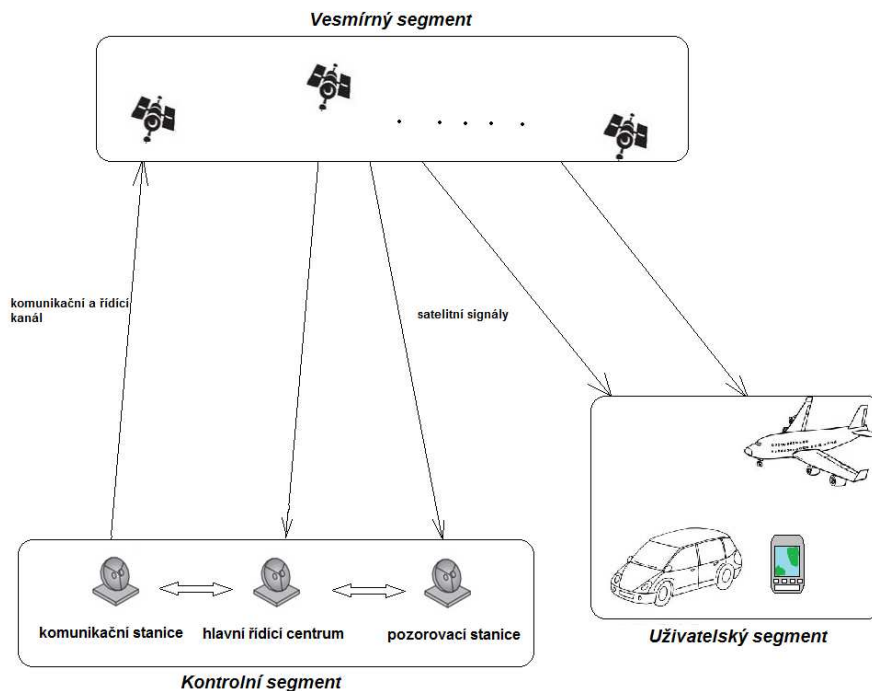
1. Základní koncepce globálních navigačních satelitních systémů

Tato první kapitola provádí pouze základní seznámení s GNSS (*Global Navigation Satellite System*), je zde uvedeno matematické odvození výpočtu pseudovzdálenosti a navigačních rovnic, pomocí kterých se provádí výpočet polohy. V poslední části je uveden princip korelace v GPS přijímači. Podrobnější informace o GNSS lze nalézt například v [1], [2], [3].

1.1 Popis a struktura GNSS

Již z názvu Globální Navigační Satelitní Systém je patrné, že se jedná o systémy s globálním pokrytím. Tyto systémy slouží pro lokalizaci, určení přesné polohy uživatele, pro distribuci přesného času a k měření rychlosti uživatele při dynamickém pohybu.

Obecně se GNSS skládají ze 3 segmentů. Kontrolního, ve kterém jsou zahrnuty hlavní řídicí centrum, stanice komunikující se satelity a dále několik pozorovacích stanic. Vesmírného segmentu, do kterého spadá určitý počet satelitů obíhajících zeměkouli po svých drahách, tzv. orbitách. Posledním segmentem je segment uživatelský, do kterého spadají samotné GNSS přijímače.



Obrázek1_Struktura GNSS systému

Hlavním úkolem kontrolního segmentu je sledování a řízení satelitů. Dochází ke korekcím pozic jednotlivých družic na svých orbitách, korekcím odchylek jejich atomových hodin a ke sledování stavu a provozuschopnosti každého satelitu.

Vesmírný segment je složen z určitého počtu satelitů, které by měli být rozmístěny tak, aby bylo zaručeno plné pokrytí zemského povrchu. Konkrétně systém GPS potřebuje pro plné pokrytí alespoň 24 satelitů, které obíhají Zemi po 6 orbitách ve

výšce asi 20000 km nad povrchem země [1]. Satelity přijímají aktualizovaná data z kontrolního segmentu a dále zasílají signály s daty o jejich poloze, přesném čase a dalších doplňujících informacích k uživateli, jedná se o tzv. navigační zprávy.

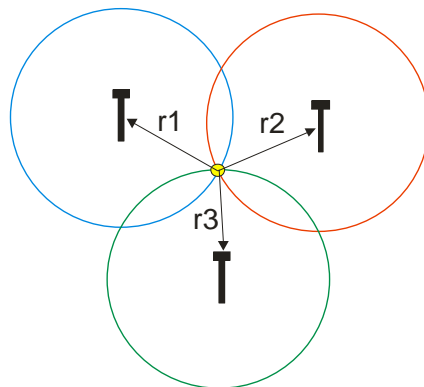
Uživatelský segment ve své podstatě zahrnuje GNSS přijímače, které umí přijímat signály od několika satelitů zároveň a pomocí HW (hardware) a SW (software) zpracují signály a provedou výpočet polohy, času a rychlosti uživatele.

Obecně se GNSS řadí mezi dálkoměrné metody, založené na měření vzdáleností mezi satelitem a přijímačem. Princip výpočtu polohy uživatele je znám pod pojmem multilaterace. V případě satelitní navigace máme několik aktivních vysílačů na známé poloze, v našem případě satelitů a pasivní přijímač na neznámé poloze. Pro 2D určení polohy jsou zapotřebí alespoň 3 satelity, v případě plného 3D určení polohy jsou zapotřebí minimálně 4 satelity.

Nejznámějším představitelem GNSS je americký systém GPS (Global Positioning System), který byl vyvinut pro vojenské účely, avšak v dnešní době je již široce rozšířen ve veřejné sféře. Mezi další GNSS se řadí ruský Glonass (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) a evropský Galileo. Existují i další navigační systémy, u kterých však převládá lokální využití, jejich satelitní signály lze přijímat pouze na určitém území.

1.2 Určení polohy přijímače z přijímaných signálů

Základním údajem, který je zapotřebí zjistit, je vzdálenost mezi přijímačem a satelitem. Pro představu uvedu zjednodušený příklad. Na obrázku 2 stojím kdesi v poušti a zhruba 50km v různých směrech ode mně jsou umístěny 3 navigační majáky. Pokud změřím vzdálenost mezi některým z majáků a mnou, zjistím že se musím vyskytovat někde na kružnici okolo tohoto majáku. Při provedení měření vzdáleností ke každému majáku zjistím, že se kružnice protínají v jednom místě, a to je přesně to místo, kde se nacházím.

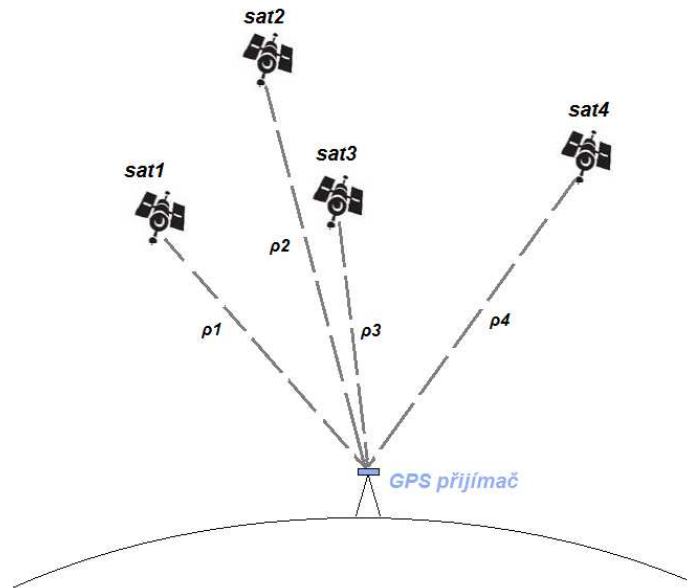


Obrázek 2_Určení polohy pomocí měření vzdáleností

Obecně lze pro výpočet vzdálenosti mezi satelitem a přijímačem psát vztah ve tvaru:

$$\rho_{rec}^{sat} = c * \Delta t \quad (1)$$

Kde ρ_{rec}^{sat} představuje vzdálenosti mezi satelitem a přijímačem, $c = 299\,792\,458$ m/s odpovídá rychlosti světla ve vakuu, Δt měřenému času, kdy se šíří signál od satelitu k přijímači.



Obrázek3_Geometrická vzdálenost mezi satelity a přijímačem

Geometrickou vzdálenost mezi satelitem a přijímačem je možné také vyjádřit pomocí souřadnic satelitu v době vysílání a přijímače v době příjmu v souřadném systému ECEF (Earth-Centered, Earth-Fixed).

$$\rho_{rec}^{sat} = \sqrt{(x^{sat} - x_{rec})^2 + (y^{sat} - y_{rec})^2 + (z^{sat} - z_{rec})^2} = \|\mathbf{x}^{(k)} - \mathbf{x}\| \quad (2)$$

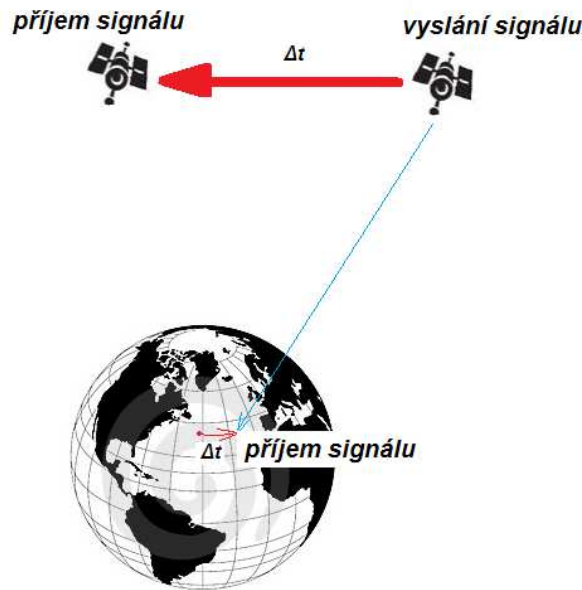
Vektor $\mathbf{x} = (x_{rec}, y_{rec}, z_{rec})$ reprezentuje pozici přijímače, vektor $\mathbf{x}^{(k)} = (x_{sat}^{(k)}, y_{sat}^{(k)}, z_{sat}^{(k)})$, pro $k = 1, 2, \dots, n$ reprezentuje pozici k -tého satelitu v čase vysílání signálu.

Během průchodu signálu od satelitu k přijímači dochází k rotaci osy-Z souřadného systému o hodnotu $\omega_E \cdot \Delta t$, kde ω_E je rychlost otáčení Země. Pro vyjádření pozice satelitů v souřadném systému ECEF lze psát následující závislost:

$$\mathbf{x}^{(k)} = \begin{bmatrix} \cos\omega_E\tau & \sin\omega_E\tau & 0 \\ -\sin\omega_E\tau & \cos\omega_E\tau & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \underline{\mathbf{x}}^{(k)}$$

Kde vektor $\underline{\mathbf{x}}^{(k)}$ představuje pozici satelitu v čase vysílání signálu v ECEF souřadném systému.

Dále na obrázku 4 je znázorněn posun satelitu na obloze během doby šíření signálu. Pro výpočet přesné polohy přijímače je však nutné znát polohu satelitu v době vysílání.



Obrázek 4_Změna polohy satelitu během šíření signálu od satelitu k přijímači

Pro pochopení dalších souvislostí je zapotřebí si uvědomit, že existují 3 různé systémové časy, které nejsou mezi sebou dokonale synchronizovány. Jedná se o referenční GPS čas - t_{GPS} , systémový čas satelitu - t_{OC} a systémový čas přijímače - T_R . Pro vzdálenost mezi satelitem a přijímačem lze nyní psát vztah ve tvaru:

$$\rho_{rec}^{sat} = c * \Delta t = c * [t_{rec}(T_R) - t^{ems}(t_{OC})] \quad (3)$$

Rozdíl mezi referenčním GPS časem a systémovým časem satelitu se nazývá offset atomových hodin - dt^{sat} , viz. rovnice 4. Podrobnosti o offsetu atomových hodin jsou následně uvedeny v podkapitole 2.1.2.2.

$$dt^{sat} = t_{OC} - t_{GPS} \quad (4)$$

Následně lze psát vztah pro čas vysílání i příjmu v GPS referenčním čase a vyjádřit tak vzdálenost mezi satelitem a přijímačem právě v GPS referenčním čase:

$$t_{GPS} = t^{ems}(t_{OC}) - dt^{sat} = t_{rec}(T_R) - \frac{\rho_{rec}^{sat}}{c + dt^{sat}} \rightarrow \rho_{rec}^{sat} \quad (5)$$

Řešení navigačních rovnic:

Při řešení navigačních rovnic vycházíme z předpokladů, že jsou provedeny výpočty vzdáleností mezi satelity a přijímačem - $\rho_{rec}^{sat(k)}$ a jsou známy offsety atomových hodin satelitů - $dt^{sat(k)}$. Pomocí navigačních rovnic je zjišťována pozice přijímače a offset systémových hodin přijímače.

Pro každý satelit lze psát následující rovnice:

$$\begin{aligned}
 C_{rec}^{sat(k)} &= \rho_{rec}^{sat(k)} + c \left(dt_{rec} - dt^{sat(k)} \right) + \sum \delta^{(k)} + \varepsilon_S = \\
 &= \rho_{0rec}^{sat(k)} + \frac{x_{0rec} - x_{sat}^{(k)}}{\rho_{0rec}^{sat(k)}} dx_{rec} + \frac{y_{0rec} - y_{sat}^{(k)}}{\rho_{0rec}^{sat(k)}} dy_{rec} \\
 &+ \frac{z_{0rec} - z_{sat}^{(k)}}{\rho_{0rec}^{sat(k)}} dz_{rec} + c \left(dt_{rec} - dt^{sat(k)} \right) + \sum \delta^{(k)} + \varepsilon_S
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Kde dt_{rec} je offset systémových hodin přijímače, $\sum \delta^{(k)}$ je součet všech vlivů ovlivňujících přesnost výpočtu pseudovzdálenosti a ε_S je vliv šumu. Pro vyjádření souřadnic přijímače - dx_{rec} , dy_{rec} , dz_{rec} lze psát následující rovnice:

$$dx_{rec} = x_{rec} - x_{0rec} ; dy_{rec} = y_{rec} - y_{0rec} ; dz_{rec} = z_{rec} - z_{0rec} \tag{7}$$

Na počátku řešení navigačních rovnic nejsou známy souřadnice přijímače, avšak můžeme provést náhodný odhad těchto souřadnic. Odhad lze vyjádřit pomocí vektoru $\mathbf{x}_0 = (x_{0rec}, y_{0rec}, z_{0rec})$.

Nejprve bude proveden výpočet pseudovzdálenosti při odhadu souřadnic přijímače (0-tá iterace), pak budou vypočteny jednotlivé složky $a_x = \frac{x_{0rec} - x_{sat}^{(k)}}{\rho_{0rec}^{sat(k)}}$,

$$a_y = \frac{y_{0rec} - y_{sat}^{(k)}}{\rho_{0rec}^{sat(k)}}, a_z = \frac{z_{0rec} - z_{sat}^{(k)}}{\rho_{0rec}^{sat(k)}} \text{ a } \Delta\rho = \rho_{0rec}^{sat(k)} - \rho_{rec}^{sat(k)}.$$

Následně zbývají 4 neznámé - dx_{rec} , dy_{rec} , dz_{rec} a součin $c \cdot dt_{rec}$. Pro výpočet těchto neznámých je zapotřebí vytvořit alespoň 4 rovnice, tzn. přijímat signál alespoň od 4 satelitů. Níže jsou obecně uvedeny rovnice, pomocí kterých lze zbývající neznámé vypočítat.

$$\Delta\rho_1 = a_{x1} \cdot dx_{rec} + a_{y1} \cdot dy_{rec} + a_{z1} \cdot dz_{rec} - c \cdot dt_{rec}$$

$$\Delta\rho_2 = a_{x2} \cdot dx_{rec} + a_{y2} \cdot dy_{rec} + a_{z2} \cdot dz_{rec} - c \cdot dt_{rec}$$

.
.
.

$$\Delta\rho_k = a_{xk} \cdot dx_{rec} + a_{yk} \cdot dy_{rec} + a_{zk} \cdot dz_{rec} - c \cdot dt_{rec} \tag{8}$$

Postup výpočtu rovnic 8 lze přepsat do maticového tvaru následovně:

$$\Delta\rho = \begin{bmatrix} \Delta\rho_1 \\ \Delta\rho_2 \\ \vdots \\ \Delta\rho_k \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} & 1 \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & 1 \\ a_{xk} & a_{yk} & a_{zk} & 1 \end{bmatrix} \quad \Delta x = \begin{bmatrix} dx_{rec} \\ dy_{rec} \\ dz_{rec} \\ -c \cdot dt_{rec} \end{bmatrix}$$

Výpočet souřadnic přijímače lze provést dle následujícího vztahu:

$$\Delta\rho = A \cdot \Delta x \rightarrow \Delta x = A^{-1} \cdot \Delta\rho \quad (9)$$

Dále lze provést řešení pomocí metody nejmenších čtverců (předpoklad stejného zatížení chybou u všech měření):

$$\min \|\Delta\rho - A \cdot \Delta x\|^2 \rightarrow \widehat{\Delta x} = (A^t \cdot A)^{-1} \cdot A^t \cdot \Delta\rho \quad (10)$$

Pokud je zatížení chybou pro všechny měření různé, lze vytvořit tzv. "váhované řešení", kde do řešení vstupuje tzv. "váhovací matice" - W .

$$\widehat{\Delta x} = (A^t \cdot W \cdot A)^{-1} \cdot A^t \cdot W \cdot \Delta\rho \quad (11)$$

Výše uvedená proměnná $\sum \delta^{(k)}$ vyjadřuje součet vlivů působících na přesnost výpočtu pseudovzdálenosti a lze vyjádřit vztahem:

$$\sum \delta^{(k)} = rel_{rec}^{sat} + Trop_{rec}^{sat} + Ion_{rec}^{sat} \quad (12)$$

Kde rel_{rec}^{sat} je vliv relativistického efektu, $Trop_{rec}^{sat}$ je troposférické zpoždění a Ion_{rec}^{sat} je ionosférické zpoždění.

Nakonec lze rovnici pro výpočet pseudovzdálenosti přepsat do tvaru:

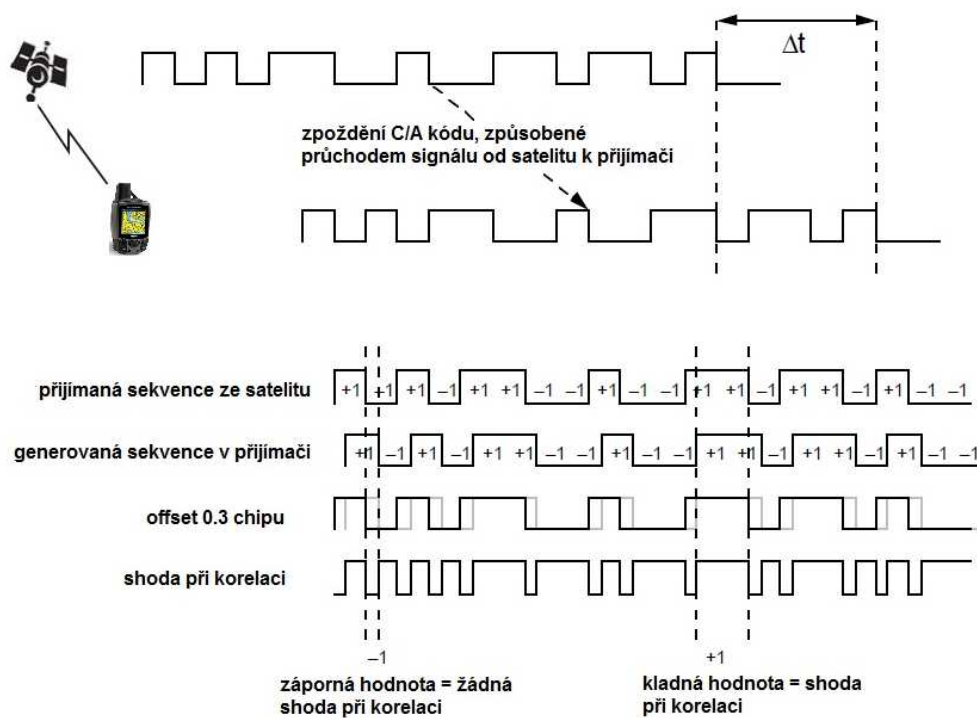
$$C_{rec}^{sat} = \rho_{rec}^{sat} + c(dt_{rec} - dt^{sat}) + rel_{rec}^{sat} + Trop_{rec}^{sat} + Ion_{rec}^{sat} + \varepsilon_S \quad (13)$$

Použité vztahy a rovnice jsem převzal z [1], [2], [3].

1.3 Korelace v GPS přijímači

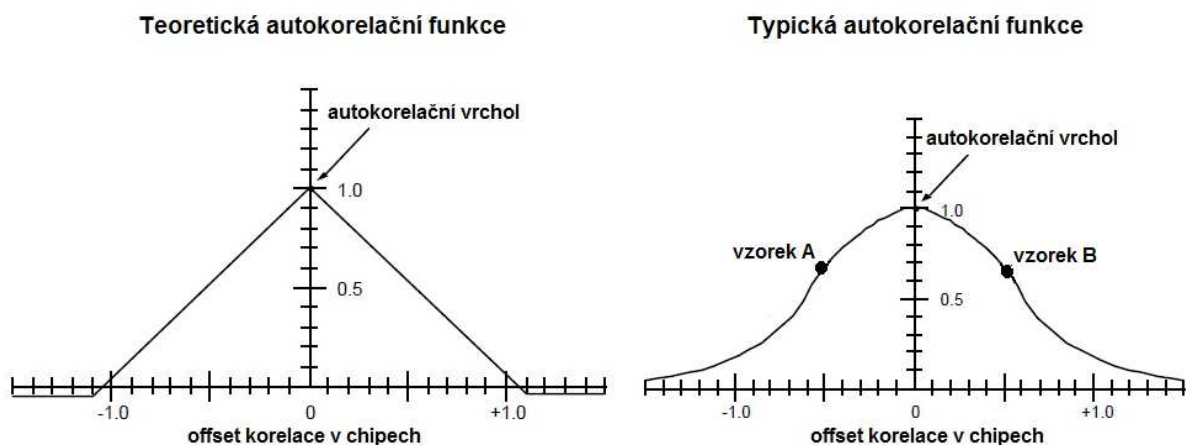
Každý GPS satelit vysílá vlastní unikátní sekvenci 1023 bitů, tzv. chipů. Takto dlouhou sekvenci má C/A kód, P(Y) kód má tuto sekvenci desetkrát větší. V přijímači jsou uloženy unikátní sekvence všech GPS satelitů. Při snaze synchronizace přijímače s přijímaným signálem dochází k porovnávání příchozí sekvence daného satelitu se sekvencemi uloženými v paměti přijímače. V anglické literatuře je tento děj označován jako "signal acquisition". K porovnávání sekvencí slouží tzv. korelátor. Je nutné si uvědomit, že dokud nedojde při korelaci ke shodě mezi jednotlivými sekvencemi, jeví se signál pouze jako náhodný šum a tudíž nemůže být využit.

Na obrázku 5 je v horní části naznačen časový rozdíl mezi příchozí sekvencí ze satelitu a sekvencí generovanou v přijímači. Ve spodní části obrázku 5 je naznačen princip funkce korelátoru.



Obrázek 5_Princip korelace_převzato s úpravami z [4]

Na následujícím obrázku 6 je zobrazena teoretická autokorelační funkce a typická autokorelační funkce. Autokorelační funkce ve své podstatě zobrazuje to samé jako je zobrazeno ve spodní části obrázku 5, při zcela shodných sekvencích je dosaženo autokorelačního vrcholu. Teoretickou autokorelační funkci bychom získaly při nekonečné šířce zpracovávaného frekvenčního pásma GPS přijímačem, tedy při získání 100% rozprostřeného spektra GPS signálu. Typická autokorelační funkce odpovídá použití vstupního filtru s šířkou pásma zhruba 2MHz, kdy při takové šířce pásma lze získat přibližně 90% rozprostřeného spektra GPS signálu. V praxi se obvykle používá filtr s šířkou pásma 20MHz , tak aby byl schopen zachytit 99% rozprostřeného spektra GPS signálu.



Obrázek 6_Autokorelační funkce_převzato s úpravami z [4]

Na obrázku 6 si lze všimnout, že typická autokorelační funkce je oproti teoretické autokorelační funkci značně zaoblena, což je způsobeno vstupním filtrem a jeho omezenou šířkou frekvenčního pásma. S ohledem na co největší přesnost je požadavkem, aby autokorelační funkce měla co nejstrmější průběh směrem k autokorelačnímu vrcholu a tak tento vrchol jednoznačně určovala. U průběhu typické autokorelační funkce je okolí autokorelačního vrcholu značně ploché a nastává tak problém s jednoznačným určením vrcholu, což způsobuje vysokou citlivost na korelační zkreslení způsobené mnohacestným šířením.

Ke snížení nejednoznačnosti určení autokorelačního vrcholu se používá metoda, kdy se použijí tři vzorky - A, B a autokorelační vrchol, viz. obrázek 6 vpravo. Vzorky A a B jsou od sebe typicky vzdálené 1 chip. Čím menší je korelační vzdálenost mezi těmito vzorky, tím větší je dosahovaná přesnost a také odolnost vůči mnohacestnému šíření signálu. Pokud je totiž zpoždění odražených signálů větší jak korelační vzdálenost, nedochází k ovlivnění přesnosti výpočtu polohy. Pokud je tomu právě naopak a velikost zpoždění je menší jak korelační vzdálenost, dochází tím k ovlivnění přesnosti výpočtu polohy [4].

2. Analýza vlivů působících na přesnost výpočtu polohy

V této kapitole jsou zmapovány všechny vlivy působící na přesnost výpočtu polohy, v podkapitole 2.2 je provedeno shrnutí všech těchto vlivů. Mimo jiné je zde uvedeno i několik atmosférických korekčních modelů jako například Klobucharův model nebo Niellův model.

2.1 Identifikace vlivů

2.1.1 Vlivy působící na signál při průchodu od satelitů k pozemním přijímačům

2.1.1.1 Fyzikální vlastnosti elektromagnetických vln a jejich šíření při průchodu od satelitu k pozemnímu přijímači

Šíření GPS signálů, ve své podstatě elektromagnetických vln, mezi satelity na oběžných drahách a přijímači, které jsou obvykle umístěny na povrchu Země nebo v její blízkosti, provází několik úskalí. Pro elektromagnetickou vlnu platí zákony optiky a tak při průchodu určitým prostředím dochází k jevům jako je pohlcení, rozptyl, lom či ohyb. Všechny zmíněné jevy mohou negativně působit na GPS signály a způsobit jejich degradaci či úplnou destrukci.

Vzdálenost mezi satelitem a pozemním přijímačem se v závislosti na jejich vzájemné poloze pohybuje v rozmezí 20000km až 26000km. Ve vzdálenosti asi 1000km nad zemí se elektromagnetická vlna šíří plazmatickým prostředím, které je tvořeno především pozitivními ionty H^+ . Pro tuto vrstvu lze považovat směr elektromagnetické vlny za přímý a dochází tak především pouze k útlumu signálu. Ve vzdálenosti nižší jak 1000 km nad zemí dochází vlivem koncentrace určitých látek k útlumu, rozptylu a lomu elektromagnetických vln. Hlavní složkou, která se podílí na vzniku chyby při výpočtu polohy pomocí GPS je lom elektromagnetických vln.

Lom elektromagnetických vln lze vyjádřit vztahem 14, kde n představuje index lomu, c představuje rychlost světla ve vakuu a v rychlost šíření elektromagnetických vln v daném prostředí. Jak je patrné ze vztahu 14, index lomu lze také vyjádřit v závislosti na dielektrických a magnetických vlastnostech prostředí, kde ϵ_r představuje relativní permitivitu a μ_r relativní permeabilitu.

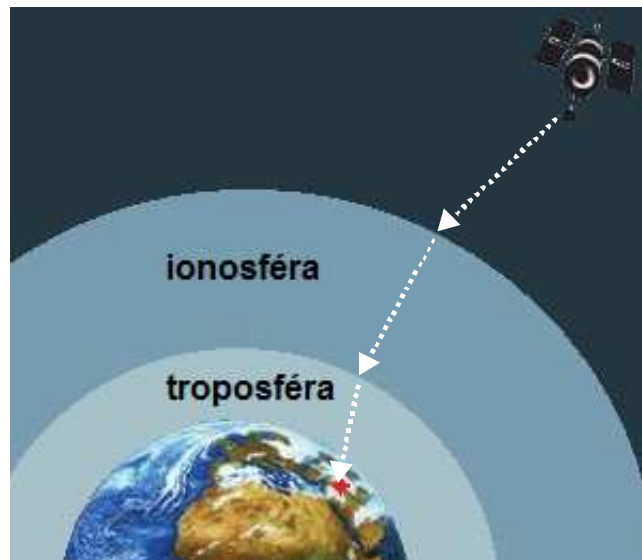
$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (14)$$

Rychlost šíření elektromagnetických vln lze obecně vyjádřit z maxwellových rovnic následujícím vztahem. Parametry ϵ_0 a μ_0 charakterizují materiálové vlastnosti vakua.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (15)$$

Rychlost šíření elektromagnetických vln v prostředí s určitou hodnotou relativní permitivity a relativní permeability lze vyjádřit vztahem 16.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon_r \mu_r}} \quad (16)$$

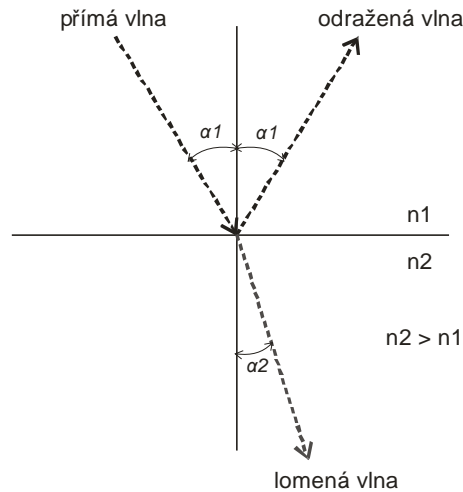


Obrázek 7_ Trajektorie signálu mezi satelitem a přijímačem

Výše uvedený vztah 16 ukazuje změnu rychlosti šíření elektromagnetické vlny v závislosti na prostředí. K této změně dochází především v atmosféře, která se rozprostírá přibližně do výšky 1000km nad povrchem Země. Atmosféra obsahuje několik vrstev, z nichž největší vliv na šíření elektromagnetických vln mají ionosféra a troposféra. Tyto vrstvy nejsou zcela kompaktní, a tak při průchodu signálu těmito vrstvami dochází ke změně index lomu.

Pro změnu indexu lomu, a tedy i rychlost šíření elektromagnetických vln platí zákon lomu, tzv. Snellův zákon. Ten je popsán následujícím vztahem 17 [5].

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r2}\mu_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}\mu_{r1}}} \quad (17)$$

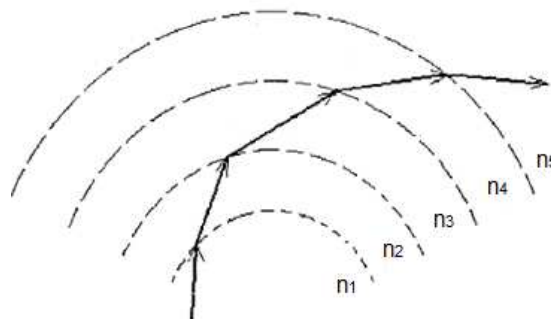


Obrázek 8_Odraz a lom elektromagnetických vln

Dobu průchodu signálu (elektromagnetických vln) od satelitu k přijímači lze popsat vztahem 18.

$$\Delta t = \frac{1}{c} \int_{Sat}^{Rec} n(l) dl \quad (18)$$

Kde index lomu n v závislosti na trajektorii signálu představuje měnící se prostředí. Na obrázku 9 je znázorněna trajektorie signálu při průchodu různými prostředími s odlišnými indexy lomu.



Obrázek 9_Trajektorie elektromagnetické vlny při průchodu měnícím se prostředím

Z obrázku 9 lze provést jednoduchou úvahu. Při lomu elektromagnetických vln dochází k prodloužení jejich trajektorie - Δl a tedy prodloužení doby průchodu signálu od satelitu k přijímači. Zpoždění ΔT lze vyjádřit následujícím vztahem.

$$\Delta l = \int_{Sat}^{Rec} [n(l) - 1] dl \rightarrow \Delta \tau = \frac{1}{c} \int_{Sat}^{Rec} [n(l) - 1] dl \quad (19)$$

Celkově lze z výše uvedených vztahů shrnout, že změna rychlosti šíření signálu, změna délky trajektorie a prodloužení doby šíření signálu mají za následek vznik chyby při výpočtu pseudovzdálenosti.

Jak již bylo na začátku této kapitoly zmíněno, může v určitých prostředích docházet k rozptylu elektromagnetických vln. Pokud je index lomu daného prostředí závislý na frekvenci, lze toto prostředí označit jako disperzní. Z tohoto předpokladu také vyplývá, že dochází ke změně rychlosti šíření signálu v závislosti na frekvenci. Pro frekvence v pásmu UHF (Ultra High Frequency), do kterých spadá navigační systém GPS, lze ionosféru považovat za disperzní prostředí.

Pro disperzní prostředí se definují parametry fázová a skupinová rychlost. Pro snazší pochopení těchto parametrů si lze představit, že fázová rychlost odpovídá rychlosti šíření nosné vlny a skupinová rychlost rychlosti šíření tzv. "modulační obálky". Fázová rychlost v_p a skupinová rychlost v_g jsou definovány následujícími vztahy.

$$v_p = \frac{c}{n_p} \quad (20)$$

$$v_g = \frac{c}{n_g} \quad (21)$$

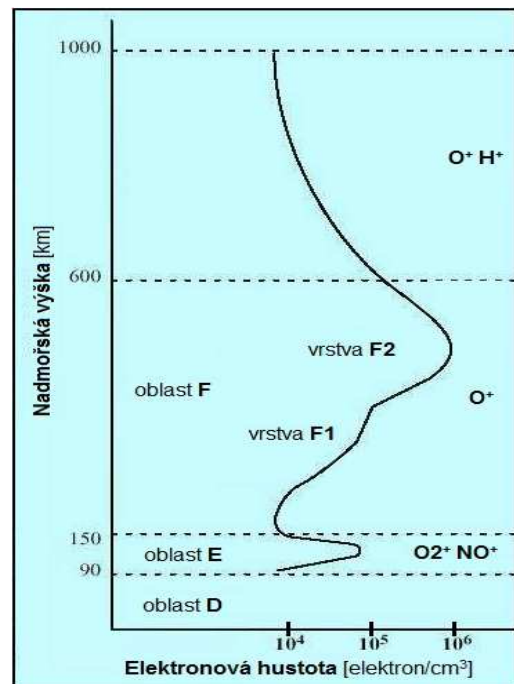
Kde c je rychlost šíření elektromagnetických vln ve vakuu, n_p je index lomu fázové rychlosti a n_g je index lomu skupinové rychlosti. Vzájemnou závislost výše uvedených vztahů lze vyjádřit vztahem 22, kde f je frekvence [1].

$$n_g = n_p + f \frac{dn_p}{df} \quad (22)$$

2.1.1.2 Vliv ionosféry na GPS signály

Ionosféra je vrstva, která se rozprostírá okolo celé planety v rozmezí přibližně od 70 km do zhruba 1000 km nad povrchem země. Je tvořena ionizovanými plyny H_2 , He, O_2 a N_2 . Tyto plyny se vyskytují v různých koncentracích v určitých oblastech, které se liší zejména vzdáleností nad povrchem země, viz obrázek 10.

V ionosféře dochází především vlivem sluneční energie k ionizaci molekul plynů. Slunce produkuje ultrafialové záření, které má vlnovou délku maximálně 100nm. Toto záření dopadá na molekuly plynů a vyráží z těchto molekul elektrony. Vyražené elektrony dále narážejí do dalších molekul, a tak vyráží další elektrony. Kromě slunečního záření, které je stálým zdrojem ionizace, dochází k ionosférickým bouřím, způsobeným sluneční erupcí. Dalšími zdroji ionizace mohou být proudy meteorů, které občas vnikají do zemské atmosféry, nebo vysoké gradienty elektrostatického potenciálu bouřkových mraků [5].



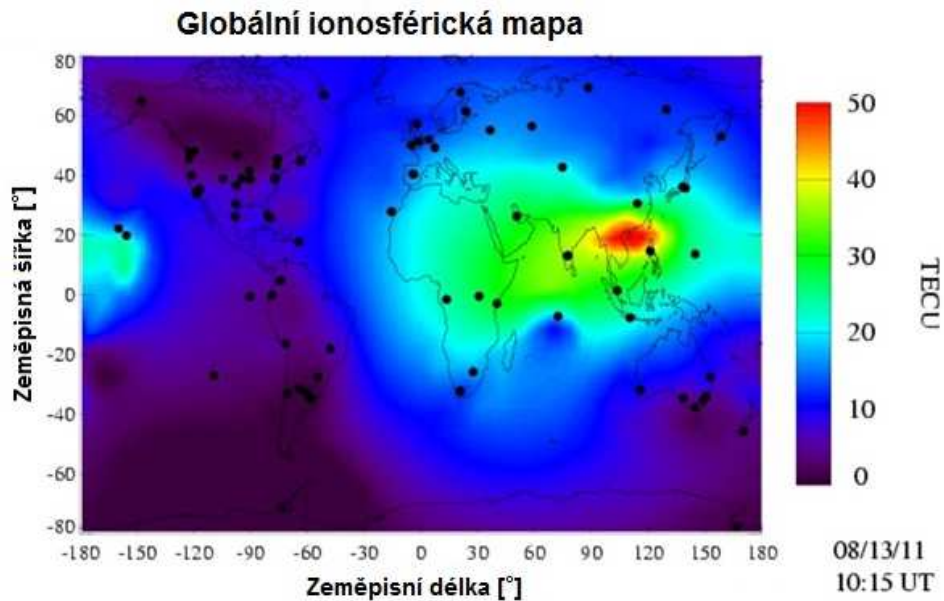
Obrázek 10_Závislost elektronové hustoty na nadmořské výšce

Ionosféra se dělí na dílčí oblasti, které jsou definovány dle hustoty elektronů. Nejnižší oblast se označuje D, nad ní je oblast E, kterou následuje oblast F. Tu lze dále rozdělit na vrstvy F1 a F2 .

Rychlost průchodu signálu ionosférou je dána množstvím volných elektronů v trajektorii signálu. Tento celkový obsah elektronu je označován jako **TEC** (*Total Electron Content*). Parametr TEC je definován jako počet elektronů ve válci o ploše 1m^2 a lze vyjádřit vztahem 23, kde n_e je proměnná elektronová hustota podél trajektorie šíření signálu.

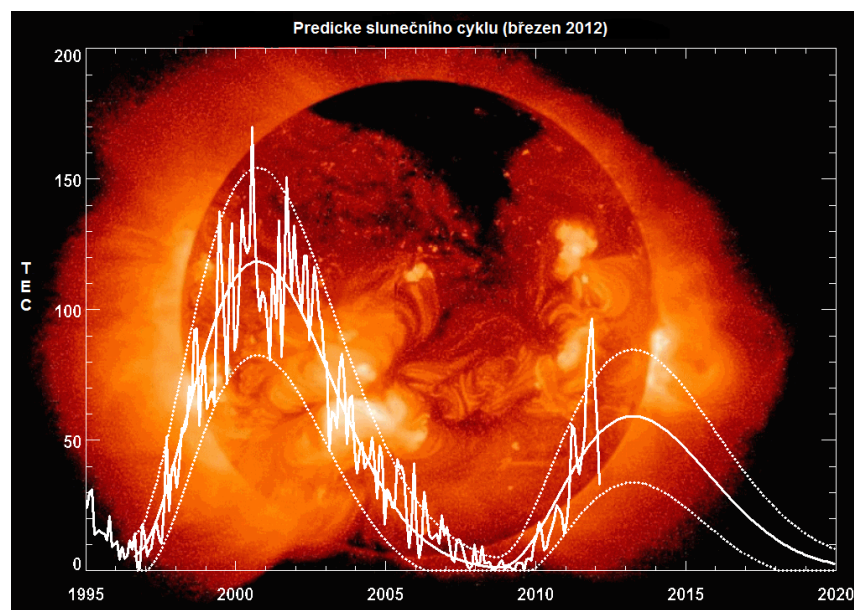
$$TEC = \int_S^R n_e(l) dl \quad (23)$$

Obvykle se parametr TEC udává v řádu 10^{16} elektronů/ m^2 a jeho hodnota se obvykle pohybuje v rozmezí 0 až 150 [1]. Na obrázku 11 je zobrazena globální ionosférická mapa udávající celkový obsah elektronů - TEC v závislosti na geografické poloze.



Obrázek 11_Globální mapa závislosti množství TEC na geografické poloze_převzato s úpravami z [6]

Jak již bylo výše zmíněno, množství volných elektronů se mění v závislosti na sluneční aktivitě, což mimo jiné vypovídá o změnách během ročních období a střídání dne s nocí. V nočním období, kdy sluneční záření dopadá pouze na jednu stranu zeměkoule, dochází během několika minut k rekombinaci elektronů a iontů. Touto rekombinací dochází k vymizení vrstvy D a F1. Dalším faktorem ovlivňujícím velikost parametru TEC je jedenáctiletý sluneční cyklus, který má sinusový charakter s měnící se amplitudou. V letech, kdy je největší solární aktivita dle průběhu cyklu, může docházet k nepředvídatelným krátkodobým efektům či lokálním anomáliím. Tento cyklus je zobrazen na obrázku 12. Dalším ovlivňujícím faktorem mohou být geomagnetické poruchy Země [1], [5].

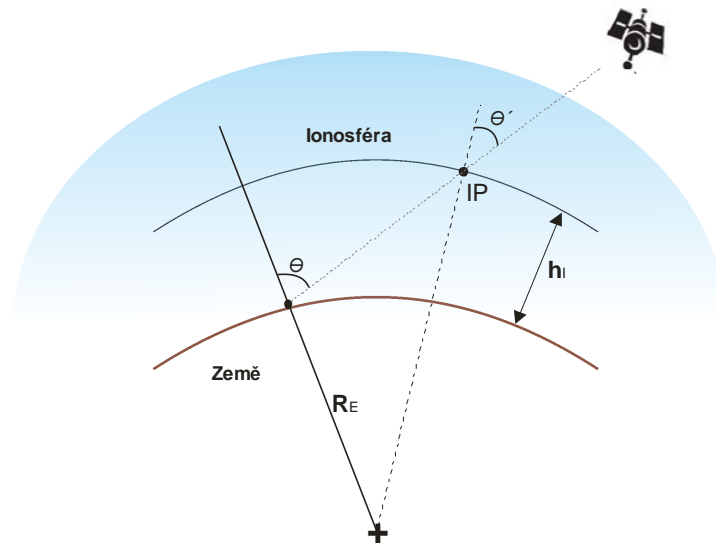


Obrázek 12_Průběh solárního cyklu a jeho předpověď z března roku 2012_převzato s úpravami z [7]

Ze vztahů pro výpočet fázové a skupinové rychlosti šíření v ionosféře, které jsou uvedeny například v [1] a [2] vyplývá, že velikost ionosférického zpoždění je závislá na elektronové hustotě v trajektorii šířícího se signálu a na frekvenci signálu. Množstvím měření bylo prokázáno největší zpoždění v oblastech $\pm 20^\circ$ od magnetického rovníku Země [1].

Závislost ionosférického zpoždění na elevačním úhlu

Délka dráhy signálu procházejícího přes ionosféru se mění v závislosti na vzájemné poloze satelitu na obloze a přijímače. Pro vyjádření velikosti zpoždění signálu vzhledem k vzájemné poloze satelitu a přijímače lze použít parametr $TEC_{VERTICAL}$, který vyjadřuje velikost parametru TEC po přímé vertikální ose směrem od přijímače k satelitu a tzv. "faktor zaoblení" označovaný jako **OF** (Obliquity Factor), který slouží pro vyjádření velikosti ionosférického zpoždění v případě, že není satelit přímo nad přijímačem. Tento případ je zobrazen na obrázku 13.



Obrázek 13_Závislost ionosférického zpoždění na elevačním úhlu

Na obrázku je uvedeno několik parametrů, kde R_E je průměrný poloměr Země, h_1 je střední výška ionosféry (350km nad zemí), **IP** je ionosférický bod průniku. Střední výška ionosféry je zvolena vzhledem k největší koncentraci volných elektronů, ionosférický bod průniku je definován jako bod průsečíku přímého vektoru se sférickou vrstvou ve střední výšce ionosféry.

Vyjádřit závislost $TEC_{VERTICAL}$ ve vztahu k TEC lze provést dle následujícího vztahu 24, kde úhly θ a θ' jsou doplňky k elevačním úhlům mezi přijímač-satelit a IP-satelit.

$$TEC(\theta) = \frac{1}{\cos\theta} \cdot TEC_{VERTICAL} \quad (24)$$

Parametr $(\cos \Theta)^{-1}$ definuje OF, který lze přepsat do tvaru úhlu přijímač-satelit dle následujícího vztahu 25 (vyjádření přes funkci sinus).

$$\frac{\sin \theta}{(R_E + h_1)} = \frac{\sin \theta'}{R_E} \quad (25)$$

Následně lze "faktor zaoblení" vyjádřit vztahem 26 nebo vztahem 27 v závislosti na elevačním úhlu přijímače vůči satelitu ν .

$$OF(\theta') = \left[1 - \left(\frac{R_E \sin \theta}{(R_E + h_1)} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (26)$$

$$OF(\nu) = 1 + 16 \left(0,53 - \frac{\nu}{\pi} \right)^3 \quad (27)$$

Hodnota OF se pohybuje v rozmezí 1 až 3. $OF = 1$ vychází při zenitu a hodnota $OF = 3$ pro elevační úhel 5° . Dále lze již vyjádřit ionosférické zpoždění závislé na elevačním úhlu $I(\nu)$ vztahem 28, kde I_z je ionosférické zpoždění při zenitu [1], [9].

$$I(\theta) = I_z * OF(\theta) \quad (28)$$

Ionosférický model

Klobucharův model je současně používaný ionosférický model, využívaný pro snížení vlivu ionosférického zpoždění při výpočtu pseudovzdálenosti. Byl navržen tak, aby minimalizoval HW náročnost v přijímačích. Koeficienty tohoto modelu jsou přenášeny v GPS navigační zprávě [8]. Model definuje velikost ionosférického zpoždění při zenitu v noci jako konstantní hodnotu a přes den funkcí $\cos/2$. Ionosférické zpoždění při zenitu je v lokálním čase t definováno vztahem:

$$I_z(t) = F \cdot \left(DC + A \cdot \cos \frac{[2\pi(t-\Phi)]}{P} \right) \text{ pro } |t - \Phi| < \frac{P}{4}, \text{ jinak } DC \quad (29)$$

I_z odpovídá ionosférickému zpoždění při zenitu, F je tzv. míra sklonu rotační osy Země, P je perioda kosinové funkce (≥ 72000 s), DC je konstantní offset v noci (nastaven na 5 ns, což odpovídá ionosférickému zpoždění 1,5m pro signál L1), A je amplituda kosinové funkce přes den, Φ je fáze maxima vertikálního zpoždění, která je stanovena na 14 hodinu místního času. Toto maximum vertikálního zpoždění může být velmi proměnné a reálně se pohybuje mezi 11. a 17. hodinou, v závislosti na sezóně, zeměpisné šířce a solární aktivitě.

$$A = \sum_{n=0}^3 \alpha_n \varphi^n \quad P = \sum_{n=0}^3 \beta_n \varphi^n$$

Koeficienty α_n , β_n , z kterých jsou vypočteny parametry A a P jsou specifikovány v navigační zprávě. Hodnoty těchto koeficientů jsou vybírány řídicím centrem v závislosti na ionosférických podmínkách. K aktualizacím koeficientů dochází obvykle každých 6 dní. Parametr φ ve výše uvedených závislostech představuje geomagnetickou šířku [8].

Účinek klobucharova modelu je závislý především na době mezi aktualizacemi koeficientů. Výsledky měření ukázaly, že tento model dokáže redukovat vliv ionosféry na GPS signál více jak z 50procent [1].

Eliminace vlivu ionosférického zpoždění měření L1 a L2 signálů

Při použití GPS přijímače schopného přijímat signály L1 a L2 (duální přijímač) je při měření možné odhadnout jak fázové, tak skupinové zpoždění a tím eliminovat vliv ionosférického zpoždění na celkovou přesnost výpočtu polohy.

Při zjednodušení vztahu pro výpočet pseudovzdálenosti, viz rovnice 13 a vyjádření závislosti pseudovzdálenosti pouze na ionosférickém zpoždění je možné psát následující vztah.

$$C_{rec\ L1,L2}^{sat} = C_{rec\ IF}^{sat} + \frac{40,3n_e}{f_{L1,L2}^2} \quad (30)$$

Kde $C_{rec\ L1,L2}^{sat}$ odpovídá měřené pseudovzdálenosti pro L1 a L2 signál, $C_{rec\ IF}^{sat}$ odpovídá změřené pseudovzdálenosti bez vlivu ionosférického zpoždění, n_e je proměnná elektronová hustota podél trajektorie šíření. Právě parametry $C_{rec\ IF}^{sat}$ a n_e je možné odhadnout pomocí duálního přijímače.

Pro odhad ionosférického skupinového zpoždění L1 signálu I_{GD1} lze psát vztah 31.

$$I_{GD1} = \frac{40,3n_e}{f_{L1}^2} = \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} (C_{rec\ L2}^{sat} - C_{rec\ L1}^{sat}) \quad (31)$$

Odhad parametru $C_{rec\ IF}^{sat}$, který odpovídá změřené pseudovzdálenosti bez vlivu ionosférického zpoždění, lze vyjádřit vztahem 32. Parametry f_{L1} a f_{L2} odpovídají frekvencím GPS signálů L1 a L2.

$$C_{rec\ IF}^{sat} = \frac{f_{L1}^2 \rho_{L1} - f_{L2}^2 \rho_{L2}}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \quad (32)$$

Uvedené vzorce jsou převzaty z [1], [9].

Zhodnocení působení ionosféry na GPS signály

Ionosféra je díky velkému množství vlivů, které na ni působí, velice proměnlivá a těžce predikovatelná. Je jedním z největších zdrojů chyb, který postihuje přesnost každého satelitního navigačního systému. Značným faktorem, který ovlivňuje velikost zpoždění při průchodu signálů je elevační úhel. Ve středních nadmořských výškách je velikost zpoždění při zenitu v rozmezí 1 až 3 metrů v noci a mezi 5 až 15 metry v poledne. V extrémních případech může docházet v krátkých časových úsecích i k úplnému útlumu procházejících signálů. Velikost zpoždění lze kompenzovat použitím ionosférického modelu při výpočtu pseudovzdálenosti nebo využitím duálního přijímače a algoritmu popsaného výše. Velikosti zpoždění může být v případě použití klobucharova modelu redukována zhruba na 50%, v případě použití duálního přijímače s příslušným algoritmem téměř 100% [1], [2].

2.1.1.3 Vliv troposféry na GPS signály

Troposféra je nejnižší vrstvou atmosféry a rozprostírá se okolo celé Země. Její výška nad povrchem je proměnlivá, na pólech se pohybuje okolo 9km a na rovníku dosahuje až 16km. Troposféra se skládá z dusíku, kyslíku, vzácných plynů, oxidu uhličitého a vodních par. Obsah vodních par troposféry se pohybuje v rozmezí 0,2% až 4% z celkového obsahu a to v závislosti na zeměpisné šířce.

Index lomu v troposféře je závislý na několika faktorech jako je teplota, tlak a relativní vlhkost. Na rozdíl od ionosféry, troposféra není disperzní pro signály do frekvence 15 GHz a tudíž je fázová i skupinová rychlost GPS signálů totožná. Hodnota indexu lomu se u povrchu země pohybuje mezi hodnotami 1,00026 a 1,00046, v závislosti na klimatických podmínkách. Z toho vyplývá, že rychlost šíření elektromagnetických vln v troposféře je o něco pomalejší než ve vakuu. Prodloužení trajektorie GPS signálu v troposféře se typicky pohybuje v rozmezí 2,5 až 25 metrů v závislosti na elevačním úhlu a klimatických podmínkách [1], [2].

Znalostí tlaku, teploty a vlhkosti podél trajektorie šíření elektromagnetické vlny lze vyjádřit tzv. refraktivitu N , která vyjadřuje množství lomů mezi molekulami plynů. Pro refraktivitu lze obecně psát následující vztah,

$$N = \left(k_1 \frac{P_d}{T}\right) Z_d^{-1} + \left(k_2 \frac{P_w}{T}\right) Z_w^{-1} + \left(k_3 \frac{P_w}{T^2}\right) Z_w^{-1} \quad (33)$$

kde k_1 , k_2 , k_3 jsou refraktivní konstanty, P_d je parciální tlak suchého vzduchu vyjádřený v milibarech, P_w je parciální tlak vodních par vyjádřený taktéž v milibarech, parametry Z_d a Z_w jsou kompresní koeficienty suchého vzduchu a vodních par.

Pro snazší matematickou interpretaci se refraktivita dělí na dvě dílčí složky, hydrostatickou složku a složku vodních par. Tyto dvě složky působí na procházející signál odlišně. Složení hydrostatické složky je relativně stabilní a je závislé na zeměpisné šířce, ročním období a nadmořské výšce. Složka vodních par je velice proměnlivá a závislá na velkém množství parametrů.

Refraktivitu můžeme vyjádřit pomocí indexu lomu následovně.

$$N = (n - 1)10^6 \quad (34)$$

Pro refraktivní složky lze napsat vztah 35, kde N_d je refraktivita suchého vzduchu a N_w je refraktivita vodních par.

$$N = N_d + N_w \quad (35)$$

Poté lze rozdělit celkovou refraktivitu na dílčí složky.

$$N_d = \left(k_1 \frac{P_d}{T}\right) Z_d^{-1} \quad (36)$$

$$N_w = \left(k_2 \frac{P_w}{T}\right) Z_w^{-1} + \left(k_3 \frac{P_w}{T^2}\right) Z_w^{-1} \quad (37)$$

Jednoduchým vztahem lze vyjádřit prodloužení trajektorie elektromagnetické vlny při průchodu troposférou následovně, kde Δl_d je prodloužení trajektorie vlivem složky suchého vzduchu a Δl_w vlivem složky vodních par.

$$\Delta l = \Delta l_d + \Delta l_w \quad (38)$$

Pro vyjádření troposférického zpoždění signálů lze psát vztah 39.

$$Trop_{rec}^{sat} = 10^{-6} \int_{l_1}^{l_2} N(l) dl = 10^{-6} \int_{l_1}^{l_2} [N_d(l) + N_w(l)] dl \quad (39)$$

Délka trajektorie elektromagnetické vlny při průchodu troposférou je ovlivněna vzájemnou polohou satelitu a přijímače. S klesající hodnotou elevačního úhlu se prodlužuje trajektorie elektromagnetické vlny. Pro vyjádření velikosti troposférického zpoždění, které je ovlivněno měnícím se elevačním úhlem se používá tzv. mapovací funkce, která může být popsána například dle vztahu 40 nebo 41.

$$m(v) = \frac{1}{\sin(v)} \quad (40)$$

$$m(v) = \frac{1}{\sin(v) + \frac{a_1}{\sin(v) + \frac{a_2}{\sin(v) + \frac{a_3}{\sin(v) + \dots}}} \quad (41)$$

Při použití mapovací funkce lze vztah 38 přepsat následovně, kde Δl_h^z je tzv. celkové zpoždění (prodloužení trajektorie) složky suchého vzduchu při zenitu a Δl_w^z je tzv. celkové zpoždění složky vodních par při zenitu, $m_d(v)$ je mapovací funkce složky suchého vzduchu závislá na elevačním úhlu a $m_w(v)$ je mapovací funkce složky vodních par taktéž závislá na elevačním úhlu [2], [10].

$$\Delta l_{zenit} = \Delta l_h^z \cdot m_d(v) + \Delta l_w^z \cdot m_w(v) \quad (42)$$

Troposférické modely

Jednoduchý model (Simple model), jak již sám název napovídá, je základní používaný troposférický model pro korekci zpoždění vzniklého při průchodu signálů přes troposféru. Výpočty velikosti zpoždění složek jak suchého vzduchu, tak vodních par jsou dány následujícími vztahy, kde H odpovídá nadmořské výšce.

$$\Delta l_d = 2,3e^{(-0,116 \cdot 10^{-3} \cdot H)} \text{ [m]} \quad (43)$$

$$\Delta l_w = 0,1 \text{ [m]} \quad (44)$$

Pro Jednoduchý model se používá mapovací funkce daná vztahem 45.

$$m(v) = \frac{1,001}{\sqrt{0,002001 + \sin^2(v)}} \quad (45)$$

Vztah pro výpočet velikosti troposférického zpoždění při použití Jednoduchého modelu je uveden vztahem 46 [9].

$$Trop_{rec}^{sat} = (\Delta l_d + \Delta l_w) \cdot m(v) \quad (46)$$

Niellův model je již více sofistikovanější a pro výpočet jsou využity dvě odlišné mapovací funkce. Jedna pro složku suchého vzduchu a druhá pro složku vodních par. Vztah pro výpočet velikosti troposférického zpoždění při použití Niellova modelu je uveden vztahem 47.

$$Trop_{rec}^{sat} = \Delta l_d \cdot m_d(v) + \Delta l_w \cdot m_w(v) \quad (47)$$

Nielovu mapovací funkci pro složku suchého vzduchu lze popsat vztahem 48.

$$m_d(v) = \frac{1 + \frac{a}{b}}{\sin(v) + \frac{1 + \frac{a}{b}}{1 + c}} + \left[\frac{1}{\sin(v)} - \left(\frac{1 + \frac{a_d}{b_d}}{\sin(v) + \frac{1 + \frac{a_d}{b_d}}{1 + c_d}} \cdot H \right) \right] \quad (48)$$

Koeficienty složky suchého vzduchu a_d , b_d , c_d jsou udány v tabulce pro zeměpisnou šířku 15, 30, 45, 60 a 75 stupňů [11]. H_o je ortometrická výška udávaná v kilometrech.

Nielovu mapovací funkci pro složku vodních par lze popsat vztahem 49.

$$m_w(v) = \frac{1 + \frac{a_w}{b_w}}{\sin(v) + \frac{1 + \frac{a_w}{b_w}}{1 + c_w}} \quad (49)$$

Koeficienty složky vodních par a_w , b_w , c_w jsou stejně jako pro parametry složky suchého vzduchu udány v tabulce pro zeměpisné šířky 15, 30, 45, 60 a 75 stupňů.

Více o Niellově modelu lze nalézt v [11].

Zhodnocení působení troposféry na GPS signály

Tato nejnižší vrstva atmosféry je poměrně stálá a její chování je závislé na poloze. U troposféry dochází pouze ke změně složky vodních par, která má vliv na celkové zpoždění maximálně do 10%. Díky blízkosti této vrstvy k povrchu Země a technické vyspělosti lidstva byla tato vrstva podrobena velkému množství experimentů a měření. Její chování je popsáno několika modely, které jsou schopny eliminovat její vliv na celkovou přesnost výpočtu polohy na minimum. Bez použití troposférického modelu se velikost zpoždění při zenitu pohybuje v rozmezí 2,3 až 2,6m na úrovni mořské hladiny. Velikost celkového zpoždění je stejně jako u ionosféry ovlivněno elevačním úhlem. S klesajícím elevačním úhlem se prodlužuje trajektorie GPS signálu a dochází tak k většímu zpoždění. Velikost chyby způsobené troposférou při výpočtu pseudovzdálenosti a za použití některého z troposférických modelů se při

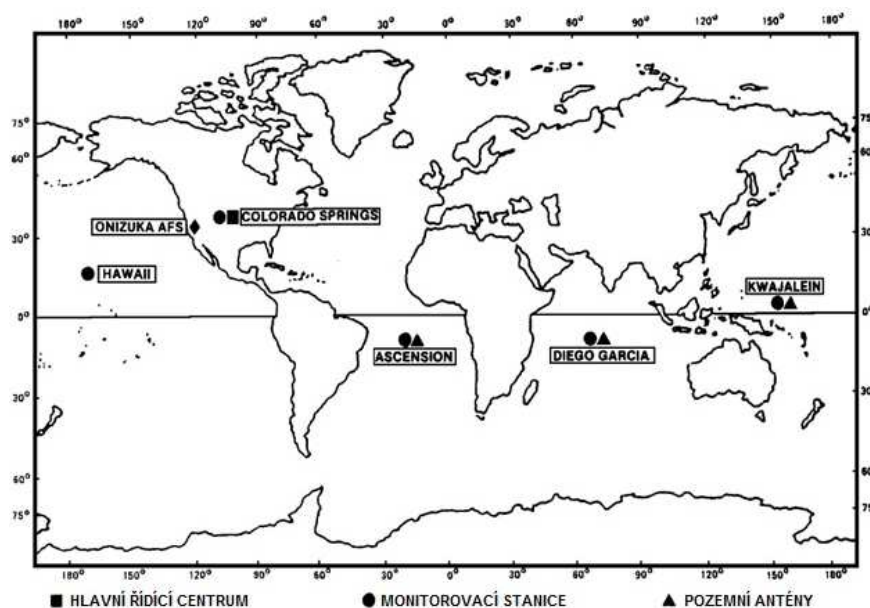
zenitu pohybuje obvykle v rozmezí 5 až 10 cm. Při elevačním úhlu 5° může velikost této chyby narůst až na desetinásobek, tedy na 50 až 100 cm [1], [2].

2.1.2 Vlivy způsobené nepřesnostmi korekčních parametrů v navigační zprávě

2.1.2.1 Predikce satelitního orbitu – chyba efemerid

Každý satelit se pohybuje po své definované dráze, tzv. orbitu. Vlivem gravitačních sil planet, například zemské, měsíční nebo sluneční a dalších objektů ve vesmíru, dochází k vychýlení satelitů ze svých orbitálních drah. Tyto posuvy jsou korigovány po určitém časovém období hlavním řídicím centrem, které získává informace o poloze satelitů z monitorovacích stanic. Tyto stanice nepřetržitě monitorují polohu satelitů s přesností asi jednoho metru. Korekce polohy satelitů se provádí pomocí korekčních motorů, které obsahuje každý satelit. Informace o orbitálních drahách všech satelitů jsou vysílány v navigační zprávě, jedná se o tzv. efemeridy.

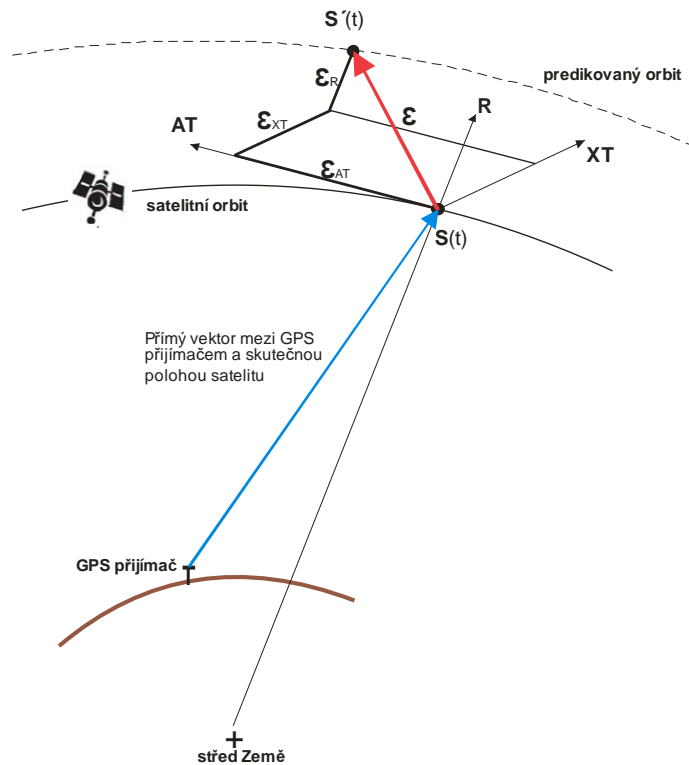
Na obrázku 14 je znázorněna poloha hlavního řídicího centra a monitorovacích stanic systému GPS. Hlavní řídicí centrum je v Americe, konkrétně v Colorado Springs. Monitorovací stanice, mezi které patří Ascension, Diego Garcia, Kwajalein a Hawaii jsou rozmístěny v rovníkové oblasti [1], [2].



Obrázek 14_Poloha hlavního řídicího centra a monitorovacích stanic_převzato s úpravami z [12]

Chyba vznikající rozdílem skutečné a predikované polohy satelitu je znázorněna na obrázku 15. Tuto chybu lze geometricky rozložit do tří ortogonálních směrů definovaných relativně k satelitnímu orbitu.

Bod $S(t)$ představuje skutečnou polohu satelitu v čase t , bod $S'(t)$ představuje odhadnutou polohu satelitu, která je uvedena v navigační zprávě. XT , AT a R jsou vertikální, horizontální a radiální osa. ϵ_{XT} , ϵ_{AT} , ϵ_R jsou chyby polohy satelitu rozložené do jednotlivých os - vertikální, horizontální a radiální. Parametr ϵ tak vyjadřuje chybu způsobenou nepřesnou predikcí satelitního orbitu.



Obrázek 15_Znázornění chyby při predikci polohy satelitu

Obecně lze říci, že tato chyba je nejmenší v radiálním směru. Vertikální a horizontální složka jsou vůči radiální složce mnohem větší. Tento fakt je dán složitostí sledování satelitů monitorovacími stanicemi v horizontální a vertikální ose, tak jak jsou tyto osy zobrazeny na obrázku 15.

Jak již bylo výše konstatováno, dochází k predikci polohy satelitů do té doby, dokud nejsou aktualizovány informace o přesné poloze satelitů, které jsou následně vysílány v navigační zprávě. Velikost chyby efemerid je závislá na délce časového období, po kterou dochází k predikci polohy. Efektivní velikost chyby způsobená chybou efemerid se při měření pseudovzdálenosti pohybuje přibližně okolo dvou metrů [1]. Nejnovější bloky satelitů označované IIF a IIR mají funkci tzv. autonavigačního módu, kdy v případě nemožnosti komunikace s řídicím segmentem mohou tyto satelity pomocí vzájemné komunikace korigovat svoji polohu [8].

2.1.2.2 Chyba atomových hodin

Každý satelit obsahuje atomové hodiny, které produkuje taktovací signál. Ve své podstatě se jedná o velice přesný a stabilní oscilátor. Taktovací signál je využíván dílčími elektronickými systémy satelitů a také je použit pro generaci vysílaného signálu. Druh atomových hodin se může lišit v závislosti na době vypuštění satelitu na oběžnou dráhu, tzv. bloků satelitů. Obvykle se používají rubidiové či cesiové atomové hodiny, v novějších blocích satelitů se používají výhradně cesiové atomové hodiny. Oscilační frekvence rubidiového oscilátoru je přibližně 6,83468 GHz a jeho frekvenční stabilita je v řádu 10^{-12} . Cesiový oscilátor je o něco přesnější a jeho oscilační frekvence je přibližně 9,19263 GHz, frekvenční stabilita se pohybuje v řádu 10^{-13} [2].

Při měření pseudovzdálenosti mezi přijímačem a satelitem dochází k násobení doby šíření signálu s rychlostí světla. Pro velmi přesné měření pseudovzdálenosti a odpovídající přesnosti výpočtu polohy je zapotřebí velmi přesné časové synchronizace mezi satelity. Pomocí monitorovacích stanic jsou sledovány atomové hodiny každého satelitu. V hlavním řídicím centru dochází k výpočtům korekčních parametrů odpovídajícím časovým odchylkám atomových hodin jednotlivých satelitů. Tyto korekční parametry jsou následně vysílány každým satelitem ve formě navigační zprávy. Z těchto parametrů následně dochází v přijímači k výpočtu časové korekce dle následujícího vztahu, který je uveden v [8].

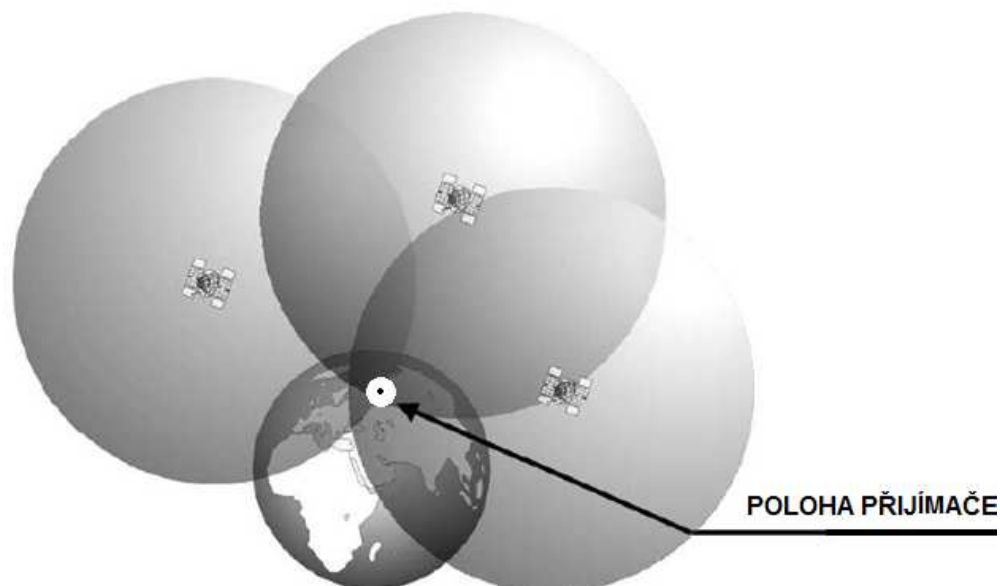
$$\delta t_{CLK} = a_{f0} + a_{f1}(t - t_{OC}) + a_{f2}(t - t_{OC})^2 + \Delta t_r \quad (50)$$

Kde a_{f0} odpovídá zkreslení atomových hodin, a_{f1} driftu atomových hodin, a_{f2} frekvenčnímu driftu (stárnutí) a Δt_r odpovídá korekci relativistického efektu.

I při použití korekcí atomových hodin uvedených v navigační zprávě stále přetrvává určitá chyba. Ta zhruba odpovídá dvou metrům při výpočtu pseudovzdálenosti. Velikost této chyby je závislá na časových intervalech aktualizací korekčních parametrů v navigační zprávě hlavním řídicím centrem a na bloku satelitů [1].

2.1.3 Vliv geometrického uspořádání satelitů vůči poloze přijímače

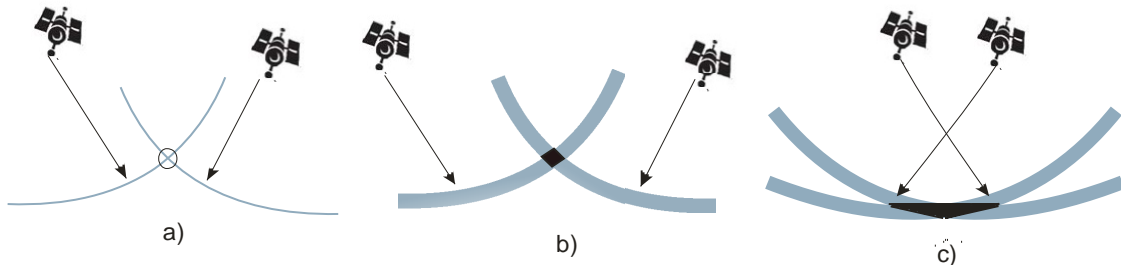
Jak již bylo uvedeno v první kapitole, princip, pomocí kterého se vypočítává přesná poloha přijímače je znám pod názvem multilaterace, dochází tak k průniku několika hyperboloidů a tím k vymezení polohy přijímače. Obrázek 16 zjednodušeně zobrazuje tento princip.



Obrázek 16_ Určení polohy přijímače_převzato s úpravami z [13]

Počet přijímaných signálů od satelitů je rozhodujícím faktorem ovlivňujícím celkovou přesnost výpočtu polohy přijímače. Čím větší počet signálů od satelitů přijímač získává, tím přesnější polohu má uživatel přijímače k dispozici. Tato skutečnost je však ovlivněna vzájemným geometrickým rozložením satelitů vůči přijímači. Geometrická závislost je vyjádřena tzv. parametrem DOP (Dilution of Precision).

Pro názornost je zde uveden obrázek 17, na kterém je možné pozorovat závislost rozložení satelitů na obloze vzhledem k přesnosti výpočtu polohy. Na obrázku 17a je ideální případ určení pozice, kdy dochází k průniku dvou kruhů v jednom bodě. Středem těchto kruhů jsou satelity. Druhý obrázek 17b zobrazuje reálnou situaci, kde nedochází k průniku kruhů v jednom bodě, ale v určité nejednoznačné oblasti. Na obrázku 17c je ten samý případ jako na obrázku 17b, avšak nejednoznačná oblast je zřetelně větší a je způsobena vzájemnou polohou satelitů.



Obrázek 17_Jednoduchý 2D příklad vlivu geometrického rozložení satelitů vůči přijímači

Parametr DOP ve své podstatě reprezentuje kvalitu řešení výpočtu polohy. Hlavním ovlivňujícím faktorem tohoto parametru je počet satelitů, z kterých je přijímán signál a poloha těchto satelitů vůči přijímači. Obecně lze říci, že čím je menší parametr DOP, tím přesnější a kvalitnější výsledek o poloze získáváme. Parametr DOP lze rozdělit na dílčí složky, které vyjadřují kvalitu určení polohy v určitém směru nebo velikost chyby, způsobenou nepřesností hodin přijímače. HDOP (Horizontal Dilution of Precision) vypovídá o kvalitě určení pozice v souřadnicích zeměpisné šířky a délky. VDOP (Vertical Dilution of Precision) určuje kvalitu vertikální složky, tedy přesnosti určení nadmořské výšky. Obě tyto složky mohou být charakterizovány jedním parametrem, označovaným jako PDOP (Position Dilution of Precision), který je dán následujícím vztahem 51.

$$PDOP = \sqrt{HDOP^2 + VDOP^2} \quad (51)$$

Jak je uvedeno v [1], bylo zjištěno, že velikost parametru HDOP je obecně menší jak VDOP. Parametr VDOP má tendenci zvyšovat svoji hodnotu, pokud přijímáme signály v polohách s větší zeměpisnou šířkou. Důvodem k tomu je to, že sklon GPS orbit je přibližně okolo 55° a tedy v polohách s větší zeměpisnou šířkou nemohou být satelity na zenitu vůči přijímači [1]. Lze tvrdit, že čím větší počet satelitních signálů používáme k výpočtu polohy, tím menší je parametr DOP. Za velmi příznivých podmínek z geometrického pohledu se DOP pohybuje mezi hodnotou 1 a 2, ve velmi nepříznivých podmínkách může dosahovat několika desítek [14]. Parametr DOP lze využít jako indikátor kvality výpočtu polohy.

2.1.4 Vlivy působící na GPS signály v okolí přijímače

2.1.4.1 Interference signálů

Signál na vstupu GPS přijímače je velice slabý, jeho výkon je přibližně 10^{-16} W. Jak bude dále popsáno, tato hodnota je dokonce menší než je výkon šumu v okolí přijímače. Z toho plyne, že před samotným zpracováním signálu si přijímač musí poradit s rozpoznáním přijímaných signálů. Mimo jiné se v okolním prostředí GPS přijímače mohou vyskytovat další elektromagnetická pole, která mohou ovlivňovat přijímané GPS signály, například signály v blízkosti frekvence GPS signálů nebo dokonce samotné GPS signály mezi sebou. Příkladem cizích elektromagnetických polí, které by mohli ovlivňovat GPS signály mohou být například letecké pozemní navigační systémy (DME, TACAN atd.), ostatní satelitní systémy, běžné televizní a rádiové vysílání, mikrovlnné spoje, radarové systémy atd. Rušivé elektromagnetické pole může být také vyvoláno uměle za účelem znemožnění příjmu signálů. Takovýto přístup se však obvykle využívá pro armádní účely, avšak tato možnost by měla být brána v potaz.

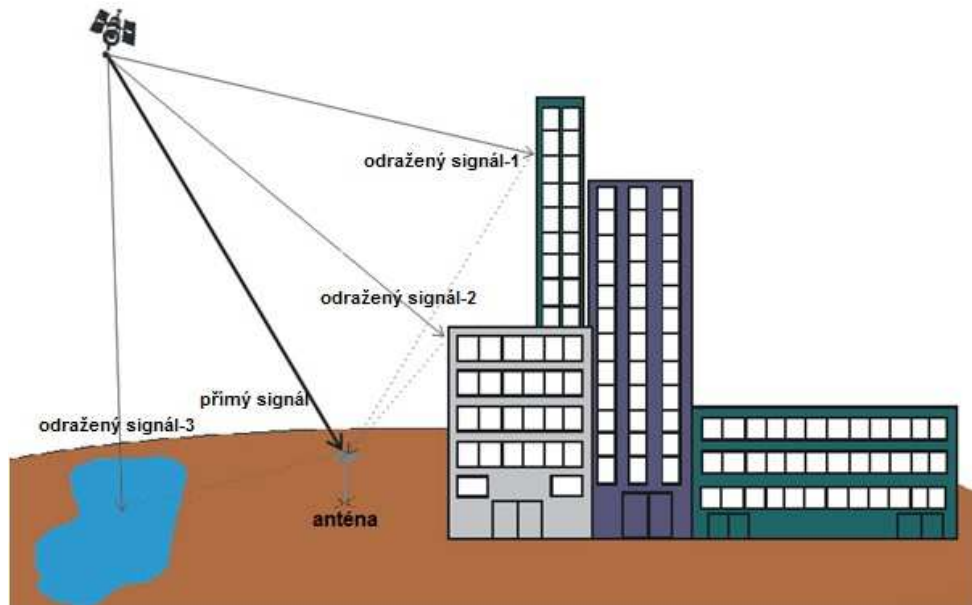
Cizí elektromagnetická pole vyvolaná výše uvedenými systémy nebo i dalšími musí splňovat určitá kritéria, která jsou obecně definována národními nebo mezinárodními normami. Obvykle je nutné dodržovat frekvenční pásma pro dány typ systému, vyzařovací výkon vysílačů, popřípadě intenzitu magnetického pole a klíčovací poměr.

Všechny výše zmíněné parametry mají rozhodující vliv na rušení. Dalším podstatným parametrem je vzdálenost mezi vysílačem elektromagnetického záření a GPS přijímačem. Velikost intenzity magnetického pole klesá přibližně dle vztahu $1/R^2$, kde R odpovídá vzdálenosti. Velký vliv na výslednou velikost rušení má také charakter interferenčního signálu. Tento charakter obecně popisuje parametr klíčovací poměr, který je definován jako podíl času, kdy vysílač vysílá na nosném kmitočtu, v rámci jedné hodiny. Zjednodušeně řečeno se jedná o to, zda jde o vysílání nepřetržité nebo impulzní.

U vysílačů, které pracují v pulzním režimu a mají trvání pulzu kratší v porovnání s datovým tokem GPS (20ms) a dále jejich klíčovací poměr je menší jak 10%, tak nedochází k problémům vlivem rušení, a to ani při vysokých vyzářených výkonech. Kontinuální rušení je obecně mnohem problematictější a vyjádření jeho vlivu na ostatní signály je závislé na konkrétních podmínkách [1], [2].

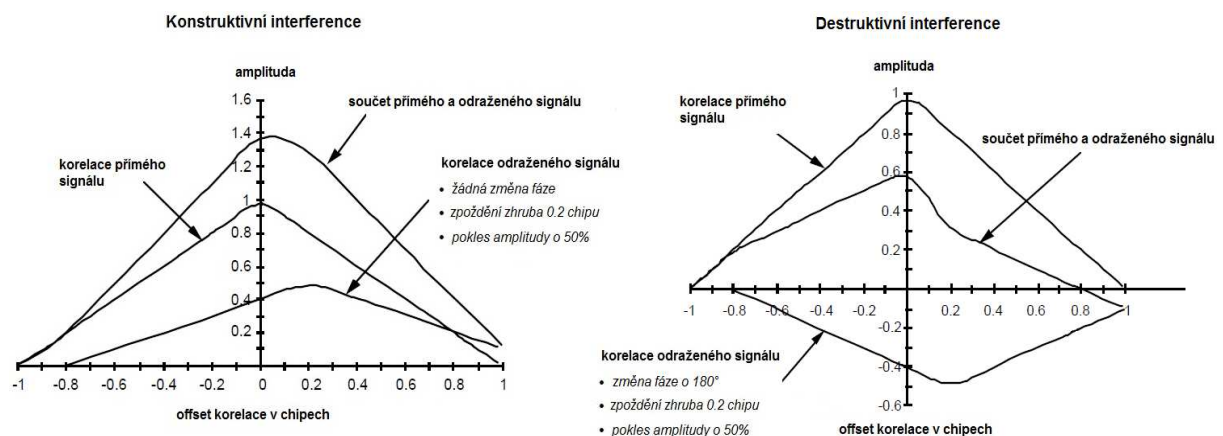
2.1.4.2 Mnohacestné šíření

Mnohacestné šíření je jev, kdy dochází k odrazům elektromagnetických vln od reflexních objektů v okolí přijímače, či k odrazům od země. Obvykle dochází v přijímači k příjmu signálu ze směru přímého vektoru mezi satelitem a přijímačem a dále signálů odražených, viz. obrázek 18. U odražených signálů dochází vlivem prodloužení trajektorie ke zpoždění. Dále také obvykle dochází k částečnému útlumu signálu změně jejich fáze a změně polarizace. Mnohacestné šíření ovlivňuje oba druhy měření, kódové i fázové.



Obrázek 18_Mnohacestné šíření – odrazy signálu od objektů

Ze satelitů GPS systému jsou signály vysílány s tzv. pravostrannou kruhovou polarizací, která se označuje zkratkou RHCP (Right Hand Circularly Polarized). Tato pravostranná kruhová polarizace se může při odrazu změnit na levostrannou kruhovou polarizaci označovanou zkratkou LHCP (Left Hand Circularly Polarized). Vliv na míru útlumu GPS signálů má jednak úroveň přímého signálu a jednak úroveň odražených signálů, které se v přijímači sčítají. Při změně fáze mezi přímým signálem a odraženými signály dochází k tzv. destruktivní interferenci a zeslabení dále zpracovávaného signálu, viz. obrázek 19 vpravo. K opačnému efektu může dojít tzv. konstruktivní interferencí, při které jsou všechny příchozí signály od téhož satelitu ve fázi a dochází tak k zesílení přijímaného signálu, viz. obrázek 19 vlevo.



Obrázek 19_Konstruktivní a destruktivní interference

Na kvalitu výpočtu pseudovzdálenosti má také vliv velikost zpoždění odraženého signálu. V přijímači dochází k autokorelaci každého z přijímaných signálů. Pokud je zpoždění příliš velké, přijímač dále tento signál nezpracovává a tím pádem nedochází ke zhoršení kvality výpočtu. Pokud jsou však signály odraženy od blízkých objektů, dochází k minimálním zpožděním, řádově desítky až stovky nanosekund, což již značně ovlivní přesnost výpočtu pseudovzdálenosti.

V určitých případech je nežádoucím vlivem mnohacestného šíření také pokles amplitudy odražených signálů. V případech příjmu velmi slabých signálů může docházet dokonce k nemožnosti zpracování takovýchto signálů. Obvykle jsou signály zeslabeny při odrazech či průchodech specifickým prostředím, které je schopno pohlcovat část energie elektromagnetických vln.

Zhodnocení působení mnohacestného šíření

Pro vyjádření velikosti chyby při výpočtu pseudovzdálenosti způsobené mnohacestným šířením je zásadní okolní prostředí přijímací antény. Velikost chyby je závislá na velikosti zpoždění mezi přímým a odraženým signálem, velikosti úrovně mezi těmito signály a rozdílu mezi jejich fázovými posuvy. Typická hodnota velikosti chyby při výpočtu pseudovzdálenosti v „příznivém“ prostředí se pohybuje okolo jednoho metru, v reflexním prostředí může být velikost chyby větší jak pět metrů [1], [4], [15].

2.1.5 Vliv šumu na vstupu GPS přijímače

Šum na vstupu přijímače představuje celkový souhrn všech zdrojů šumu, které nám negativně působí na kvalitu zpracování přijímaných GPS signálů. Tyto zdroje můžeme rozdělit do několika základních skupin - přírodně generované šумы, tepelné šумы, šумы vznikající působením dalších GPS signálů nebo odrazem přijímaných GPS signálů a také působením dalších satelitních nebo pozemních telekomunikačních systémů.

Neznalému člověku v oblasti telekomunikací by se mohl jevit vliv těchto šumů jako minimální, avšak je zapotřebí si uvědomit, že jsou GPS signály dost silně utlumeny při průchodu od satelitů k přijímači a mají většinou nižší výkonovou úroveň než šum, a tudíž nemohou být systémem rozpoznány a následně zpracovány. Příkladem bych uvedl L1 signál, který má na výstupu ze satelitu výkon okolo 27 wattů a na povrchu země má tentýž signál výkon něco okolo 10^{-16} wattu. Tato skutečnost odpovídá útlumu zhruba 158dBW.

Do skupiny přírodně generovaných šumů patří šумы vzniklé velkým třeskem, slunečním zářením nebo také generované Zemí či okolními planetami. Tepelné šумы vznikají v odporových strukturách součástek GPS přijímače při teplotách vyšších jak 0 kelvinu (-273,16°C). Další zmíněné skupiny jsou již velmi individuální a jejich vliv je velmi těžce predikovatelný. Pro následné zhodnocení vlivu šumů na výslednou přesnost výpočtu polohy bude, tak jak je tomu v telekomunikační technice zvykem, předpokládáno působení tzv. bílého šumu, pro který je charakteristická konstantní výkonová úroveň v celém frekvenčním spektru [1], [16].

Vyjádření šumového čísla a Friisovy formule

Šumový činitel dvojbranu F_S lze obecně definovat jako poměr signál/šum na vstupu a signál/šum na výstupu. Proměnné S_I , N_I představují signál a šum na vstupu a S_O a N_O na výstupu.

$$F_S = \frac{\frac{S_I}{N_I}}{\frac{S_O}{N_O}} \quad (52)$$

Zisk dvojbranu definujeme dle vztahu 53 následovně.

$$G = \frac{S_O}{S_I} \quad (53)$$

Dále můžeme přepsat výraz pro šumový činitel do tvaru dle vztahu 54.

$$F_S = \frac{N_O}{GN_I} \quad (54)$$

Šum na výstupu dvojbranu lze vyjádřit vztahem 55, kde N_A je šum přidaný dvojbranem.

$$N_O = N_A + GN_I \quad (55)$$

Pokud definujeme vstupní šum $N_I = kT_0B$, kde $k = 1,3806 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ je Boltzmannova konstanta, $T_0 = 290\text{K}$ je pokojová teplota, B je šířka frekvenčního pásma. Při úpravě a dosazení do vztahu 53, lze psát následující vztah 56.

$$F_S(T_0) = \frac{N_A + kT_0B}{kT_0B} = \frac{N_A}{kT_0B} + 1 \quad (56)$$

U šumové analýzy se obvykle také setkáváme s pojmem efektivní teplota, která je zde označena zkratkou T_E . Ta popisuje velikost příspěvku šumu od jednotlivých subsystémů. Závislost mezi T_E a T_0 při výpočtu šumového činitele je následující.

$$F_S(T_0) = 1 + \frac{T_E}{T_0} \rightarrow T_E = (F(T_0) - 1)T_0 \quad (57)$$

Pokud vyjádříme šumový činitel v decibelech, získáme tím tzv. šumové číslo označené **NF**.

$$NF = 10 \log F_S \quad (58)$$

Pro šum přidaný každým dvojbranem lze dále psát vztah 59, kde součin $k \cdot T_0 \cdot B$ představuje v kaskádě vstupní šum N_I .

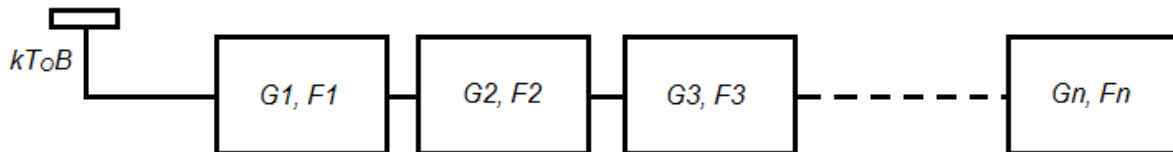
$$N_{An} = (F_n - 1)kT_0B \quad (59)$$

Pro výstupní šumový výkon kaskády N_0 lze nyní psát vztah 60.

$$N_0 = kT_0 B G_1 G_2 G_3 \dots G_n + N_{A1} G_1 G_2 G_3 \dots G_n + N_{A2} G_2 G_3 \dots G_n + \dots + N_{An} G_n a \quad (60)$$

Dosazením do vztahu 56 pro výpočet šumového činitele získáme tzv. Friisův vztah.

$$F_S(T_0) = \frac{N_0}{kT_0 B G_1 G_2 G_3 \dots G_n} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}} \quad (61)$$

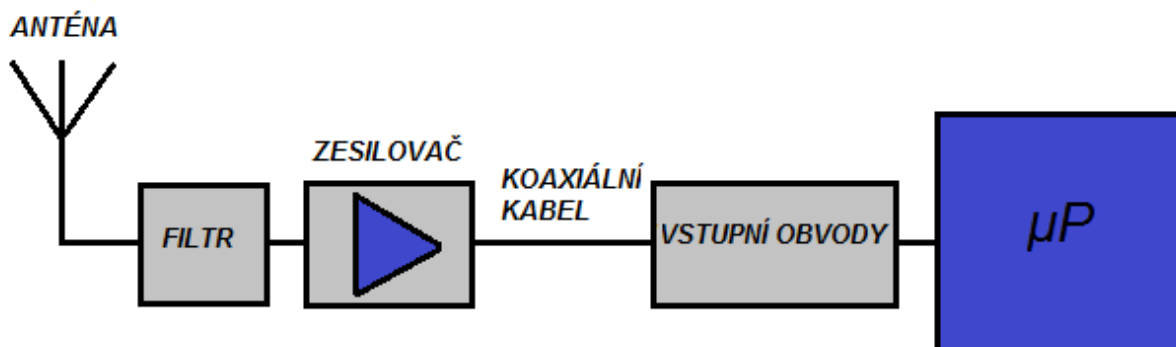


Obrázek 20_Kaskádní zapojení dvojbranů_vyjádření velikosti šumu

Rovnice a vzorce uvedené výše jsou převzaty z [17].

Šumová analýza GPS přijímače

Na obrázku 21 je obecné blokové schéma vstupní části GPS přijímače. Prvním prvkem v tomto schématu je anténa pro příjem GPS signálů, dále filtr odstraňující nežádoucí frekvenční složky a nízkošumový zesilovač. Obvykle jsou jak filtr, tak zesilovač umístěny přímo u antény. Následně mohou být před vstupem do procesoru zpracovávajícího přijímané signály umístěny vstupní obvody upravující signály do požadovaného tvaru. V celém řetězci jsou samozřejmě propojovací vodiče mezi jednotlivými bloky a také konektory spojující některé z těchto bloků.



Obrázek 21_Blokové schéma vstupní části GPS přijímače

Vzhledem k šumové analýze musí být každý prvek blokového schématu charakterizován svým výkonovým ziskem a šumovým číslem. V tabulce 1 jsou uvedeny hlavní subsystemy vstupní části GPS přijímače, které mají rozhodující vliv na výslednou velikost šumu. Mimo výše zmíněné jsou v tabulce 1 uvedeny typické parametry těchto subsystemů. Typická hodnota anténní teploty T_A se dle literatury [1] pohybuje v rozmezí 75 - 130K, pro následující analýzu jsem zvolil hodnotu 100K.

Tabulka 1_ Typické parametry hlavních zdrojů šumu na vstupu GPS přijímače_převzato z [1]

	Vstupní kabel a filtr(1)	Zesilovač(2)	Kabel za zesilovačem(3)
Výkonový přenos G	0,8 ≈ -1dB	100 = 20dB	0,1 = -10 dB
Šumový činitel F (šumové číslo NF)	1,26 (1dB) - útlum	2 (3dB) - specifikace výrobcem	10 (10dB) - útlum
Efektivní teplota T_E	75,4K	290K	2610K

Efektivní teplota pasivních prvků v kelvinech (vstupní kabel a filtr, kabel za zesilovačem) lze vyjádřit vztahem 62, kde G odpovídá výkonovému přenosu.

$$T_E = \left(\frac{1-G}{G}\right) \cdot 290 \quad (62)$$

Výpočet celkové tepoty vstupní části GPS přijímače lze provést dle následující rovnice 63.

$$\begin{aligned} T_{celkova} &= T_A + T_{kabfiltr} + T_{zesil} + T_{kabel} = 100 + T_{E1} + \frac{T_{E2}}{G_1} + \frac{T_{E3}}{G_1 G_2} = \\ &= 100 + \left(\frac{1-G_1}{G_1}\right) \cdot 290 + \frac{(F_2-1)}{G_1} \cdot 290 + \frac{\left(\frac{1-G_3}{G_3}\right) \cdot 290}{G_1 G_2} \\ &= 100 + \left(\frac{1-0,8}{0,8}\right) \cdot 290 + \frac{(2-1)}{0,8} \cdot 290 + \frac{\left(\frac{1-0,1}{0,1}\right) \cdot 290}{0,8 \cdot 100} = 567,625 [K] \end{aligned} \quad (63)$$

Následně lze napsat vztah pro výstupní šumový výkon vyjádřený v decibelech - výkonová hustota šumu:

$$\begin{aligned} N_0 &= 10 \log_{10}(k \cdot T_{celkova}) = 10 \log_{10}(1,3806 \cdot 10^{-23} \cdot 567,625) \\ &\approx -201,06 [dBW/Hz] \end{aligned}$$

Výkonová hustota šumu typického GPS přijímače se pohybuje okolo hodnoty -201 dBW/Hz.

Souvislost mezi výkonovou úrovní šumu a úrovní příchozích signálů

Nejprve je nutné uvést, že výkonová úroveň L1 C/A signálů se pohybuje v rozmezí -162,5 dBW až -154,5 dBW v závislosti na vzájemné poloze satelitu a přijímače. Čím je satelit vzdálenější od přijímače, tím menší úroveň signálu přijímáme. Hodnota -154,5 dBW odpovídá příjmu signálu při zenitu a hodnota -162,5 dBW při úhlu 5° [1].

Pro vyjádření souvislosti mezi výkonovou úrovní příchozího signálu a šumu se obvykle využívá jejich poměru, který je označován jako **SNR** (Signal to Noise Ratio). V literatuře se lze také setkat s označením **C/N₀** (Carrier to Noise density ratio), který vyjadřuje poměr výkonových hustot signálu a šumu. Pokud například přijímáme signál o výkonové úrovni -160dBW a výkonová hustota šumu je -201dBW/Hz vychází $C/N_0 = 41\text{dB/Hz}$.

Zhodnocení působení šumu

Šum na vstupu GPS přijímače ovlivňuje především tzv. sledovací smyčku, která slouží k sledování satelitních signálů. Hodnota parametru C/N₀ určuje, jak kvalitně sleduje sledovací smyčka satelitní signály a tudíž určuje přesnost kódového a fázového měření. Více lze nalézt například v [1], [16]. Velikost chyby způsobené šumem se mění v závislosti na úrovni přijímaného signálu, který je proměnlivý v závislosti na vzájemné poloze satelitu a přijímače. Obvyklá velikost chyby způsobená šumem na vstupu přijímače při výpočtu pseudovzdálenosti se pohybuje okolo půl metru. Podstatným omezujícím faktorem z pohledu působení šumu je první člen v kaskádním zapojení, viz. vztah 60. Z tohoto důvodu je vhodné umístit co nejbližší k anténě předzesilovač s co největším zesílením.

2.2 Shrnutí vlivů působících na GPS signály

<u>Zdroj chyb</u>	<u>Vliv na nepřesnost určení polohy</u>	<u>Ovlivňující faktory</u>
<i>Ionosférické zpoždění</i>	Zpoždění při zenitu \approx několik metrů; zpoždění při nízkém elev. úhlu až 30 metrů; v extrémních případech úplný útlum signálů; při použití ionosférického modelu 1-10 metrů	Zeměpisná šířka, elevační úhel, solární aktivity, geomagnetické poruchy, střídání dne s nocí
<i>Troposférické zpoždění</i>	Zpoždění při zenitu \approx 2,3 - 2,6m, 5-10cm s troposférickým modelem	Zeměpisná šířka (množství srážek), nadmořská výška, elevační úhel, teplota, tlak, vlhkost
<i>Chyba efemerid</i>	Přibližně 2 metry	Kvalita odhadu parametrů efemerid řídicím centrem, časové období mezi aktualizacemi parametrů v navigační zprávě
<i>Nepřesnost atomových hodin</i>	Přibližně 2 metry (desítky kilometrů)	Časové období mezi aktualizacemi dat v navigační zprávě (bez použití korekcí při výpočtu)
<i>Šum na vstupu přijímače</i>	0,25 - 0,5m	Výkonová úroveň přijímaného signálu (elevační úhel), první prvek za anténou ve schématu
<i>Interference</i>	Ztráta signálu – nemožnost výpočtu polohy	Výkonová úroveň rušivého signálu, klíčovací poměr
<i>Mnohacestné šíření</i>	nepříznivé prostředí asi 5m, velmi nepříznivé prostředí >5m	Okolní prostředí (množství objektů s vysokou reflexivitou pro GPS signály)
<i>geometrické uspořádání satelitů vůči přijímači</i>	Jednotky až desítky metrů (závislé na velikosti parametru DOP)	Zeměpisná šířka, vzájemná poloha satelitů a přijímače, množství přijímaných signálů od satelitu (počet satelitů)

3. Metodika záznamu GPS raw dat

V této kapitole jsou uvedeny navržené metodiky záznamu GPS raw dat, které obsahují vlivy způsobující chybu při výpočtu polohy. Konkrétně se jedná o metodiku měření maskování satelitních signálů, atmosférických vlivů, mnohacestného šíření, nestálosti atomových hodin a šumu. Je zde také popsán použitý měřicí systém a postup zpracování naměřených dat.

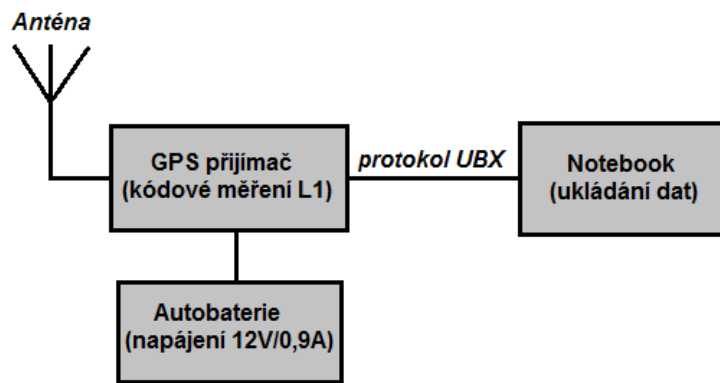
3.1 Popis měřicího systému

Hlavní součásti měřicího systému jsou GPS přijímač s anténou, autobaterie napájecí přijímač, notebook a stativ. Použit je GPS přijímač od firmy ublox, konkrétně GPS set *ANTARIS™ EvalKit* [18]. Ten umožňuje měřit GPS raw data L1 C/A signálu maximálně od 16 satelitů s maximální frekvencí záznamu dat 4Hz. Při praktickém měření bude frekvence záznamu dat nastavena na 1 sekundu. Pro příjem signálů je použita patch anténa. K GPS setu je dále dodáván program *u-center AE*, pomocí kterého je možné ukládat data a provádět jejich analýzu jak v online módu, tak v offline módu. Komunikace s přijímačem probíhá pomocí protokolu *NMEA 0183* nebo protokolu *UBX Binary Protocol*, který je specifický pro moduly společnosti *u-blox*. U praktického měření bude využit *UBX Binary Protocol*. Na obrázku 22 je zobrazeno měřicí stanoviště pro statický případ, obrázek 23 zobrazuje umístění patch antény na automobilu pro dynamický případ testování. Na obrázku 24 je znázorněno blokové schéma měřicího systému.



Obrázek 22_ Měřicí systém v terénu při měření statických případů

Obrázek 23_ Umístění antény na automobilu při měření dynamických případů



Obrázek 24_Blokové schéma měřicího systému

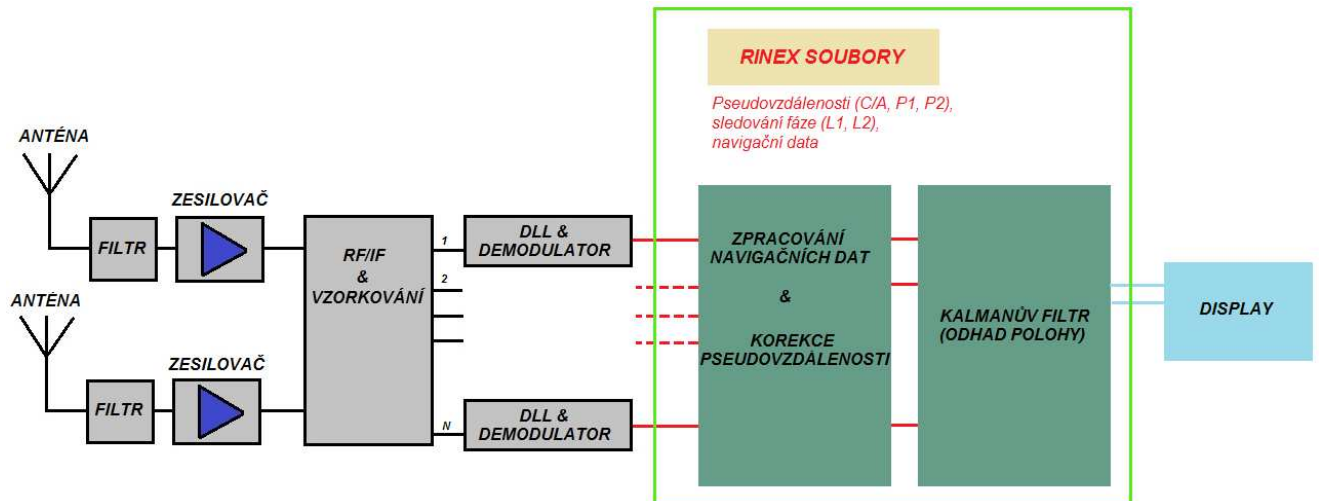
Pro vyhodnocení většiny analyzovaných vlivů je použit sofistikovaný nástroj pro analýzu GNSS dat gLAB, kde je možné provádět jednak výpočet některých parametrů z naměřených dat a dále vyhodnocení působících vlivů vzhledem k přesnosti výpočtu polohy. Níže následuje popis softwarového zpracování vstupních GPS raw dat a postup jejich vyhodnocení pomocí softwaru gLAB.

Softwarové zpracování vstupních dat

Vzhledem k potřebě získávat z přijímače pouze raw data, je nezbytné rekonfigurovat přijímač tak, aby generoval samotné měření pseudovzdálenosti a efemeridy satelitů. Z přijímače se budou do paměti ukládat data přes sériový port ve formátu UBX protokolu. Konkrétně zprávy UBX/RXM/RAW - kódové měření vzdálenosti, fázové měření, měření Dopplerova jevu a dále zprávy UBX/RXM/SFRB - almanach a efemeridy.

Jak již bylo výše zmíněno, pro následné zpracování dat a provedení výpočtů byl jako vhodný nástroj zvolen software gLAB [19]. Ten je interaktivním vzdělávacím nástrojem pro zpracování a analýzu GNSS dat. Umožňuje zpracovávat vstupní data ve formátu RINEX, SINEX, ANTEX a dalších. Díky němu je možné provádět předzpracování dat jako je například decimace, nastavení elevační masky, technika vyhlazení pseudovzdálenosti a další. Dále umožňuje využití některých korekčních parametrů při výpočtu pseudovzdálenosti, například použití troposférických či ionosférických modelů, korekce relativistického efektu, korekce offsetu satelitních hodin a další. Výstup ze softwaru gLAB je zprostředkován buď v grafické podobě nebo jako textový dokument obsahující v jednotlivých sloupcích některé parametry. Ty jsou dále použity pro následnou analýzu provedenou v softwaru Matlab [20].

Na obrázku 25 je zeleně orámována oblast působení programu gLAB. Ten pracuje za korelátorů a zpracovává vstupní data v podobě kódového měření, fázového měření, měření Dopplerova jevu a dále dat, která jsou obsažena v navigační zprávě. RINEX [21] je standardizovaný formát, v kterém jsou například poskytována data GPS měřicími stanicemi.



Obrázek 25_Oblast softwarového zpracování vstupních dat programem gLAB

Vzhledem k ukládání naměřených dat ve formátu UBX a posléze jejich možného zpracování pomocí softwaru gLAB, bylo zapotřebí provést převod těchto dat do formátu RINEX. Konkrétně se jedná o soubory RINEX observation file (měření přijímače) a RINEX navigation file (almanach, efemeridy). Za účelem převodu naměřených dat do formátu RINEX observation file byl použit SW-nástroj TEQC [22], který umožňuje převádět data ze specifických formátů výrobců GNSS přijímačů. V případě souborů RINEX navigation file, které mají globální platnost, bylo využito externího zdroje v podobě americké národní geodetické správy NGS (National Geodetic Survey) [23].

3.2 Metodika záznamu dat ovlivněných maskováním

Pojem maskování signálů představuje nemožnost průchodu signálů vlivem okolního prostředí. Může to být například vliv terénu, vliv okolních objektů nebo husté vegetace. Pokud dochází v určitém prostředí k maskování některých satelitních signálů, tak se to jistě projeví zvětšením parametru DOP. V případě, že dojde k maskování většiny satelitních signálů je velice pravděpodobné, že výpočet polohy nebude moci být proveden, což má přímý dopad na dostupnost navigační služby.

V ČR je železniční prostředí jako takové velice rozmanité, tratě v mezistaničních úsecích jsou velmi často lemovány hustým porostem či obklopeny skalisky. Ve stanicích a většinou v jejich blízkém okolí se nachází větší množství budov a rozmanitých objektů. Proto je nezbytné provést praktické měření maskování satelitních signálů ve výše zmíněných oblastech.

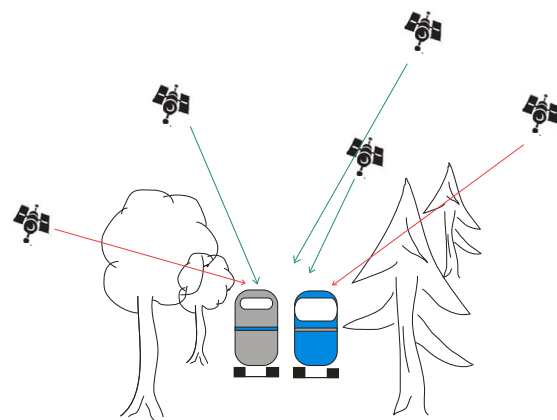
Minimálním požadavkem při měření maskování je použití GPS přijímače měřícího C/A kód na frekvenci L1 s dostatečným počtem kanálů pro příjem všech dostupných satelitních signálů. Množství dostupných signálů je závislé na zeměpisné šířce a délce [1]. V oblasti střední Evropy bude dostatečné použít 12-ti kanálový přijímač.

Při tomto měření bude primárně vyhodnocováno množství použitelných satelitních signálů pro výpočet polohy a vliv okolního prostředí na samotný příjem signálů. Dále bude proveden rozbor časových období, kdy bude docházet k případům nemožnosti výpočtu polohy. Následně bude také vyhodnocen vliv prostředí na výslednou přesnost výpočtu polohy.

Měření GPS raw dat pro statický případ měření maskování bylo zvoleno tak, že měření bude provedeno třikrát po sobě v celkové délce tří hodin, každé měření po dobu jedné hodiny. Proto, aby byl pokryt téměř celý 12-ti hodinový úsek, bude mezi jednotlivými měřeními časová prodleva přibližně tři hodiny. 12-ti hodinový úsek je zvolen proto, že satelity během této doby oběhnou jednou kolem Země. Omezujícím faktorem pro toto měření je kapacita baterie v notebooku, která i při nastavení úsporného režimu vydrží maximálně jednu hodinu, a proto byla doba měření zvolena právě na jednu hodinu.

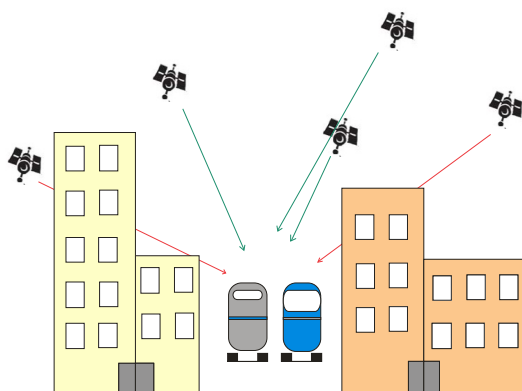
V dynamickém případě je zapotřebí vhodně vybrat měřený úsek s ohledem na jeho délku a co největší stejnorodost okolního prostředí tratě, tak aby výsledky měření byly co nejvíce konzistentní. Měření bude provedeno se stejným časovým rozložením jako u statického případu, avšak nebude docházet k měření po dobu 1 hodiny, ale pouze k dvojnásobnému měření tratě tam a zpět.

Prvním zvoleným měřicím stanovištěm pro statický případ měření maskování je trať, v jejímž okolí je hustý lesní porost, který dosahuje do výšky zhruba 15 až 20 metrů. Na obrázku 26 je pro názornost zobrazeno takovéto místo. Červenými šipkami jsou vyznačeny signály, u kterých se předpokládá působení vlivu maskování.

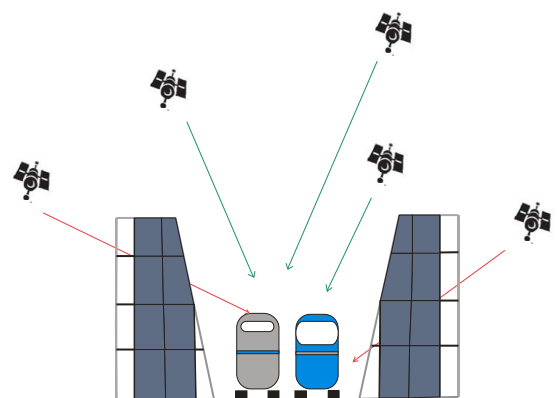


Obrázek 26_Lesní porost v okolí tratě

Druhým měřicím stanovištěm je trať obklopena větším množstvím objektů, převážně vyšších budov, viz. obrázek 27. Tento případ je typický pro tratě, které procházejí městy, nebo jsou součástí továrních komplexů. Další oblastí, kde lze předpokládat vliv maskování, je úsek na trati s tzv. zářezem, viz. obrázek 28. Zde lze předpokládat především vliv maskování signálů od satelitů na nízkých elevačních úhlech.

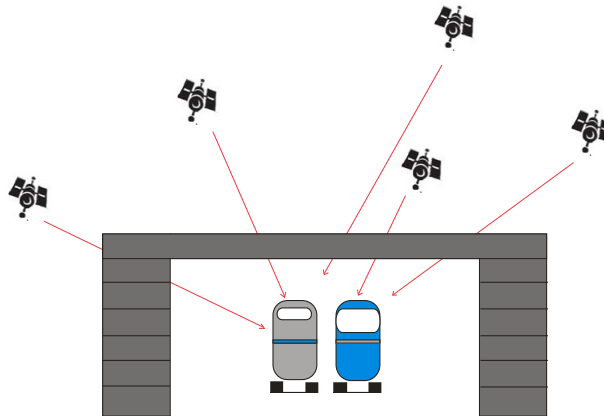


Obrázek 27_Budovy v okolí tratě



Obrázek 28_Zářez na trati

Poslední testovanou oblastí, kde lze předpokládat vliv maskování, jsou mosty, které jsou umístěny nad tratí, a které zamezují průchodu satelitních signálů, viz. obrázek 29.



Obrázek 29_Most nad tratí

Vzhledem k možnosti komparativní analýzy a vyhodnocení naměřených dat, musí být provedeno měření v oblasti s co největším možným příjmem signálů ze satelitů a minimálním ovlivněním vlivy jako je například mnohacestné šíření. V této oblasti by měl tedy především být volný výhled na oblohu a minimální počet okolních objektů.

V dynamickém případě měření maskování satelitních signálů jsou zvoleny stejné lokace, tak jako je tomu u výše uvedených statických případů měření maskování. Rychlost jízdy vlaku, na kterém je umístěn GPS přijímač, by měla být při každém měření pokud možno co nejvíce podobná, tak aby mohla být následně provedena analýza naměřených dat se stejným charakterem. S ohledem na následující analýzu naměřených dat je zapotřebí mít nastavenou stejnou dobu záznamu a ukládání GPS raw dat na přijímači pro všechna provedená měření.

3.3 Metodika záznamu dat ovlivněných mnohacestným šířením

Pro vyhodnocení mnohacestného šíření je zapotřebí použít přijímač, který umožňuje jak kódové, tak fázové měření signálů L1 a L2. Z teoretických předpokladů vzniku mnohacestného šíření byly vytipovány vhodné lokace. Měření bude provedeno ve 2 lokacích, první z nich je oblast vlakové stanice a druhá lokace je oblast vlakového seřadiště. S odkazem na provedená měření v [15] a [24] budou vyhodnocovány změny v přesnosti výpočtu polohy vzhledem k měnícím se elevačním úhlům satelitů, od kterých přicházejí signály. Měření bude stejně časově rozvrženo jako tomu je u měření maskování satelitních signálů v podkapitole 3.2.

Kódové měření lze vyjádřit rovnicí 13, která je doplněna o chybu způsobenou mnohacestným šířením při kódovém měření M_{C1} .

$$C_{1rec}^{sat} = \rho_{rec}^{sat} + c(dt_{rec} - dt^{sat}) + rel_{rec}^{sat} + Trop_{rec}^{sat} + Ion_{rec}^{sat} + \varepsilon_S + M_{C1} \quad (64)$$

Fázové měření lze vyjádřit následujícím vztahem 65, M_{L1} je chyba způsobená mnohacestným šířením při fázovém měření.

$$L_{1rec}^{sat} = \rho_{rec}^{sat} + c(dt_{rec} - dt^{sat}) + rel_{rec}^{sat} + Trop_{rec}^{sat} - Ion_{rec}^{sat} + \varepsilon_S + M_{L1} \quad (65)$$

Pokud provedeme matematickou úpravu tak, že od kódového měření odečteme fázové měření, získáme následující vztah 66.

$$C_{1rec}^{sat} - L_{1rec}^{sat} = 2Ion_{rec}^{sat} + M_{C1} + \varepsilon_S \quad (66)$$

Kde v rovnici 65 zůstává pouze přítomna chyba způsobená ionosférickým zpožděním, kterou lze minimalizovat pomocí měření L1 a L2 a algoritmu uvedeného vztahem 32, dále chyba způsobená mnohacestným šířením při kódovém měření a chyba způsobená šumem přijímače. Následně lze při předpokladu určité velikosti chyby způsobené šumem přijímače, viz. podkapitola 2.1.5, odhadnout vliv mnohacestného šíření na kódové měření.

Důležité z pohledu použití této metody je její funkčnost pouze v případech, kdy nedochází k tzv. "cycle slips" ve fázovém měření. Nicméně tyto poruchy lze při tomto měření detekovat a následně opravit. Pro fázové měření je zapotřebí nastavit určitý práh změřených hodnot tak, že při jeho překročení dochází s určitou pravděpodobností k "cycle slip". Poté je nutné provést úpravu nastavení výsledku měření tak, že následnému vzorku, při které je detekován "cycle slip" bude přiřazena hodnota předcházejícího vzorku, a to o celistvý násobek vlnové délky měřeného signálu [15], [24].

3.4 Metodika zobrazení atmosférických vlivů

Vyhodnocení atmosférických vlivů bude provedeno nepřímou metodou, kdy na změřená data budou aplikovány používané atmosférické korekční modely. Analýza bude zaměřena především na kvalitativní zhodnocení jednotlivých atmosférických modelů při výpočtu polohy. K vyhodnocení je zapotřebí použít GPS raw data, která budou moci být následně převedena do RINEX formátu a nebo data, která jsou již v RINEX formátu.

3.4.1 Metodika vyhodnocení ionosférického zpoždění

Pro vyhodnocení vlivu ionosférického zpoždění na přesnost výpočtu polohy budou použita data v RINEX formátu z externího zdroje v podobě referenční stanice NGS a dále data, která byla naměřena firmou AŽD Praha s.r.o.. U obou měřících stanovišť je volný výhled na oblohu a minimální počet okolních objektů.

Vliv ionosférického zpoždění bude analyzován tak, že nejprve vstupní data nebudou nijak korigována a poté bude použit korekční model - Klobucharův a v poslední řadě bude provedena eliminace vlivu ionosférického zpoždění pomocí měření L1 a L2 a algoritmu v podobě vztahu 32. Délka doby měření a tedy i odpovídající počet vzorků bude pro oba případy totožný. Dalším objektem zkoumání bude vliv korekčního modelu na přesnost výpočtu polohy přes den a v noci. Výsledky budou zobrazeny pomocí grafické závislosti horizontální a vertikální chyby v prostoru.

3.4.2 Metodika vyhodnocení troposférického zpoždění

Pro vyhodnocení vlivu troposférického zpoždění na výsledné určení polohy budou použita totožná data jako v případě vyhodnocení ionosférického zpoždění.

Analýza bude provedena pomocí komparace vlivu jednotlivých korekčních troposférických modelů a bez použití jakýchkoliv korekcí na přesnost výpočtu polohy.

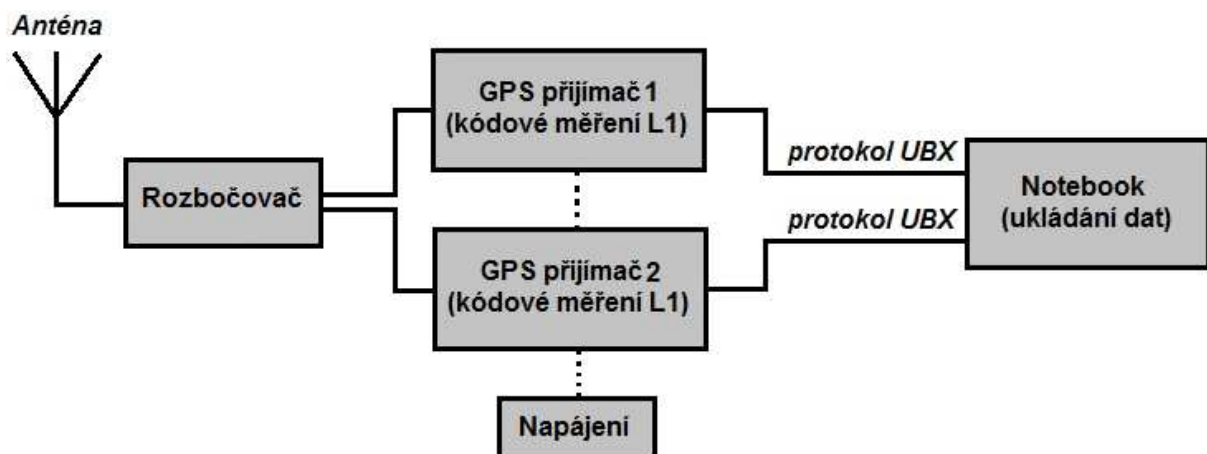
Mezi použité korekční modely patří tzv. Jednoduchý troposférický model a Niellův troposférický model. Následně bude proveden rozbor korekčních schopností těchto modelů pro meteorologické případy jako je déšť, sníh nebo slunečno. Výsledky budou zobrazeny pomocí grafické závislosti horizontální a vertikální chyby v prostoru.

3.5 Metodika zobrazení nestálosti atomových hodin

Stejně jako u předchozích podkapitol 3.4.1 a 3.4.2 jsem i u této metodiky použil stejná data. Vliv nestálosti atomových hodin bude analyzován tak, že se provede komparace dat. V prvním případě budou na vstupní data aplikovány korekce, který jsou obsaženy v navigační zprávě, viz. podkapitola 2.1.2.2 a v druhém případě data nebudou nijak korigována. Výsledky budou opět zobrazeny pomocí grafické závislosti horizontální a vertikální chyby v prostoru.

3.6 Metodika měření šumu GPS přijímačů

Pro vyjádření velikosti chyby způsobené šumem přijímače při výpočtu pseudovzdálenosti, viz. rovnice 13, je zapotřebí využít dvou totožných GPS přijímačů. Signál do těchto přijímačů je přiveden přes rozbočovač ze společné antény, která může být umístěna na libovolném místě s příjmem signálů alespoň od 4 satelitů. Na anténu tak působí stejné vlivy, jako například rozložení satelitů na obloze, mnohacestné šíření atd. Jediným faktorem, který může působit na přijímače rozdílně je velikost útlumu na cestě mezi rozbočovačem a přijímači. S ohledem na minimalizaci tohoto faktoru je zapotřebí použít stejné propojovací kabely, co se konstrukčního provedení a délky týče. Na obrázku 30 je zobrazeno měřicí schéma.



Obrázek 30_Blokové schéma měřicího systému při měření šumu

Pro měření budou použity totožné přijímače ve stejné konfiguraci a totožný převod dat tak, jako je popsáno výše v podkapitole 3.1. Doba, po kterou bude probíhat měření je odvozena od počtu satelitních signálů. Pro vyjádření velikosti chyby s jistou pravděpodobností předpokládám, že bude dostatečné množství 200 000 vzorků. To znamená, že při minimálním počtu satelitů (4) bude zapotřebí měřit po dobu alespoň 50000s (s jistou rezervou cca 14hodin).

V následujícím kroku budou vygenerovány pomocí softwaru gLAB změřené pseudovzdálenosti mezi přijímačem a satelity v daných časových epochách. Dále bude provedeno porovnání velikostí pseudovzdáleností mezi přijímači, které by měly být rozdílné právě o velikost způsobenou šumem - $|\varepsilon_S|$.

4. Vyhodnocení naměřených dat

V této kapitole jsou uvedeny základní informace o naměřených datech. Dále je zde výpočetně a graficky provedeno vyhodnocení naměřených dat. Na konci každé podkapitoly je provedeno zhodnocení dopadu působícího vlivu na přesnost výpočtu polohy a na dostupnost navigační služby.

4.1 Vyhodnocení vlivu maskování satelitních signálů

U všech uvedených měřících případů v této podkapitole byly na data aplikovány korekce offsetu atomových hodin, korekce vlivu pohybu satelitu během doby šíření signálu k přijímači, korekce vlivu rotace Země během doby šíření signálu a korekce relativistického efektu.

4.1.1 Statické případy

U všech níže uvedených případů měření jsem postupoval dle metodiky popsané v kapitole 3.2. Popis všech měřících stanovišť je uveden v příloze A. Vzhledem k posouzení vlivů z bezpečnostního hlediska, jsou u všech případů grafická zobrazení těch měření, u kterých působí analyzované vlivy nejnepříznivěji.

Při analýze dat byl zjištěn drobnější problém se softwarem gLAB. Při interních výpočtech softwaru nejsou z neznámého důvodu zahrnuty první 3 vzorky ze vstupních souborů.

1) Volný výhled na oblohu s minimálním množstvím okolních objektů

Popis měřícího stanoviště je uveden v příloze A, konkrétně strana 1. Vzhledem k účelu provést měření na místě s volným výhledem na oblohu a minimem okolních objektů bylo zvoleno měřící stanoviště na střeše budovy společnosti AŽD Praha s.r.o., konkrétně Žirovnická 3146/2 Praha 10. V tabulce 2 jsou uvedeny základní údaje o provedených měřeních. Poloha antény je v souřadném systému ECEF [3972541.6, 1026722.1, 4867206.3] metrů.

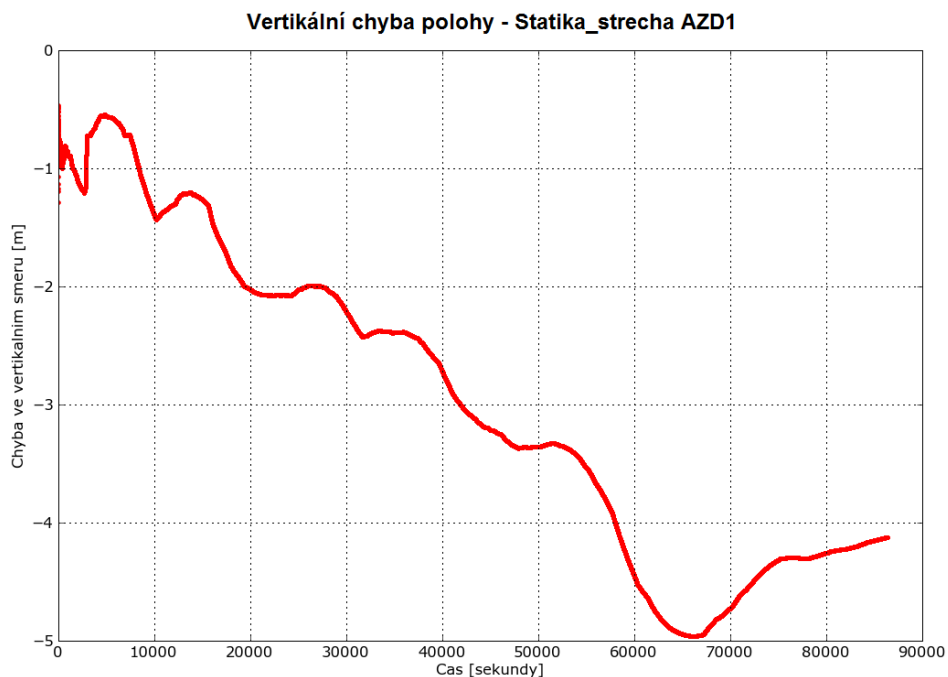
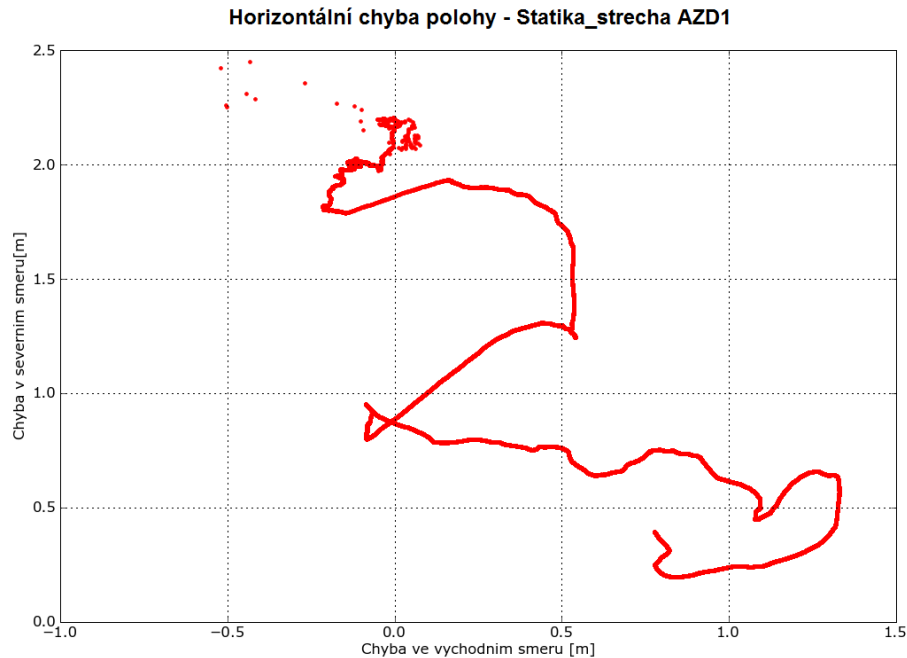
Tabulka 2_Naměřená data - Statika_Střecha AŽD

Název souboru	Statika_Strecha AZD1	Statika_Strecha AZD2
Velikost souboru [kB]	403545	404598
Datum měření	12.11.2011	13.11.2011
Začátek měření	0:00	0:00
Konec měření	23:59	23:58
Celkový počet vzorků*	86400	86399
Počet vzorků (výpočet 3D polohy)	86397	86396

* zjištěno z rozdílu začátku a konce měření (RINEX observation file)

S procentuálním zastoupením téměř 90% byla u obou provedených měření vypočítávána 3D poloha z 8 až 11 satelitních signálů. Jak je patrné z tabulky 2, nedošlo po dobu téměř 2 dnů k žádnému výpadku signálu a tudíž bylo ve 100% celkové doby měření možné provádět výpočet 3D polohy.

Na grafu 1 je možné pozorovat velikost horizontální chyby polohy při měření po dobu téměř 24 hodin. Velikost chyby ve východním směru je menší jak 2 metry, velikost chyby v severním směru je menší jak 2,5 metru. Graf 2 zobrazuje závislost velikosti chyby ve vertikálním směru (změna nadmořské výšky) na čase. Velikost chyby ve vertikálním směru nepřesahuje opět po dobu téměř 24 hodin hodnotu 5 metrů.



2) Hustý lesní porost v okolí železniční tratě

Popis měřicího stanoviště je uveden v příloze A, konkrétně na straně 1 a 2. Z důvodu neznalosti přesné polohy měřicího stanoviště (antény) nemohlo být provedeno u analyzovaných dat vyjádření velikosti chyby v prostoru jako je tomu u prvního případu. Místo toho je vyjádřen pouze rozptyl vypočtených hodnot polohy v prostoru. Tento přístup byl zvolen s ohledem na dostupné technické vybavení.

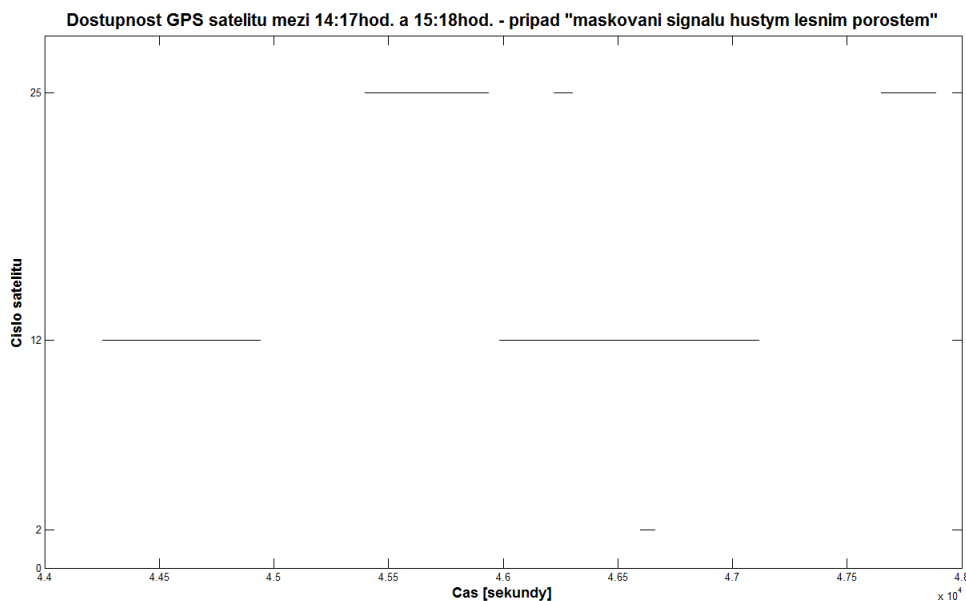
Tabulka 3_Naměřená data - Statika_Lesy

Název souboru	Statika_Lesy1	Statika_Lesy2	Statika_Lesy3
Velikost souboru [kB]	734	139	618
Datum měření	2.8.2011	2.8.2011	2.8.2011
Začátek měření	9: ²⁴	14: ¹⁷	18: ²⁵
Konec měření	10: ²¹	15: ¹⁸	19: ²³
Celkový počet vzorků*	3413	3636	3434
Počet vzorků (výpočet 3D polohy)	3318	0	2038

* zjištěno z rozdílu začátku a konce měření (RINEX observation file)

Po vyčíslení množství vzorků vychází, že v téměř 50% (konkrétně 48,9%) doby měření nebylo možné provést výpočet polohy. Tato hodnota je již od výsledků získaných z předchozího případu měření velmi vzdálená. V době, kdy docházelo k výpočtům 3D polohy bylo s procentuálním zastoupením přes 95% využíváno pro výpočet mezi 4 až 6 satelitními signály.

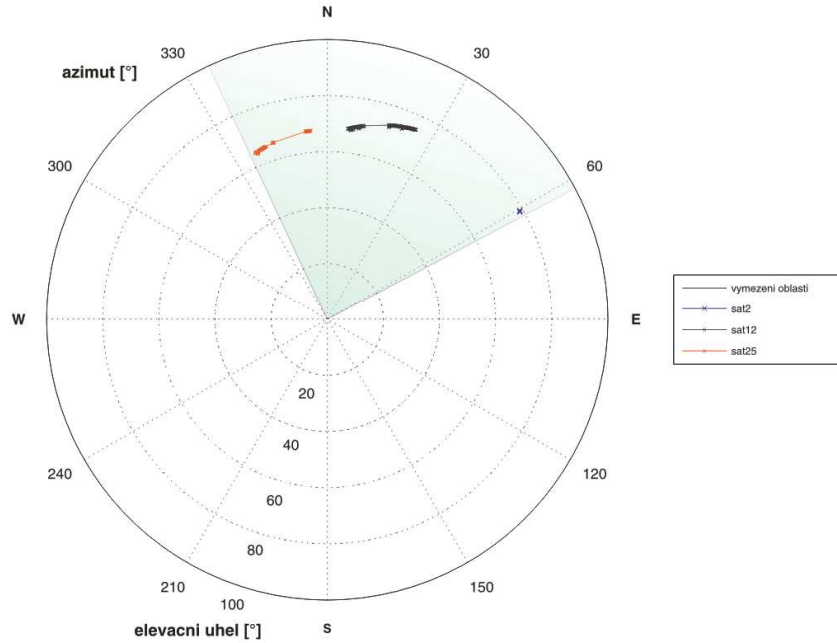
V tabulce 3 si lze všimnout posledního řádku ve 3. sloupci, kde je číslo 0. Při měření mezi 14:17 a 15:18 hodin dne 2.8.2011 nebylo možné provést výpočet polohy, a to ani ve 2D prostoru s využitím 3 satelitních signálů.



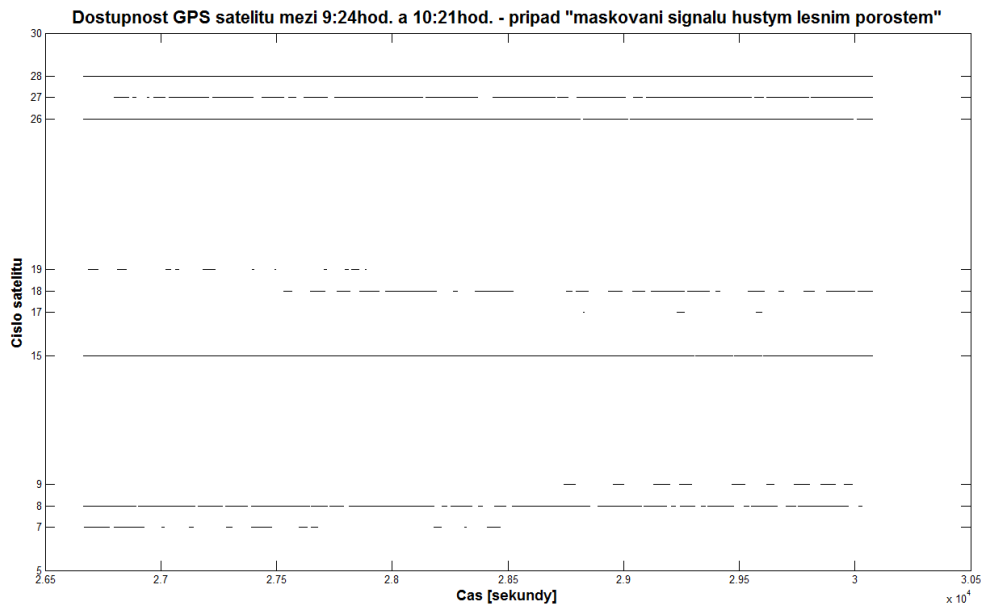
graf 3

Graf 3 zobrazuje dostupnost satelitních signálů v době měření, kde nejvyšší počet současně přijímaných satelitních signálů byl 2. Dále na grafu 4 je zobrazeno rozložení satelitů na obloze během doby měření. Vyznačená oblast na grafu 4 vymezuje prostor, z kterého byl možný příjem satelitních signálů.

Pohyb satelitu na obloze během mereni - 14:17hod. az 15:18hod. - pripad "maskovani signalu hustym lesnim porostem"



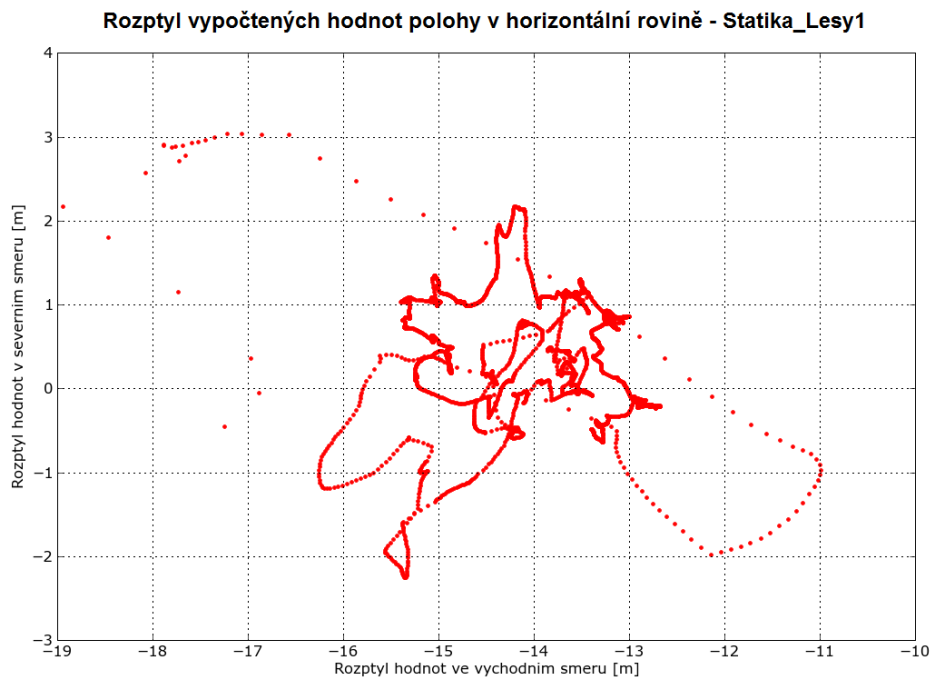
graf 4



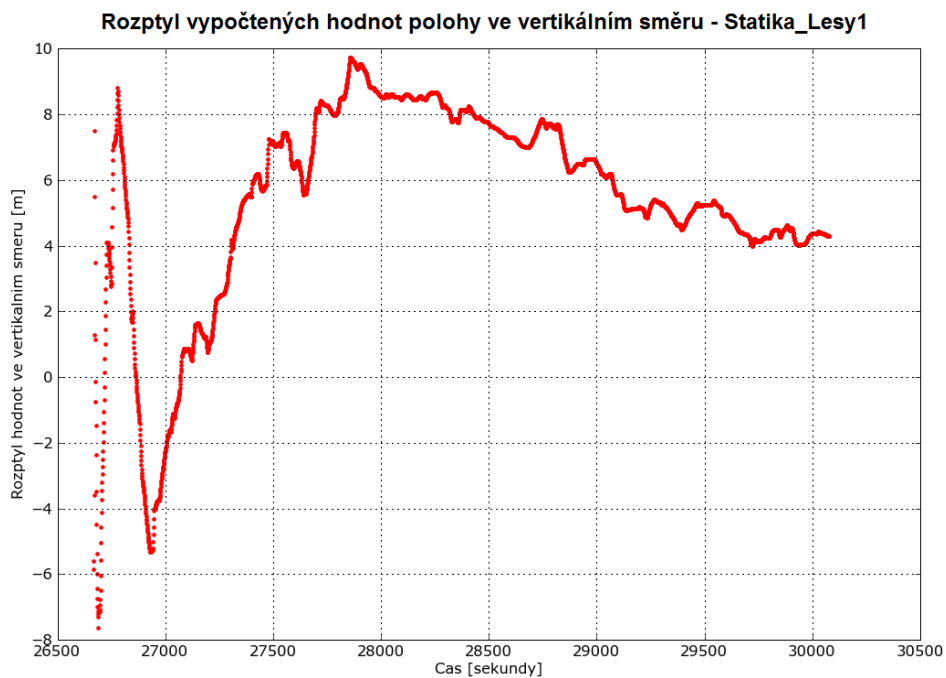
Graf 5

Na grafu 5 je již zobrazen příznivější případ. Jedná se o měření, které probíhalo mezi 9:24 a 10:21hodin. Na grafu stojí za povšimnutí přerušování čár - dostupnosti některých satelitních signálů. Velmi patrné je to například u satelitů číslo 7, 9, 18 a 19. Příchozí satelitní signály zmíněných satelitů mají téměř po celou dobu, kdy jsou používány pro výpočet polohy velmi nízkou hodnotu parametru C/N_0 . Ta se pohybuje

zhruba mezi 30 až 35. S největší pravděpodobností dochází v případech, kdy nejsou satelity dostupné pro výpočet polohy, k poklesu parametru C/N_0 na tak nízkou hodnotu, že přijímač již nedokáže tyto velmi slabé signály využít.



Graf 6



Graf 7

Grafy 6 a 7 zobrazují rozptyl vypočtených hodnot polohy ve 3D prostoru. U grafu 6 dosahuje rozptyl hodnot v severním směru téměř 5,5 metrů. U rozptylu hodnot ve východním směru si lze všimnout posunu o zhruba 14 metrů doleva vůči skutečné poloze antény. K tomuto posunu dochází zřejmě působením některého z nežádoucích vlivů na měření, kde je ovlivněn výpočet všech pseudovzdáleností. Z grafu 7 lze zjistit, že celkový rozptyl hodnot ve vertikálním směru dosahuje téměř 18 metrů.

3) Budovy v okolí železniční tratě

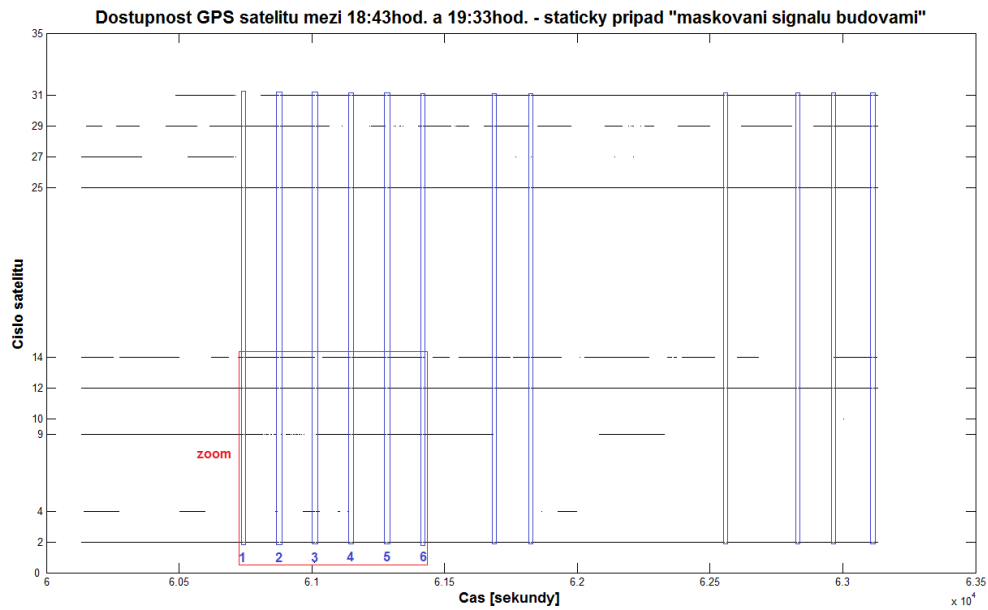
Popis měřicího stanoviště je uveden v příloze A, konkrétně na straně 2 a 3. Opět ze stejného důvodu jako u měřicího případu 2 nemohlo být provedeno u analyzovaných dat vyjádření velikosti chyby v prostoru. Místo toho je vyjádřen pouze rozptyl vypočtených hodnot polohy v prostoru.

Tabulka 4_Naměřená data - Statika_Budovy

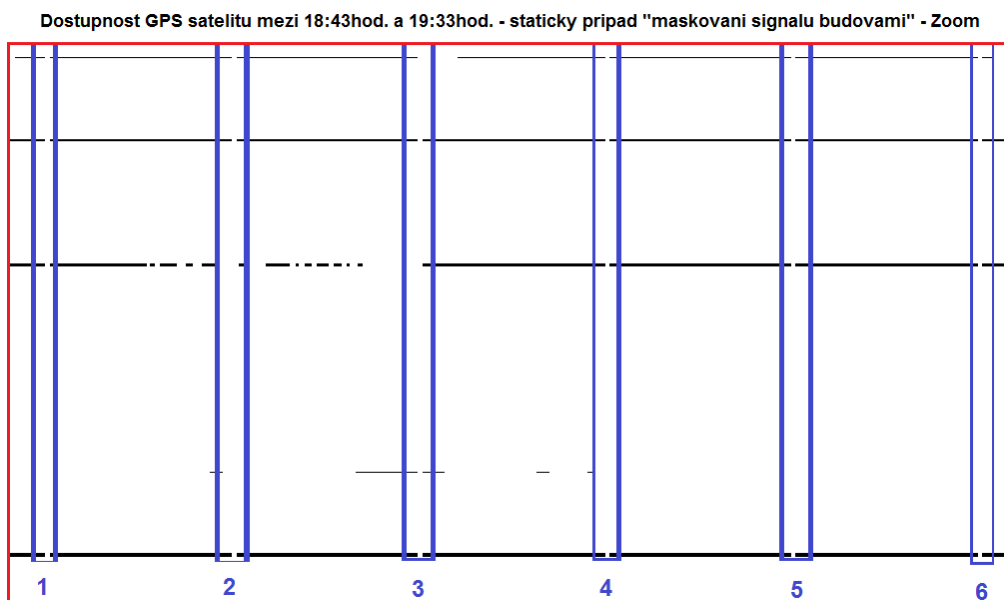
Název souboru	Statika_Budovy1	Statika_Budovy2	Statika_Budovy3
Velikost souboru [kB]	716	602	775
Datum měření	9.6.2011	9.6.2011	9.6.2011
Začátek měření	10: ³⁸	14: ³⁷	18: ⁴³
Konec měření	11: ³²	15: ²¹	19: ³³
Celkový počet vzorků*	3219	2633	3000
Počet vzorků (výpočet 3D polohy)	3147	2563	2876

* zjištěno z rozdílu začátku a konce měření (RINEX observation file)

U tohoto měření bylo možné provádět výpočet 3D polohy v 90% celkové doby měření, z toho s více jak 84% zastoupením bylo pro výpočet využíváno 5 až 7 satelitních signálů. Při analýze dat jsem zjistil, že v několika časových úsecích nebylo možné provést výpočet polohy po dobu zhruba 5 sekund, viz. modře vyznačené oblasti na grafu 8 (grafu 9). Při těchto "výpadech" byly přijímačem generovány zprávy označené jako "UNKNOWN MESSAGE", které poukazují na problém rozhraní GPS přijímač - úložné zařízení. Konkrétní analýza vzniku tohoto problému nebyla objektem zkoumání. Avšak vzhledem k tomu, že rozestup mezi těmito časovými úseky měl téměř totožnou periodu, je možné, že docházelo k ovlivnění přenosu dat vlivem cizího elektromagnetického pole.



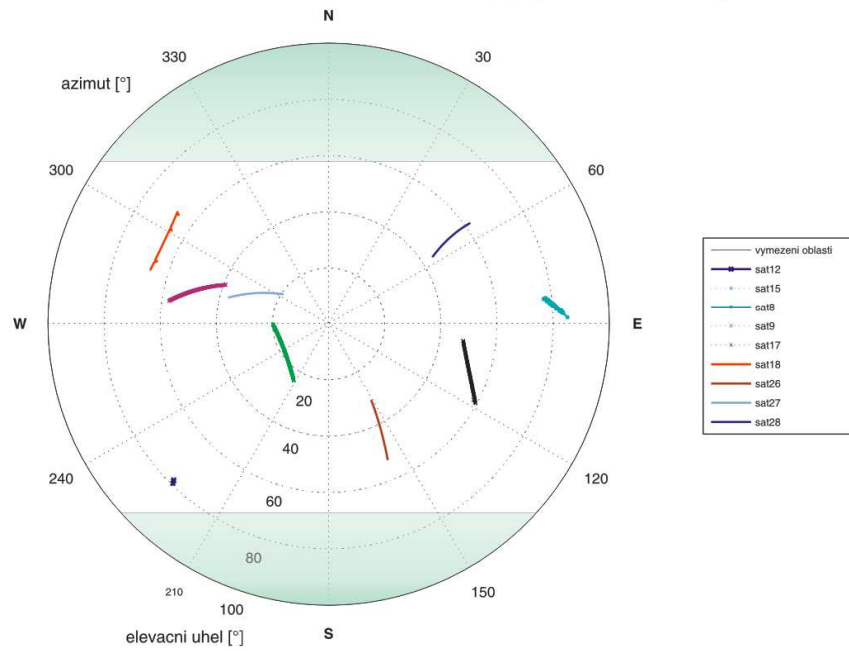
Graf 8



Graf 9_zoom časti grafu 8

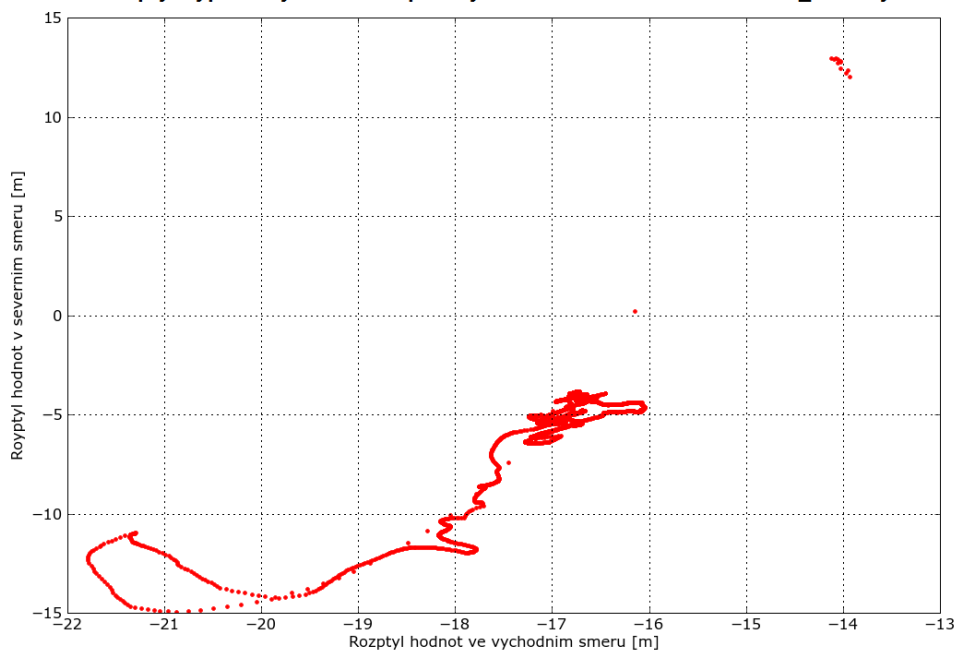
Na grafu 10 je zobrazeno rozložení satelitů na obloze během měření mezi 14:37 a 15:21 hodin. Tento graf byl vytvořen pouze ze satelitů, z kterých byly přijímány signály. Slabě zelenou barvou je vyznačená oblast (směr), kde docházelo k maskování satelitních signálů vlivem okolních budov. K největším příjmům signálů docházelo od satelitů nacházejících se v okolí pomyslné osy západ - východ (W - E), což odpovídá skutečnosti, neboť v tomto směru vede ulice, viz. popis měřícího stanoviště v příloze A. Grafy stejného charakteru jako je graf 10 z ostatních provedených měření v tomto případě jsou uvedeny v příloze B.

Pohyb satelitu na obloze během mereni - 14:37hod. az 15:21hod. - staticky pripad "maskovani signalu budovami"



Graf 10

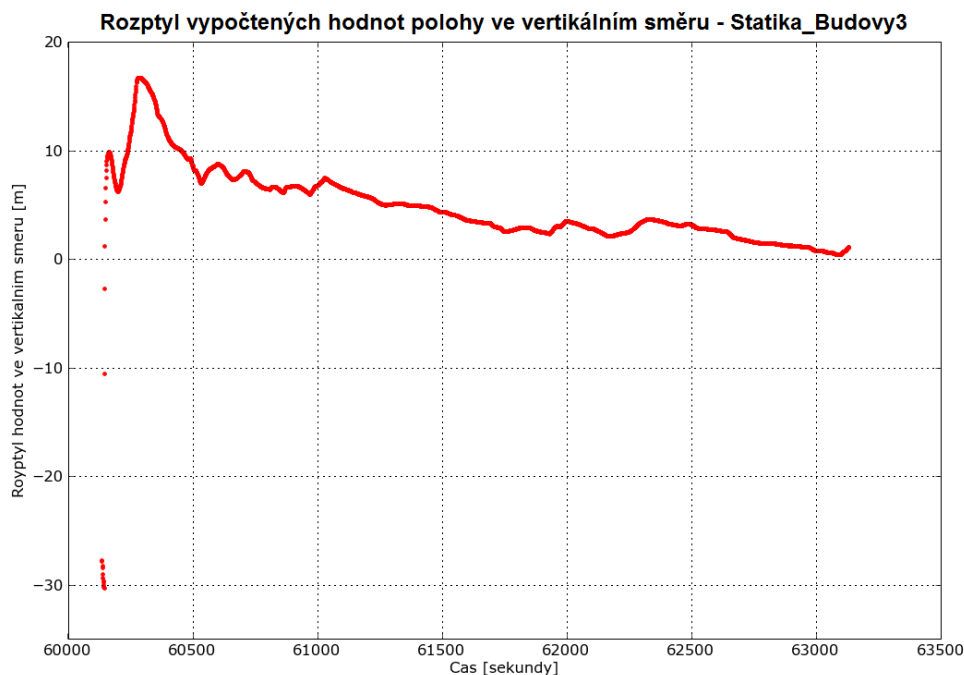
Rozptyl vypočtených hodnot polohy v horizontální rovině - Statika_Budovy3



Graf11

Graf 11 zobrazuje rozptyl vypočtených hodnot polohy v horizontální rovině. Stejně jako u 2. měření, i zde došlo k posunu rozptylu hodnot ve východním směru doleva vůči skutečné poloze antény. Konkrétně asi o 17 metrů. Na grafu 11 si lze také všimnout, že došlo ke skokové změně polohy jak ve východním, tak severním směru. Tento jev je zřejmě způsoben ztrátou některého z přijímaných signálů, který byl využit při výpočtu polohy. Pro účel detekce takovýchto jevů je možné využít parametru DOP, viz. podkapitola 2.1.3.

Celkový rozptyl hodnot v severním směru odpovídá asi 27 metrům, rozptyl hodnot ve východním směru odpovídá téměř 22 metrům.



Graf 12

Z grafu 12 je také patrná skoková změna polohy a to hned na samém začátku měření, kde během krátkého časového úseku došlo ke změně přesnosti výpočtu nadmořské výšky o zhruba 40 metrů. Celkový rozptyl hodnot ve vertikálním směru dosahuje více jak 45 metrů.

4) Zářez na železniční trati

Popis měřícího stanoviště je uveden v příloze A, konkrétně na straně 3 a 4. Stejně jako u předešlých měření, i zde nemohlo být provedeno u analyzovaných dat vyjádření velikosti chyby v prostoru. Místo toho je vyjádřen pouze rozptyl vypočtených hodnot polohy v prostoru.

Tabulka 5_Naměřená data - Statika_Zářez

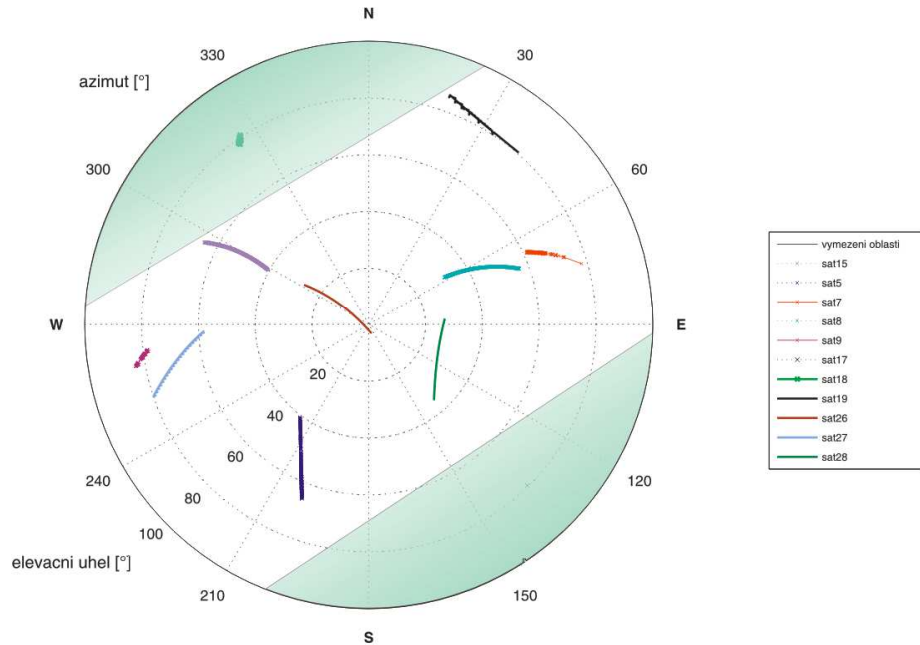
Název souboru	Statika_Zarez1	Statika_Zarez2	Statika_Zarez3
Velikost souboru [kB]	1553	1178	872
Datum měření	14.6.2011	14.6.2011	14.6.2011
Začátek měření	12: ²²	16: ²⁸	20: ²⁹
Konec měření	13: ²⁰	17: ²¹	21: ¹²
Celkový počet vzorků*	3503	3219	2577
Počet vzorků (výpočet 3D polohy)	3470	3123	2499

* zjištěno z rozdílu začátku a konce měření (RINEX observation file)

V 97,8% doby měření bylo možné provádět výpočet 3D polohy, z toho ve více jak 76% bylo pro výpočet využíváno 6 až 7 satelitních signálů. Stejně jako u měření 3, i zde docházelo k problémům s rozhraním přijímač - úložné zařízení.

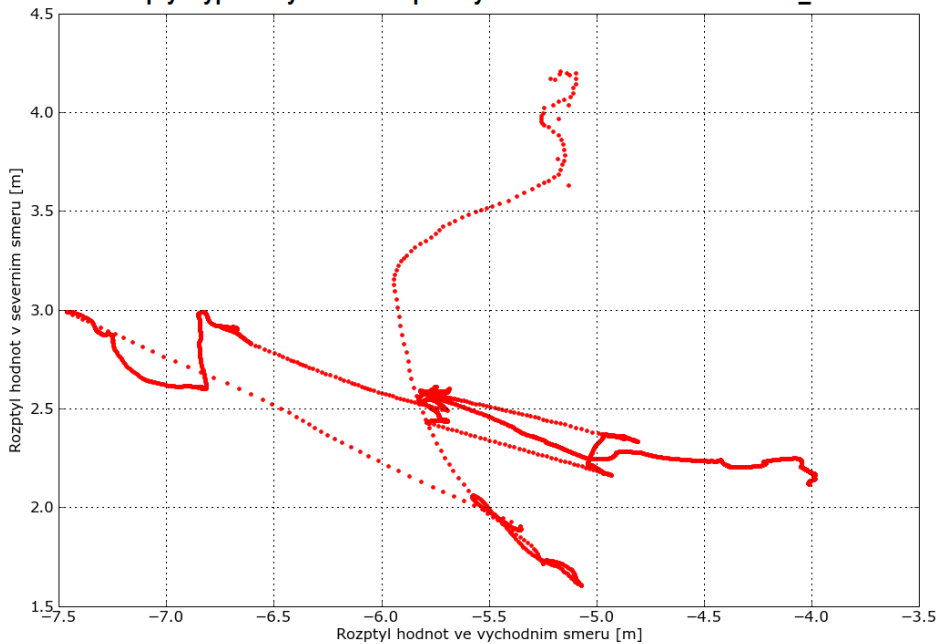
Graf 13 zobrazuje stejně jako u předchozího případu rozložení satelitů na obloze během měření mezi 12:22 a 13:20 hodin. Opět jsou zde vyznačeny oblasti (směr), kde docházelo k maskování satelitních signálů. Grafy stejného charakteru jako je graf 13 z ostatních provedených měření v tomto případě jsou uvedeny v příloze B.

Pohyb satelitu na obloze během měření - 12:22hod. az 13:20hod. - staticky případ "vliv zarezu na trati"



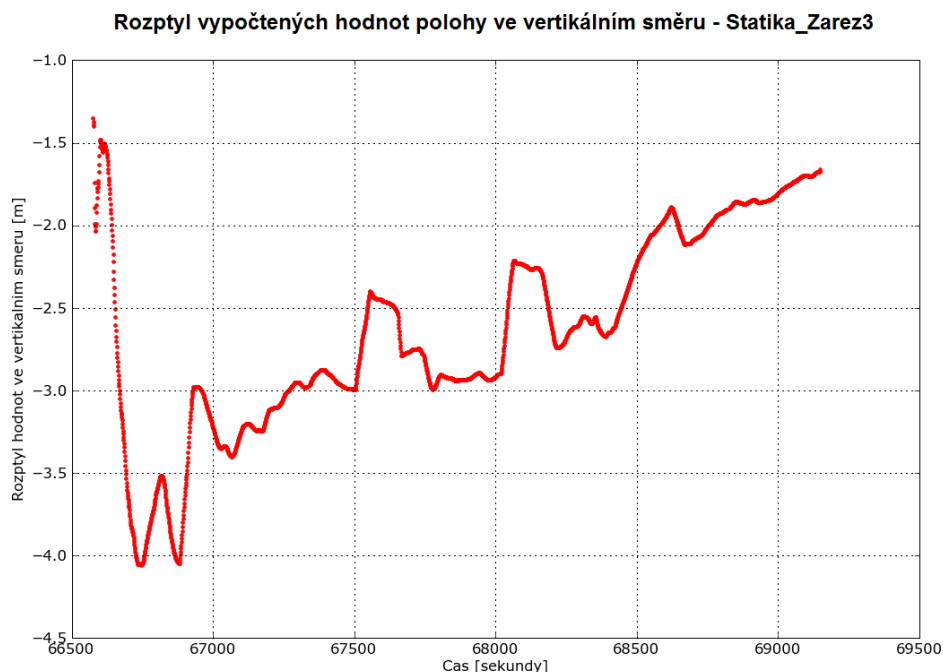
Graf 13

Rozptyl vypočtených hodnot polohy v horizontální rovině - Statika_Zarez3



Graf 14

Na grafu 14 si lze všimnout posunu vypočtených hodnot polohy vzhledem ke skutečné poloze antény v řádu jednotek metrů, a to jak v severním směru, tak ve východním směru. Celkový rozptyl hodnot v severním směru dosahuje hodnoty asi 4,2 metru, ve východním směru dosahuje téměř 7,5 metru. Rozptyl vypočtených hodnot polohy ve vertikálním směru je zobrazen na grafu 15, celkově dosahuje zhruba čtyř metrů.



Graf 15

5) Most nad železniční tratí

Popis měřicího stanoviště je uveden v příloze A, konkrétně na straně 5 a 6. Stejně jako u předešlých měření, i zde nemohlo být provedeno u analyzovaných dat vyjádření velikosti chyby v prostoru. Místo toho je vyjádřen pouze rozptyl vypočtených hodnot polohy v prostoru.

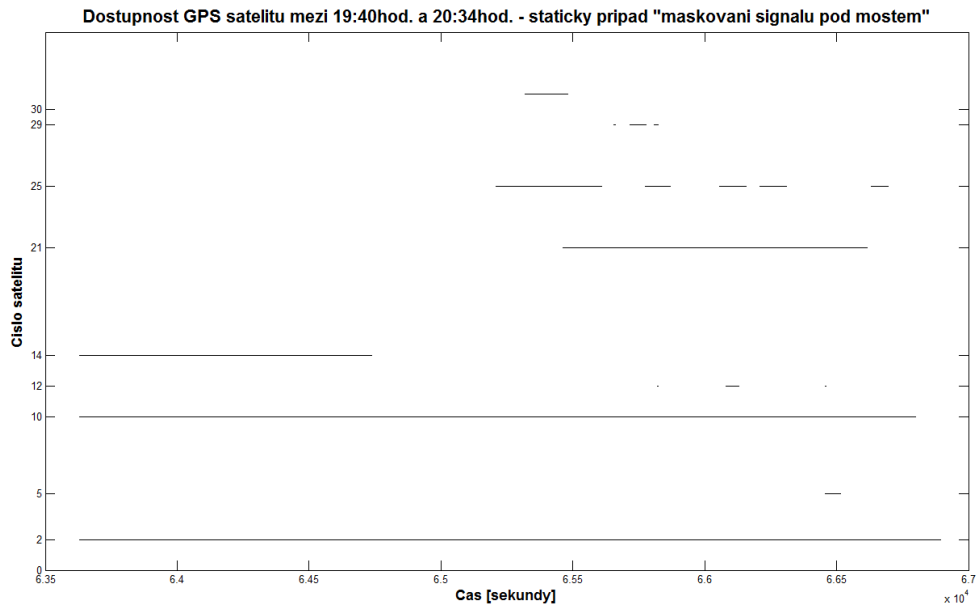
Tabulka 6_Naměřená data - Statika_Most

Název souboru	Statika_Most1	Statika_Most2	Statika_Most3
Velikost souboru [kB]	689	630	509
Datum měření	15.6.2011	15.6.2011	15.6.2011
Začátek měření	11: ⁰²	15: ¹²	19: ⁴⁰
Konec měření	11: ⁵²	16: ⁰⁷	20: ³⁴
Celkový počet vzorků*	2963	3311	3264
Počet vzorků (výpočet 3D polohy)	1650	2998	658

* zjištěno z rozdílu začátku a konce měření (RINEX observation file)

Z tabulky 6 vyplývá, že při měření Statika_Most2 byl dostatečný počet satelitních signálů po většinu doby měření (91% doby měření), naproti tomu u měření Statika_Most1 byl dostatečný počet satelitních signálů potřebných pro výpočet

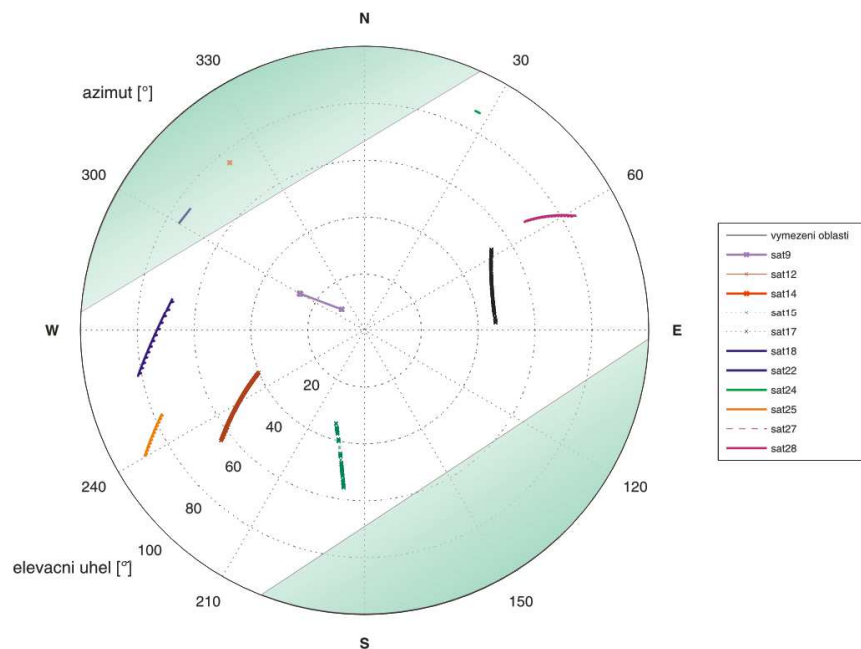
polohy v 56% a u měření Statika_Most3 to bylo pouze ve 20% doby měření. Graf 16 zobrazuje dostupnost satelitních signálů u měření Statika_Most3.



Graf 16

Souhrnně lze uvést, že u tohoto měření bylo možné provést výpočet polohy v 56% z celkové doby měření. Při výpočtech polohy byly v 77% využívány "pouze" 4 satelitní signály. Stejně jako tomu bylo u předchozích případů měření, i zde docházelo k problémům s rozhraním přijímač - úložné zařízení.

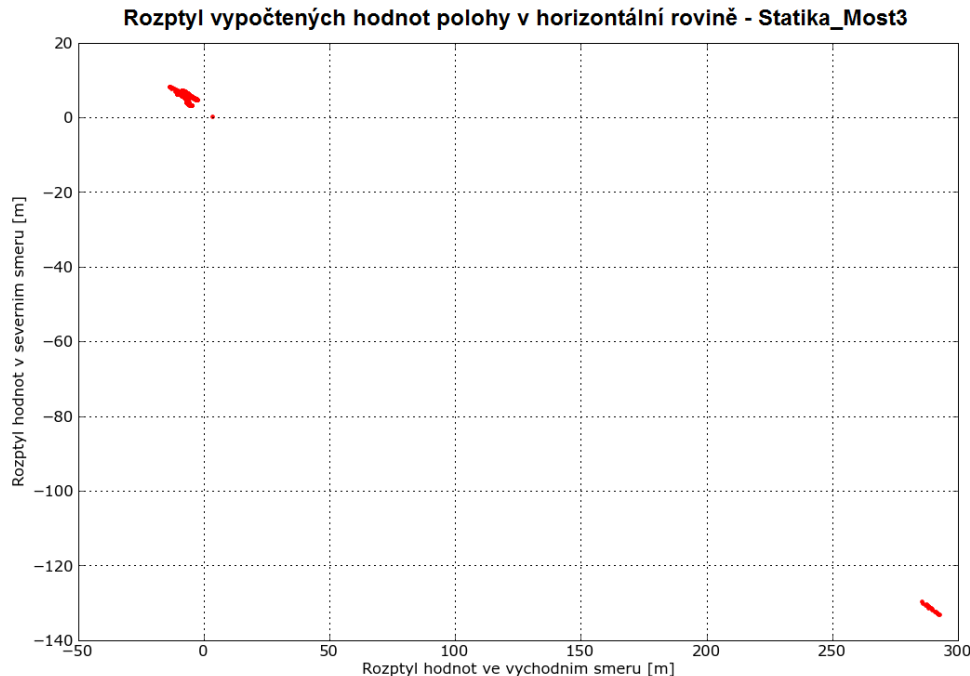
Pohyb satelitu na obloze během mereni - 15:12hod. az 16:07hod. - staticky pripad "maskovani signalu pod mostem"



Graf 17

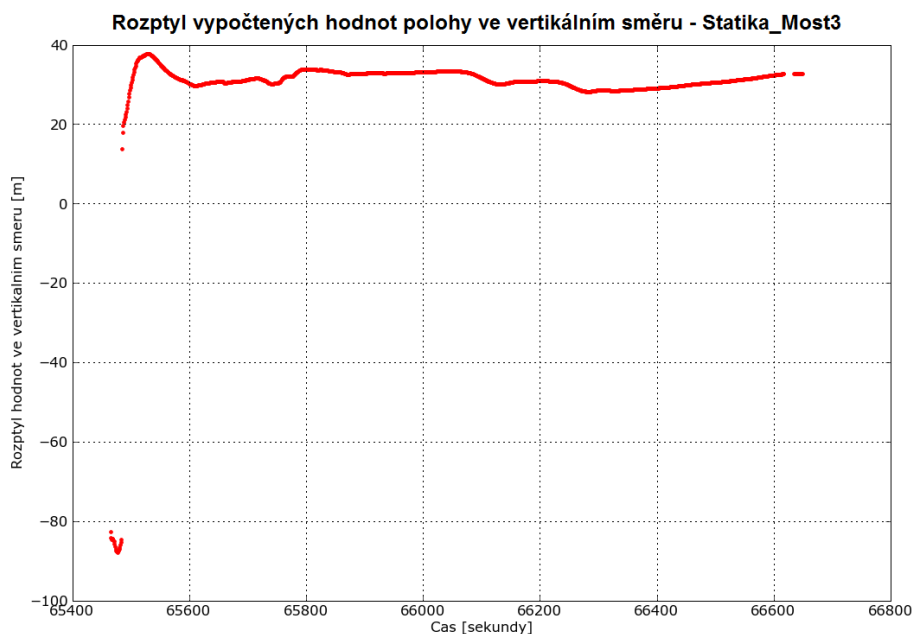
Stejně jako u předešlých případů měření vlivu maskování satelitních signálů, i zde je znázorněno pomocí grafu 17 rozložení satelitů na obloze během měření mezi 15:12

a 16:07 hodin. Opět jsou zde vyznačeny oblasti (směr), kde docházelo k maskování satelitních signálů. Grafy stejného charakteru jako je graf 17 z ostatních provedených měření v tomto případě jsou uvedeny v příloze B.



Graf 18

Z grafu 18, zobrazujícího rozptyl vypočtených hodnot polohy v horizontální rovině pro 3. provedené měření v případě maskování satelitních signálů pod mostem, který je nad železniční tratí, vyplývá několik faktů. Na první pohled je patrný značný skok v přesnosti výpočtu polohy, který je zřejmě způsoben změnou počtu satelitních signálů využívaných pro výpočet polohy. V příznivém případě, kdy byl přijímán dostatečný počet satelitních signálů a kdy bylo zřejmě i kvalitní geometrické rozložení satelitů vůči přijímači byla velikost rozptylu hodnot v horizontální rovině v řádu jednotek metrů. Na druhou stranu, v nepříznivém případě, byla velikost chyby ve výpočtu polohy v řádu desítek až stovek metrů. Konkrétně rozptyl hodnot v severním směru dosahoval hodnoty asi 130 metrů, v případě rozptylu hodnot ve východním směru dosahoval hodnoty necelých 300 metrů. Z grafu 19 je taktéž vidět značný skok v přesnosti výpočtu polohy. Celkový rozptyl hodnot ve vertikálním směru dosahoval téměř 130 metrů.



Graf 19

4.1.2 Dynamické případy

U vyhodnocení dynamických případů maskování satelitních signálů nebylo technicky možné provést vyjádření velikosti chyby určení polohy ve vertikální a horizontální poloze, jako tomu bylo ve statických případech. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl, že naměřená data budou zobrazena přímo v mapě. K tomuto účelu byl použit software Google Earth (v 6.1.0.5001). Konkrétně jsem vytvořil soubory s příponou .kml, do kterých jsem zadal změřené údaje o poloze antény (zeměpisná šířka a zeměpisná délka).

Co se týče praktického měření, nebylo technicky možné provádět měření přímo na železniční trati, a tak bylo nezbytné provést záměnu tohoto prostředí za prostředí silniční komunikace, kde bylo možné pomocí automobilu toto měření provést.

Stejně jako tomu bylo u statických případů, i zde jsem postupoval dle metodiky popsané v kapitole 3.2. Popis všech měřících stanovišť je taktéž uveden v příloze A.

1) Volný výhled na oblohu s minimálním množstvím okolních objektů

Tabulka 7_Naměřená data - Dynamika_Volný prostor

Název souboru	Dynamika_Volny prostor1	Dynamika_Volny prostor2	Dynamika_Volny prostor3
Velikost souboru [kB]	124	110	99
Datum měření	16.6.2011	16.6.2011	16.6.2011
Začátek měření	10: ⁰⁵	14: ³¹	18: ³⁸
Konec měření	10: ⁰⁹	14: ³⁴	18: ⁴¹
Celkový počet vzorků*	228	207	209
Počet vzorků (výpočet 3D polohy)	225	204	206

* zjištěno z rozdílu začátku a konce měření (RINEX observation file)

Po celou dobu všech provedených měření v tomto měřicím případě bylo možné provádět výpočet 3D polohy. V téměř 100% doby měření bylo k výpočtu polohy využíváno 7 až 10 satelitních signálů. Při porovnání měřené trasy uvedené v příloze A na straně 8 a 9, a obrázků 31 až 33, které zobrazují naměřená data v mapě, je na první pohled patrné, že jsou tyto trasy totožné. Naměřené hodnoty přesně kopírují měřenou trasu bez jakýchkoliv skokových změn polohy.



Obrázky 31-33_Mapá s naměřenými daty - případ "Volný výhled na oblohu s minimálním množstvím okolních objektů"

2) Hustý lesní porost v okolí železniční tratě

Tabulka 8_Naměřená data - Dynamika_Lesy

Název souboru	Dynamika_lesy1	Dynamika_lesy2	Dynamika_lesy3
Velikost souboru [kB]	63	72	60
Datum měření	16.6.2011	16.6.2011	16.6.2011
Začátek měření	10: ¹⁴	14: ³⁹	18: ⁴⁷
Konec měření	10: ²²	14: ⁴⁴	18: ⁵¹
Celkový počet vzorků*	282	285	254
Počet vzorků (výpočet 3D polohy)	94	107	24

* zjištěno z rozdílu začátku a konce měření (RINEX observation file)

Po vyčíslení naměřených vzorků vyplynulo, že výpočet 3D polohy bylo možné provádět pouze v necelých 28% celkové doby měření. V případech, kdy docházelo k výpočtům bylo s procentuálním zastoupením více jak 80% využíváno 4 až 5 satelitních signálů.

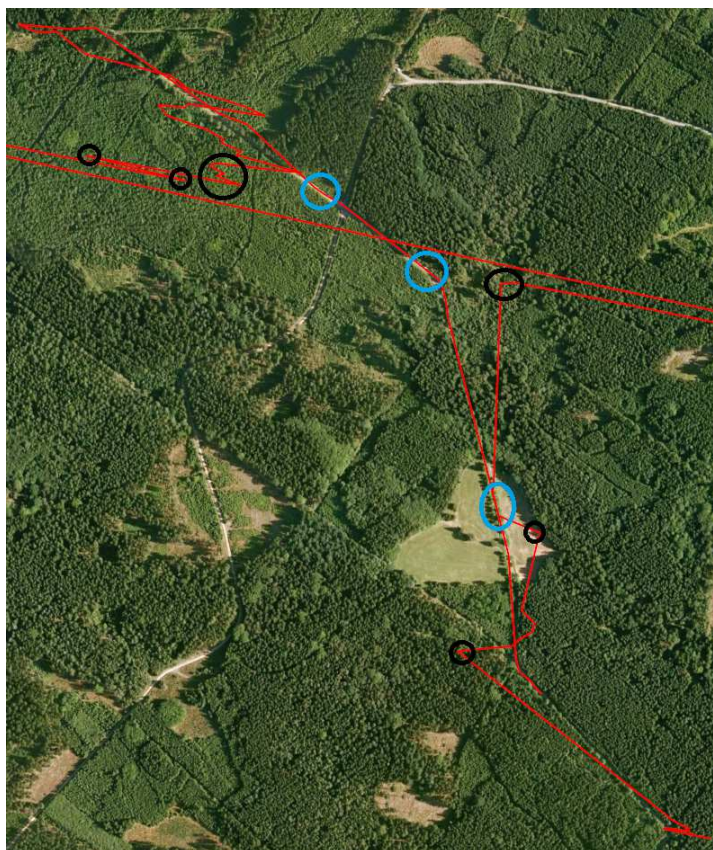


Obrázek 34_Mapá s naměřenými daty - případ "Hustý lesní porost v okolí železniční tratě"

Jak ukazuje obrázek 34, došlo při měření v prostředí hustě zalesněné tratě ke vzniku extrémní chyby ve výpočtu polohy. Černým kolečkem jsou vyznačena místa, která byla po sobě (1s) vypočítána GPS přijímačem, vzdálenost těchto míst je cca 7,6km. Na následujícím obrázku 35 je bližší pohled na okolí testované tratě.

Modré značky na obrázku 35 vyznačují oblasti, kdy při všech provedených měření byl možný příjem dostatečného počtu satelitních signálů k výpočtu 3D polohy. Jak je patrné, nejsou tyto oblasti vzhledem k celkové délce tratě příliš rozměrné a dosahují zhruba desítek metrů. Při jízdě automobilem rychlostí 50km/h a záznamu dat s periodou 1 sekunda dojde v těchto úsecích ke generaci výstupních dat přijímačem jen v několika málo případech.

Černými značkami jsou vyznačeny významné odchylky vypočtené polohy přijímačem od skutečné polohy antény. Tyto odchylky v poloze se pohybovaly v řádu desítek až stovek metrů. Velký podíl na těchto odchylkách mělo časté maskování satelitních signálů a následná nemožnost výpočtu 3D polohy po většinu měřené doby. V některých případech to vypadá, jako kdyby měl přijímač problém s inicializací polohy. Například dojde k nemožnosti výpočtu polohy po dobu 20 sekund, poté je výpočet polohy možný na jednu či dvě sekundy (chybný výpočet polohy) a opět dojde k nemožnosti výpočtu polohy na několik jednotek či desítek sekund. Tento scénář se během měření několikrát opakoval. Na obrázku 35 si lze také všimnout oblasti v pravém dolním rohu, kde byla anténa několik sekund ve statickém stavu. Rozptyl vypočtených hodnot polohy se zhruba pohybuje v rozmezí 15 až 20 metrů, což odpovídá hodnotám, které byly zjištěny u statického měření - případ "Hustý lesní porost v okolí železniční tratě", viz. podkapitola 4.1.1.



Obrázek 35_Mapá s naměřenými daty - případ "Hustý lesní porost v okolí železniční tratě" - zoom

3) Budovy v okolí železniční tratě

U tohoto měřicího případu došlo při posledním měření k problému s dopravní situací a tudíž toto měření nebylo použito k následovné analýze naměřených dat.

Tabulka 9_Naměřená data - Dynamika_Budovy

Název souboru	Dynamika_Budovy1	Dynamika_Budovy2
Velikost souboru [kB]	108	89
Datum měření	9.6.2011	9.6.2011
Začátek měření	9: ²²	13: ³⁴
Konec měření	9: ²⁹	13: ⁴²
Celkový počet vzorků*	425	462
Počet vzorků (výpočet 3D polohy)	375	147

* zjištěno z rozdílu začátku a konce měření (RINEX observation file)

Z analýzy dat získaných z prvního měření (Dynamika_Budovy1) vyplývá, že v téměř 90% doby měření bylo možné provádět výpočet 3D polohy. Naproti tomu u druhého měření bylo možné provádět výpočet 3D polohy pouze ve 32% doby měření. Tento značný rozdíl opět poukazuje na dostupnost satelitních signálů během jednotlivých měření. Množství satelitních signálů využívaných k výpočtům polohy během tohoto měřicího případu je uvedeno v tabulce 10.

Tabulka 10_Množství vzorků - Dynamika_Budovy

Množství satelitních signálů	4	5	6	7	8	celkem
Množství vzorků_Dynamika_Budovy1	213	80	23	56	3	375
Množství vzorků_Dynamika_Budovy2	60	24	29	34	X	147

Na obrázku 36 je zobrazena změřená poloha antény při jízdě automobilem mezi budovami. Při jízdě nejdelšími ulicemi (na obrázku svislé) docházelo velmi často k maskování většiny satelitních signálů a nebylo možné provést výpočet polohy. Při křížení pozemních komunikací docházelo ve většině případů k možnosti výpočtu polohy na několik sekund v závislosti na rychlosti jízdy automobilu a šířce obou ulic. V modře vyznačené oblasti si lze všimnout nepřesnosti ve výpočtu polohy. V tomto případě došlo ke zpomalení jízdy automobilu a posléze k zastavení na několik sekund. V černě vyznačené oblasti je patrná skoková změna polohy v rozsahu jednotek až desítek metrů. Tyto změny nebyly způsobeny maskováním signálu, neboť 3D poloha byla po tuto dobu vypočítávána. Vzhledem k charakteru prostředí vysokých budov s množstvím kovových odrazivých ploch a tvaru změn vypočtené polohy zde s největší pravděpodobností docházelo ke vzniku mnohacestného šíření satelitních signálů.



Obrázek 36_ Mapa s naměřenými daty 1 - případ "Budovy v okolí železniční tratě"

Na obrázku 37 je stejná situace jako v předchozím případě (obrázek 36), avšak je hned na první pohled jasné, že zde došlo v několika případech k velké chybě výpočtu polohy (černé vyznačeno). Rozdíl mezi skutečnou a vypočtenou polohou antény byl v řádu stovek metrů. K těmto nepřesnostem docházelo vždy po delší době (desítky sekund) nemožnosti výpočtu polohy vlivem maskování satelitních signálů. Modře je opět vyznačena oblast, kde docházelo k nepřesnostem výpočtu polohy vlivem úplného zastavení automobilu.



Obrázek 37_Mapá s naměřenými daty 2 - případ "Budovy v okolí železniční tratě"

4) Mosty nad železniční tratí

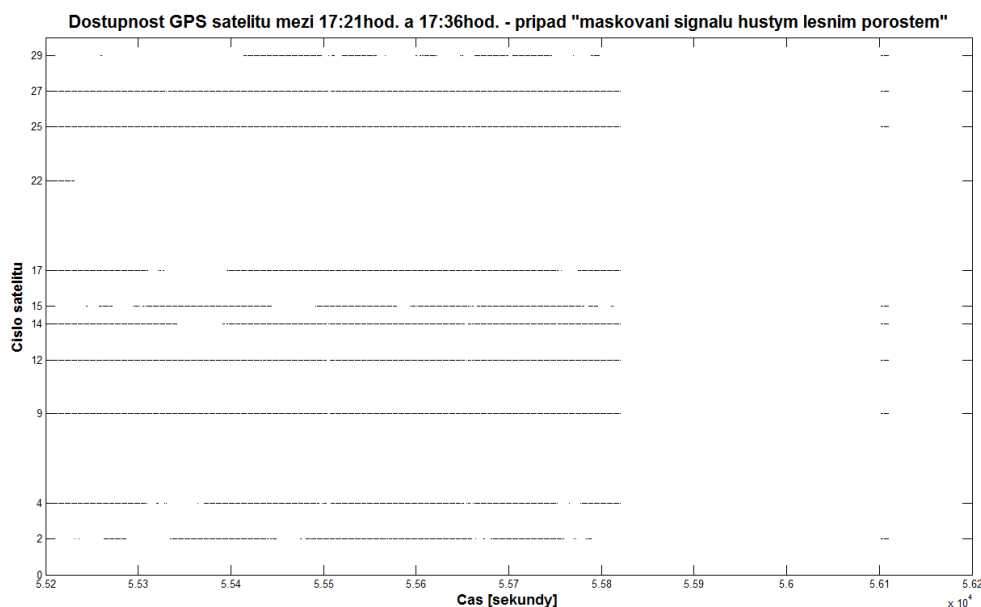
Tabulka 11_Naměřená data - Dynamika_Mosty

Název souboru	Dynamika_Mosty1	Dynamika_Mosty2	Dynamika_Mosty3
Velikost souboru [kB]	170	158	191
Datum měření	9.6.2011	9.6.2011	9.6.2011
Začátek měření	8: ⁵⁹	13: ¹⁹	17: ²¹
Konec měření	9: ¹⁰	13: ²⁸	17: ³⁶
Celkový počet vzorků*	610	592	905
Počet vzorků (výpočet 3D polohy)	464	478	512

* zjištěno z rozdílu začátku a konce měření (RINEX observation file)

U prvních dvou provedených měření byla doba měření zhruba 10 minut (cca 600vzorků) a v téměř 80% této doby bylo možné provádět výpočet 3D polohy. Poslední měření mělo celkovou dobu trvání zhruba 15 minut (cca 900vzorků) a k výpočtům 3D polohy docházelo pouze v 57% doby měření. Množství satelitních signálů využívaných k výpočtům 3D polohy se pohybovalo v rozmezí 4 až 10 s největším zastoupením 6 až 7 satelitních signálů.

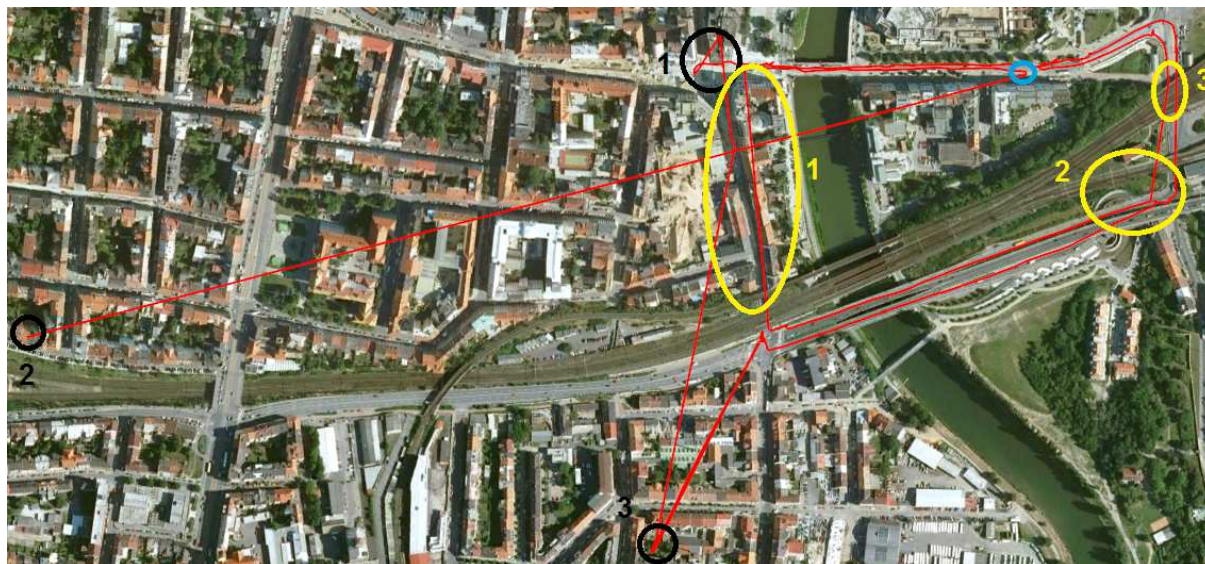
Rozdíl v době měření mezi prvními dvěma měřeními a posledním byl způsoben náhodnou chybou, kdy po průjezdu celé testované trasy u posledního měření byl ponechán zapnutý GPS přijímač a to zhruba na dobu 5 minut. Z grafu 20 je patrné, že právě v poslední fázi měření, kdy byla anténa ve statickém stavu, došlo k zamaskování všech příchozích satelitních signálů a tudíž po tuto dobu nebylo možné provést výpočet polohy.



Graf 20

Na obrázku 38 je tato oblast modře vyznačena. Po zhruba 4,5 minutách došlo k obnově výpočtu 3D polohy, avšak se značně velkou chybou. Na obrázku 38 je takto vzniklá chyba označena černým kolečkem s číslem 2. Vzdálenost mezi skutečnou a vypočtenou polohou je přibližně 1 km.

Na obrázku 38 jsou dále černě označeny oblasti 1 a 3, kde docházelo k nepřesnostem výpočtu polohy. Tyto nepřesně určené polohy byly následkem maskování satelitních signálů po několik jednotek až desítek sekund. Žlutě vyznačené oblasti ukazují místa, kdy taktéž docházelo k maskování satelitních signálů. V případě žlutě označených míst 2 a 3 docházelo k maskování vlivem mostů, v případě žlutě označeného místa 1 bylo maskování způsobeno nejen mosty, ale i navíc úzkou silnicí s vysokými okolními budovami.



Obrázek 38_Mapa s naměřenými daty - případ "Most nad železniční tratí"

4.1.3 Shrnutí získaných poznatků při měření maskování satelitních signálů

Uvedenými měřeními v podkapitole 4.1 byla ověřena jednak dostupnost navigační služby GPS systému a jednak přesnost výpočtu polohy v různých prostředích typických pro železniční dopravu. Nejproblematictějším prostředím z pohledu dostupnosti jsou husté lesní porosty v okolí železniční tratě, zvláště u neelektrifikovaných tratí, viz. příloha A, na straně 1 a 2. Další problematické prostředí z pohledu dostupnosti byla oblast mostů nad železniční tratí. V extrémním případě došlo ke zhoršení přesnosti výpočtu polohy až o 300 metrů v horizontální rovině a asi o 130 metrů ve vertikálním směru. Posledním kritickým prostředím z pohledu dostupnosti je oblast vysokých budov. V tomto případě však docházelo k měření na silnici mezi budovami, kde šířka silnice byla mnohem menší, než je obvyklá šířka železniční tratě. Z tohoto pohledu je zřejmý větší vliv maskování satelitních signálů okolními budovami.

Celkově lze říci, že dostupnost navigační služby GPS značně ovlivňuje přesnost výpočtu polohy. V oblastech, kdy jen velmi zřídka mohl být proveden výpočet polohy, docházelo ke značným chybám určení polohy, viz. podkapitola 4.1.2 - případ "Hustý lesní porost v okolí železniční tratě". Jako vhodný prostředek pro indikaci jisté úrovně přesnosti výpočtu polohy by mohl posloužit parametr DOP.

4.2 Vyhodnocení vlivu mnohacestného šíření satelitních signálů

Vzhledem k tomu, že pro exaktní vyhodnocení mnohacestného šíření je zapotřebí mít k dispozici sofistikované hardwarové a softwarové vybavení, viz. metodika uvedená v podkapitole 3.3, bylo u tohoto vyhodnocení použito stejného postupu jako v podkapitole 4.1.1. Bylo zde provedeno vyjádření rozptylu vypočtených hodnot polohy v prostoru.

Na data, která jsou uvedena v této podkapitole byly aplikovány korekce offsetu atomových hodin, korekce vlivu pohybu satelitu během doby šíření signálu k přijímači, korekce vlivu rotace Země během doby šíření signálu a korekce relativistického efektu.

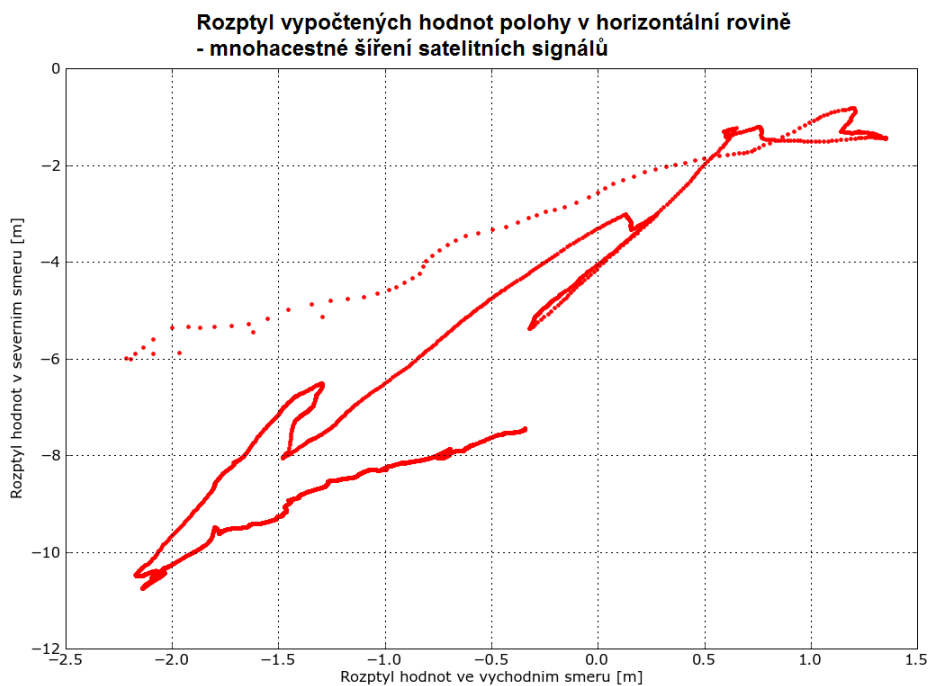
Tabulka 12_Naměřená data - Statika_Multipath

Název souboru	Statika_Multipath1	Statika_Multipath2	Statika_Multipath3
Velikost souboru [kB]	1235	1374	555
Datum měření	7.7.2011	7.7.2011	7.7.2011
Začátek měření	11: ²¹	15: ¹⁶	19: ⁰⁸
Konec měření	12: ¹⁷	16: ¹⁷	20: ⁰¹
Celkový počet vzorků*	3365	3672	3175
Počet vzorků (výpočet 3D polohy)	3362	3669	3133

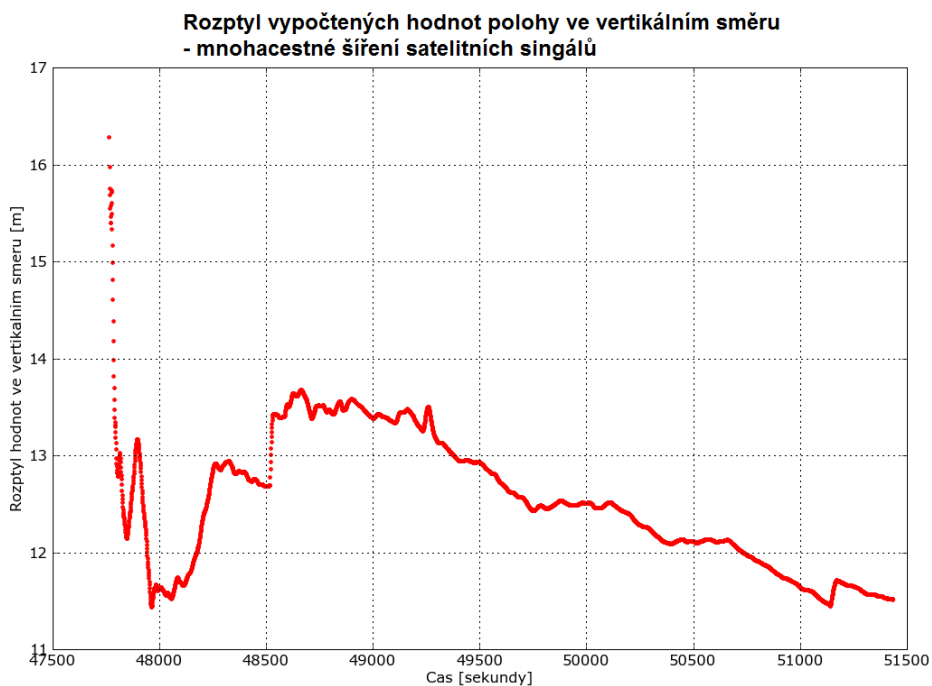
* zjištěno z rozdílu začátku a konce měření (RINEX observation zprávy)

U prvních dvou měření bylo možné provádět výpočet 3D polohy po celou dobu měření a k výpočtům se s procentuálním zastoupením téměř 95% využívalo 6 až 7 satelitních signálů. U posledního měření byla konstelace satelitů na obloze méně příznivá a k výpočtům bylo využíváno maximálně 5 satelitních signálů. Ve dvou časových úsecích nebylo možné provést výpočet 3D polohy z důvodu příjmu pouze 3 satelitních signálů.

Graf 21 zobrazuje rozptyl hodnot polohy v horizontální rovině při předpokládaném působení mnohacestného šíření. Rozptyl hodnot polohy ve východním směru dosahuje 3,5 metru a rozptyl hodnot v severním směru téměř 11 metrů. Z grafu 22 je patrné, že největší nepřesnosti se přijímač dopouští při určení nadmořské výšky, kdy rozptyl hodnot ve vertikálním směru mírně přesahuje 16 metrů.



Graf 21



Graf 22

Shrnutí výsledků:

Exaktní určení vlivu mnohacestného šíření satelitních signálů není z tohoto měření možné provést. Dostupnost GPS navigační služby dosahovala při tomto měření 99%. Maximální chyba určení polohy v horizontální rovině dosahovala téměř 11 metrů, ve vertikálním směru 16,3 metru.

Další oblastí, která měla být analyzována z pohledu vlivu mnohacestného šíření na přesnost výpočtu polohy, bylo vlakové seřadiště s množstvím vagónů. K měření v této oblasti nedošlo především z důvodu nemožnosti exaktního určení vlivu mnohacestného šíření satelitních signálů.

4.3 Vyhodnocení vlivu ionosférického zpoždění

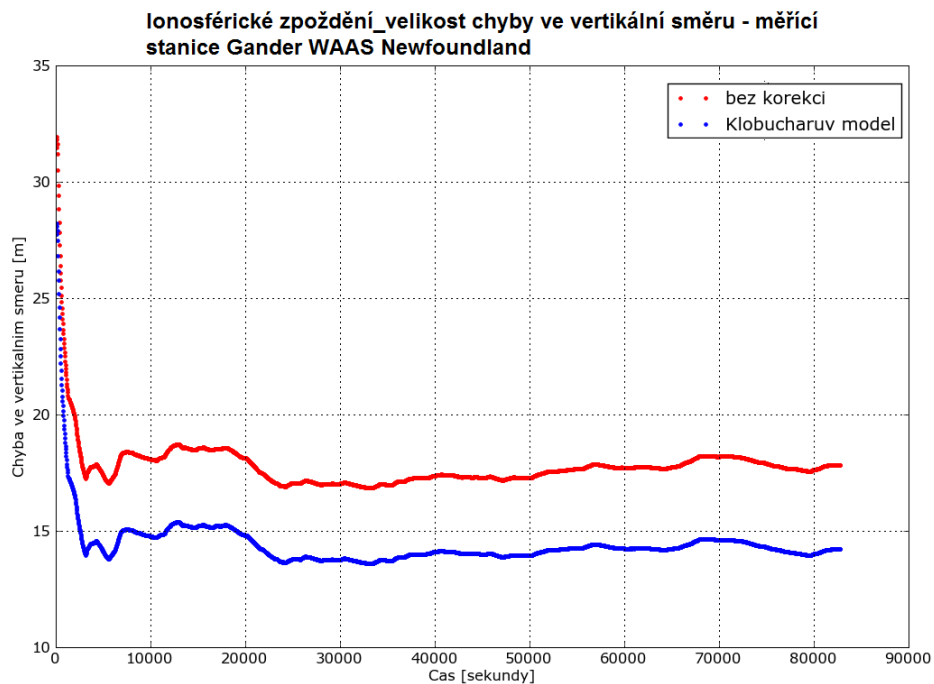
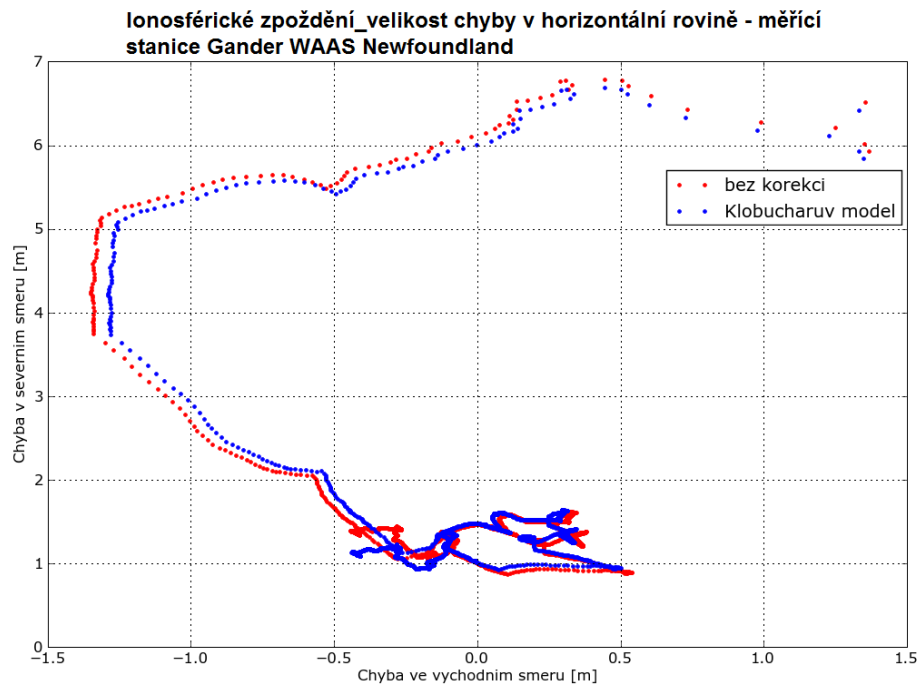
Naměřená data byla analyzována dle metodiky popsané v podkapitole 3.4.1. Data z obou měřících stanic uvedených v tabulce 13 mají shodnou periodu ukládání, jednu sekundu. Rozdíl mezi použitými daty spočívá v jejich délce. Data z referenční stanice Gander systému WAAS (Wide Area Augmentation System) mají celkovou délku 23 hodin. Tato délka byla zvolena s ohledem na zobrazení generovaných grafů v softwaru gLAB. V případech 24-hodinových záznamů nastávaly problémy se správným zobrazením časové osy ve výstupních grafech. Délka dat z měřící stanice firmy AŽD Praha s.r.o., v tabulce 11 označeno jako 2. měřící stanoviště, mají celkovou délku téměř 24 hodin. Exaktní délka a množství naměřených vzorků je uvedeno v tabulce 2.

U všech uvedených měřících případů v této podkapitole byly na data aplikovány korekce offsetu atomových hodin, korekce vlivu pohybu satelitu během doby šíření signálu k přijímači, korekce vlivu rotace Země během doby šíření signálu a korekce relativistického efektu.

Tabulka 13_Popis měřících stanovišť

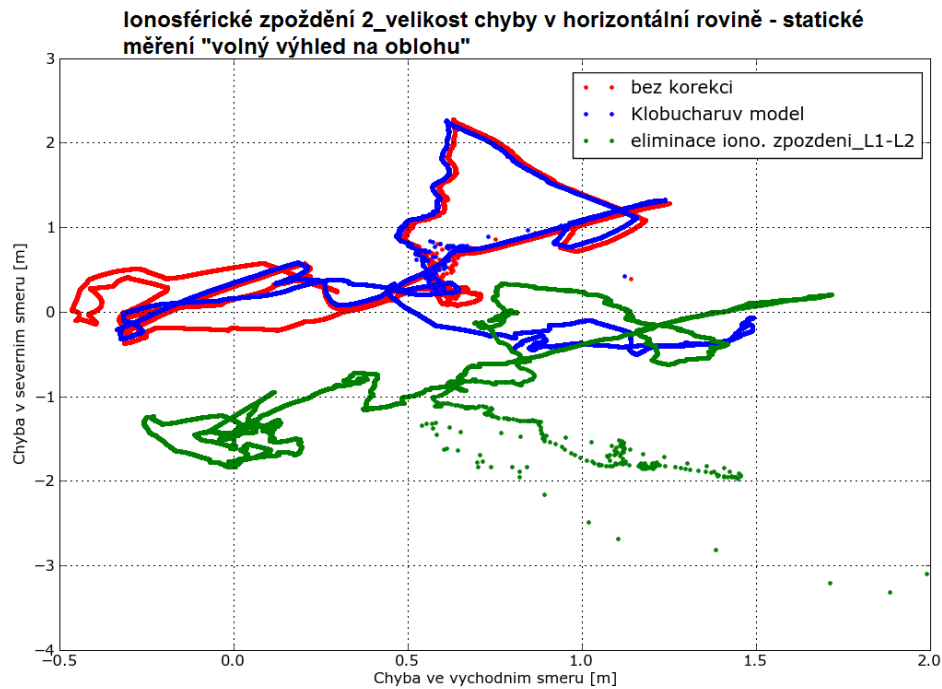
<i>Popis měřícího stanoviště</i>	<i>Zeměpisná délka</i>	<i>Zeměpisná šířka</i>	<i>Datum měření</i>
1)Referenční stanice systému WASS – Gander, Newfoundland a Labrador, Kanada	54°35'51.48"Z	48°57'59.39"S	13.6.2011
2)Statické měření – případ „volný výhled na oblohu“, Praha, ČR	14°29'29.55"V	50°3'30.58"S	13.11.2011

Následující grafy 23 a 24 zobrazují vliv ionosférického zpoždění na výslednou velikost chyby při výpočtu 3D polohy pro 1.měřící stanoviště a dále schopnost Klobucharova modelu toto zpoždění eliminovat. Z grafu 23, který znázorňuje velikost chyby v horizontální rovině je patrné, že vypočtené hodnoty jak bez korekcí, tak s korekcemi (Klobucharuv model), se od sebe příliš neliší. Rozdíl ve velikosti chyby jak ve východním, tak severním směru, se pohybuje v řádu jednotek až maximálně desítek centimetrů. Na grafu 24 je již patrná korekční schopnost Klobucharova modelu eliminovat vliv ionosférického zpoždění a to především ve vertikálním směru. Po celou dobu měření je vliv Klobucharova modelu téměř konstantní a zvyšuje přesnost výpočtu polohy ve vertikálním směru o tři až čtyři metry.

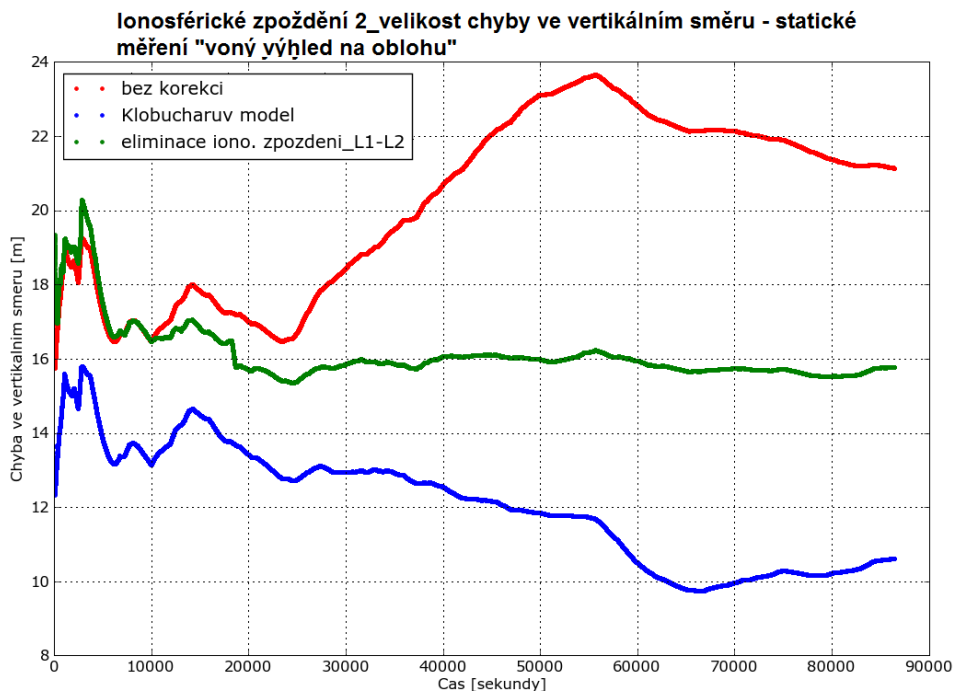


U 2.měřícího stanoviště docházelo k měření pomocí duální přijímače. Vzhledem k možnosti využití kódového měření L1 a L2 signálů a dále algoritmu pro eliminaci ionosférického zpoždění v softwaru gLAB, byla na data aplikována tato korekce. V grafech je označena jako "eliminace iono. zpozdění_L1- L2". Dále byl na změřena data aplikován klobucharův model.

Na grafech 25 a 26 si lze všimnout, že při aplikaci Klobucharova modelu je přesnost výpočtu polohy mnohem lepší, než při téměř 100% eliminaci vlivu ionosférického zpoždění. Z grafu 25 dokonce vyplývá, že je dosaženo větší přesnosti určení polohy v horizontální rovině bez použití korekcí, než při eliminaci ionosférického zpoždění. Vzhledem k teoretickým předpokladům my tyto závěry připadaly chybné a tudíž jsem se pokusil analyzovat data podrobněji.

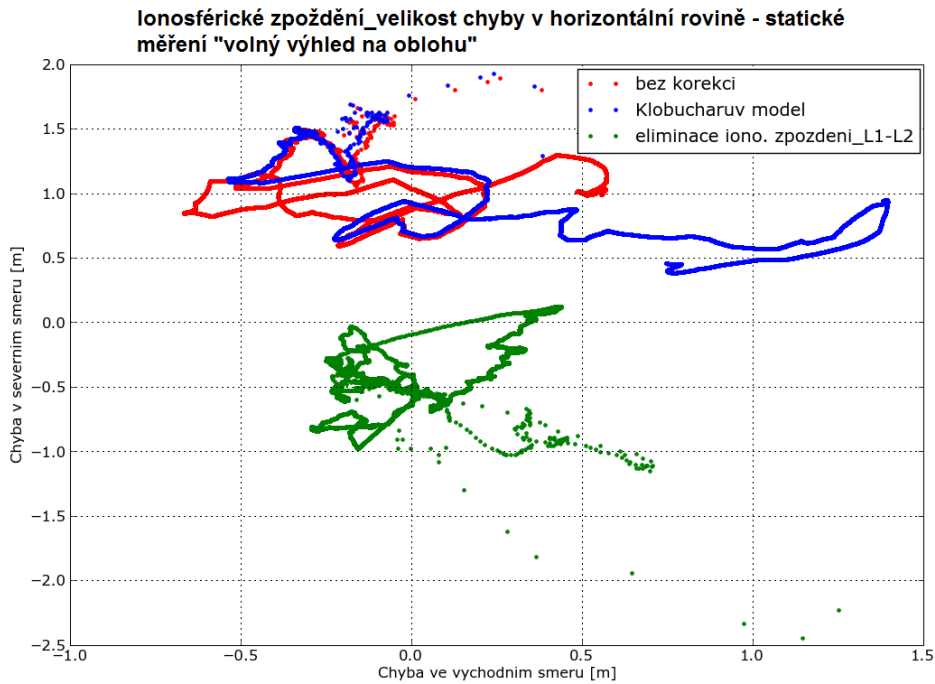


Graf 25

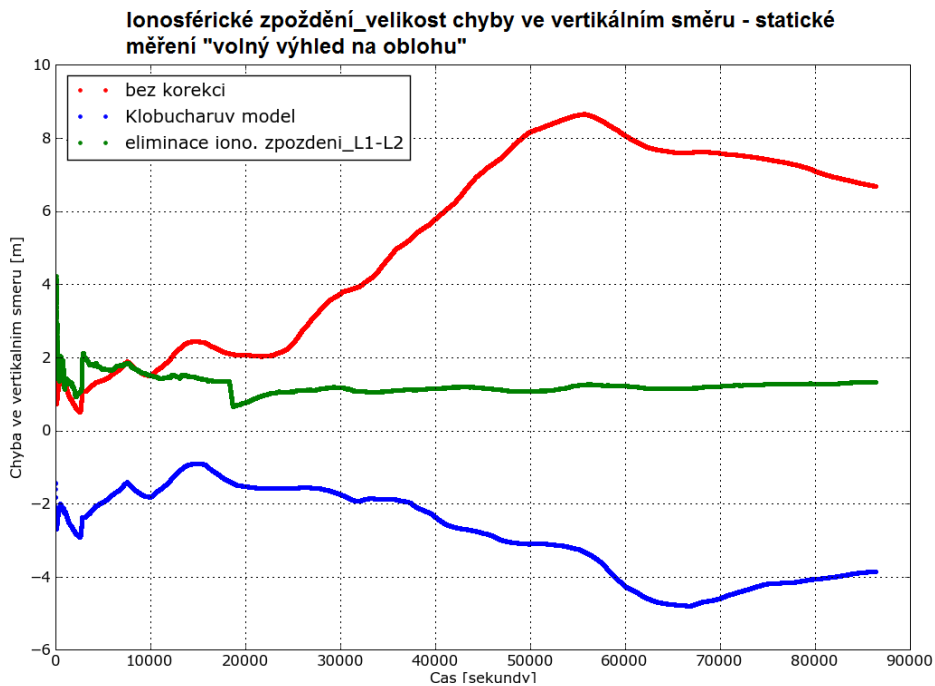


Graf 26

Při hledání příčiny, která může způsobit takovéto řekně nesmyslné výsledky, byla na data mimo výše zmíněné korekce aplikována i troposférická korekce v podobě Jednoduchého modelu. Výsledky jsou již mnohem přesvědčivější a jsou zobrazeny na grafech 27 a 28.

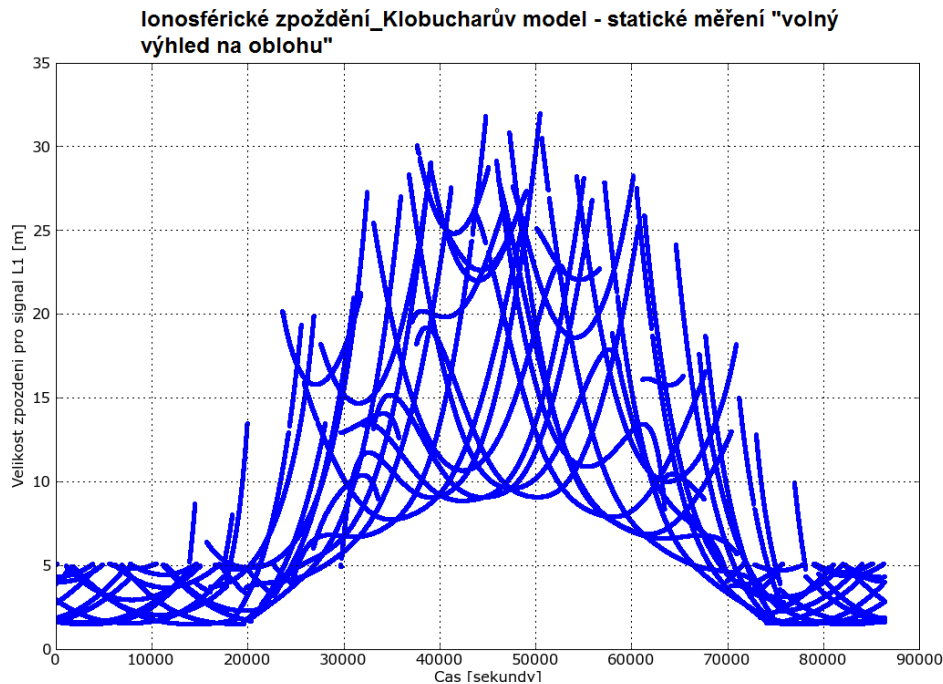


Graf 27



Graf 28

Z měřítek os na grafu 27 a velikosti chyby v horizontální rovině bez použití korekcí vyplývá, že se jedná o velice kvalitní a přesná data. Z tohoto důvodu není z grafů příliš dobře patrný vliv klobucharova modelu a eliminace ionosférického zpoždění pomocí L1 a L2. U grafu 28, který zobrazuje velikost chyby ve vertikální směru, je již situace odlišná. Při eliminaci vlivu ionosférického zpoždění pomocí L1 a L2 je velikost chyby ve vertikálním směru po téměř celou dobu měření totožná, a to zhruba 1,5 metru. Při použití klobucharova modelu se tato velikost chyby po většinu doby měření pohybuje v rozmezí 2 až 4 metrů. V případě dat, na které nebyly aplikovány žádné korekce, se velikost chyby pohybuje v rozmezí 0,5 až 8,5 metru.



Graf 29

Graf 29 ukazuje korekční schopnosti klobucharova modelu během 24 hodin. V podkapitole 2.1.1.2 je uvedena rovnice 29 pro výpočet velikosti ionosférického zpoždění. V této rovnici je nastaven konstantní offset na 5ns během noci, což odpovídá ionosférickému zpoždění 1,5 metru pro signál L1. Na grafu 29 je noc dle místního času zhruba od 0 do 15000 sekund a od 78000 do 86400 sekund. Tomu dle grafu 29 odpovídá velikost zpoždění pro L1 signál 5 metrů. Maximum vertikálního zpoždění je stanoveno na 14. hodinu místního času, avšak se může pohybovat v určitých mezích. Z grafu 29 vyplývá, že maximum odpovídá zhruba hodnotě 50000 sekund (13hodin 53minut 20sekund). Velikost maxima zpoždění okolo 14. hodiny místního času dosahovalo 32 metrů.

Shrnutí výsledků:

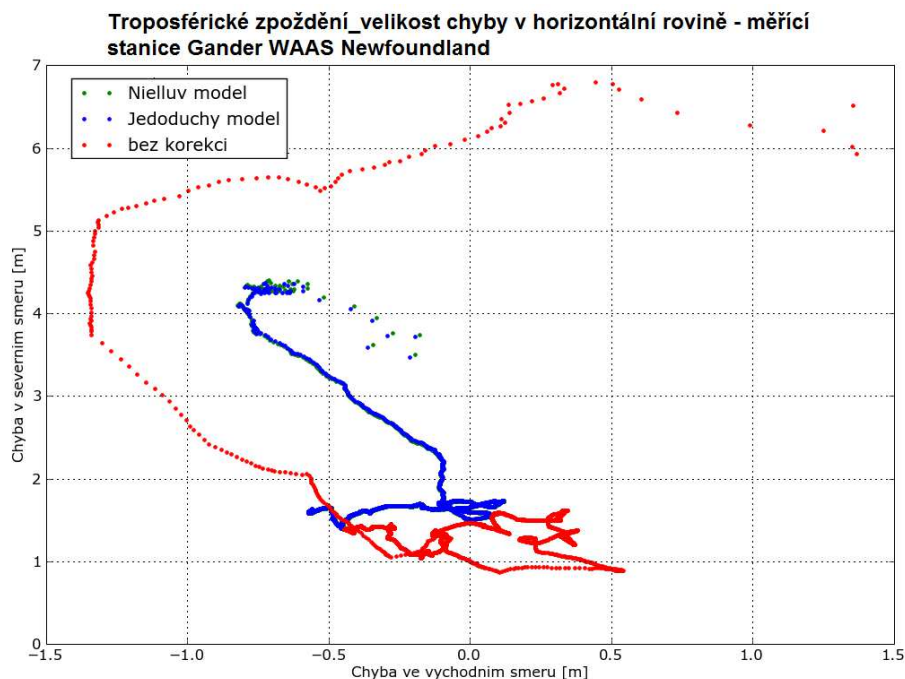
V podkapitole 4.3 byla ověřena korekční schopnost Klobucharova modelu eliminovat vliv ionosférického zpoždění při výpočtu polohy. Korekční schopnosti Klobucharova modelu se projevují především ve vertikálním směru, tedy v určení nadmořské výšky, kde docházelo ke zlepšení přesnosti v řádu jednotek metrů. V horizontální rovině se korekční schopnosti klobucharova modelu příliš neprojevily. Je však nutné brát v potaz vysokou kvalitu použitých dat. Při použití signálů L1, L2 a výše uvedeného

algoritmu nedocházelo k předpokládanému zvýšení přesnosti výpočtu polohy. Při následném zkoumání příčiny tohoto problému bylo zjištěno, že použitím troposférických korekcí dojde následně ke značnému zvýšení přesnosti výpočtu polohy. Velikost chyby v horizontální rovině se pohybovala okolo 1 metru, ve vertikálním směru asi 1,5 metru.

4.4 Vyhodnocení vlivu troposférického zpoždění

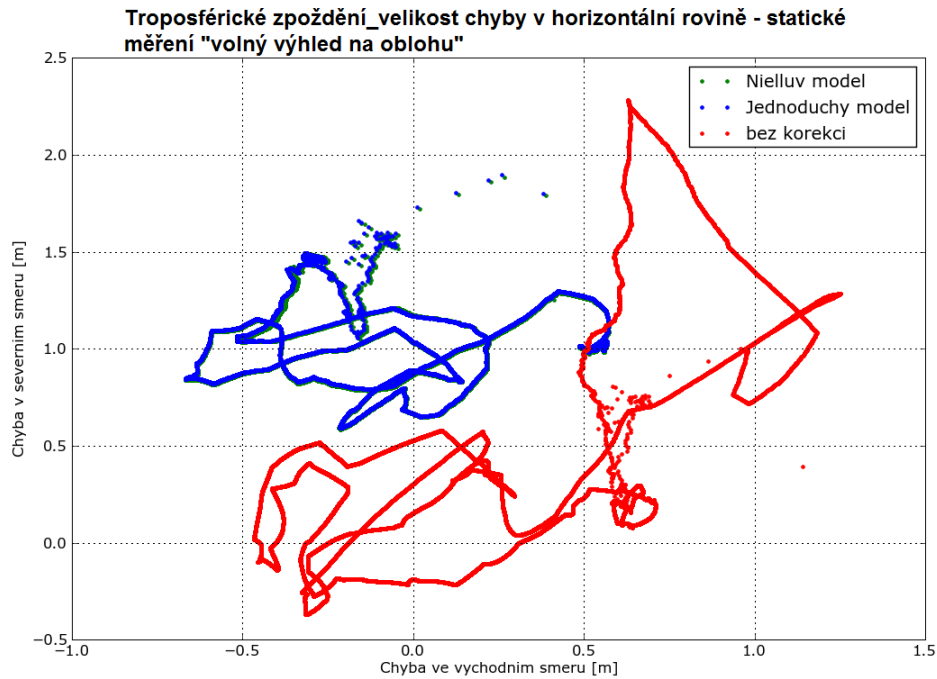
Naměřená data byla analyzována dle metodiky popsané v podkapitole 3.4.2. Použitá data mají stejné vlastnosti jako je popsáno na začátku podkapitoly 4.3. U všech analyzovaných dat v této podkapitole byly aplikovány korekce offsetu atomových hodin, korekce vlivu pohybu satelitu během doby šíření signálu k přijímači, korekce vlivu rotace Země během doby šíření signálu a korekce relativistického efektu.

Grafy 30 a 31 ukazují schopnost eliminace vlivu troposférického zpoždění na velikost chyby v horizontální rovině pomocí korekčních modelů uvedených v podkapitole 2.1.1.3. Na první pohled je patrné, že oba použité korekční modely vykazují téměř totožné výsledky. Ty se od sebe liší jen v několika málo případech a to velmi nepatrně v řádu jednotek centimetrů. Na grafu 30 je rozptyl chyby ve východním směru pro případ bez korekce asi 2,6 metru, naproti tomu při využití korekčních modelů je velikost tohoto rozptylu necelý metr. Rozptyl chyby v severním směru pro případ bez korekce odpovídá 6 metrům, za použití korekčních modelů je velikost tohoto rozptylu 3 metry.



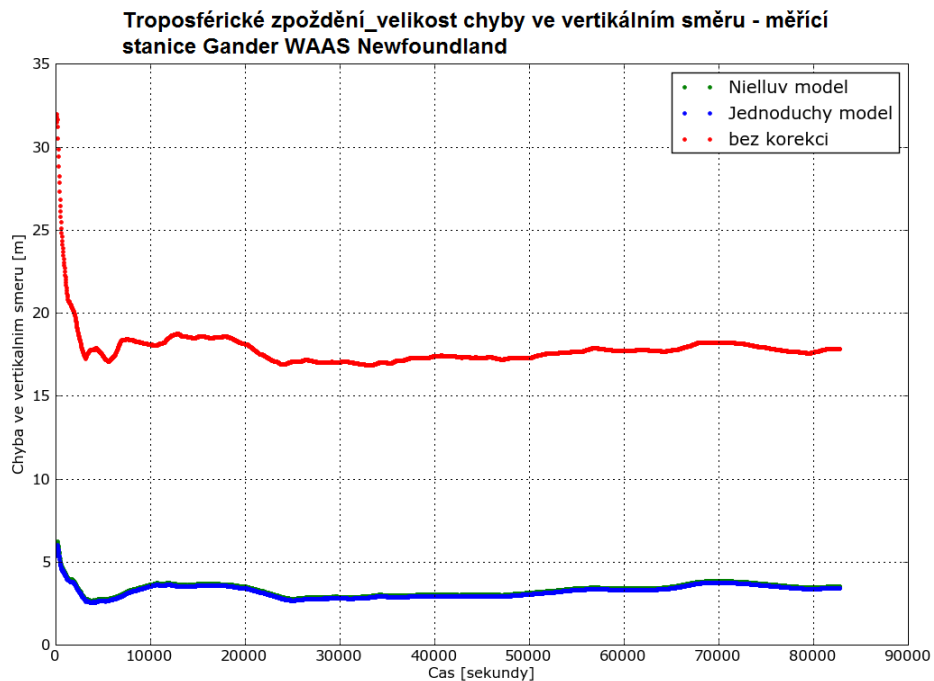
Graf 30

U grafu 31 je rozptyl chyby ve východním směru pro případ bez korekce asi 1,7 metru, naproti tomu při využití korekčních modelů je velikost tohoto rozptylu asi 1,3 metru. Rozptyl chyby v severním směru pro případ bez korekce je 2,7 metru, za použití korekčních modelů je velikost tohoto rozptylu 1,3 metru, tedy zhruba poloviční.

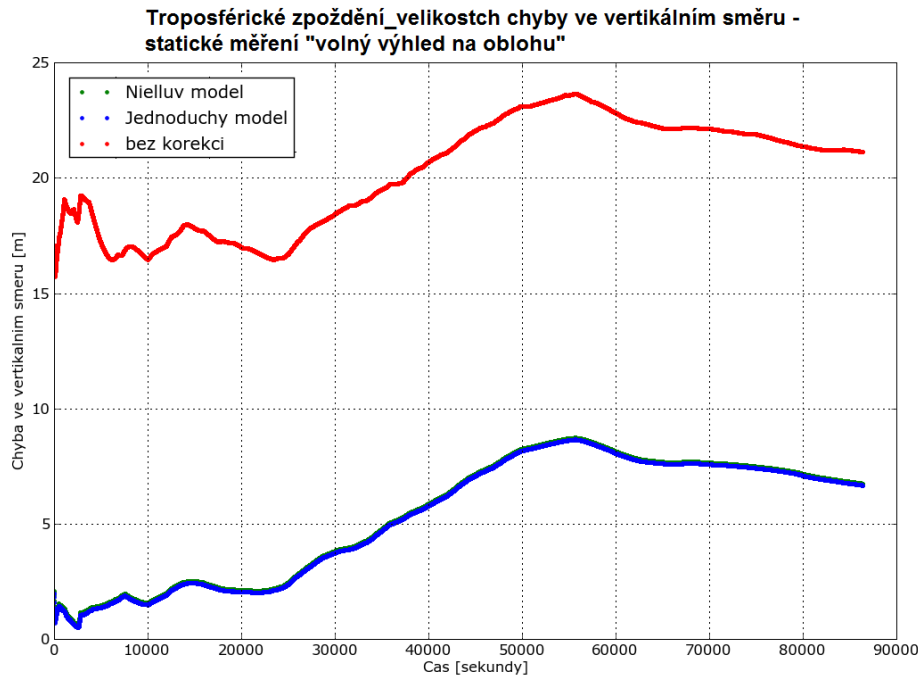


Graf 31

U grafů 32 a 33 je zobrazena korekční schopnost troposférických modelů ve vztahu k velikosti chyby ve vertikálním směru. Stejně jako u předešlých grafů (30 a 31), tak i zde u vyhodnocení velikosti chyby ve vertikálním směru, vykazují oba použité troposférické modely totožné výsledky. Rozdíl chyb ve vertikálním směru mezi daty, na které nebyl použit některý z korekčních modelů a na ty, na které byl použit korekční model, vychází pro obě měření velice podobně a to zhruba 15 metrů. Tato velikost je téměř po celou dobu měření konstantní.



Graf 32



Graf 33

Shrnutí výsledků:

Z výsledků uvedených v podkapitole 4.4 vyplývá, že při použití korekčních modelů dochází ke značnému zvýšení přesnosti výpočtu polohy. Oba použité troposférické korekční modely vykazovaly téměř totožné výsledky. V horizontální rovině se zvýšila přesnost výpočtu polohy v řádu desítek centimetrů. Korekční schopnost se projevuje především ve vertikálním směru, kde docházelo u obou měření ke zvýšení přesnosti výpočtu polohy asi o 15 metrů.

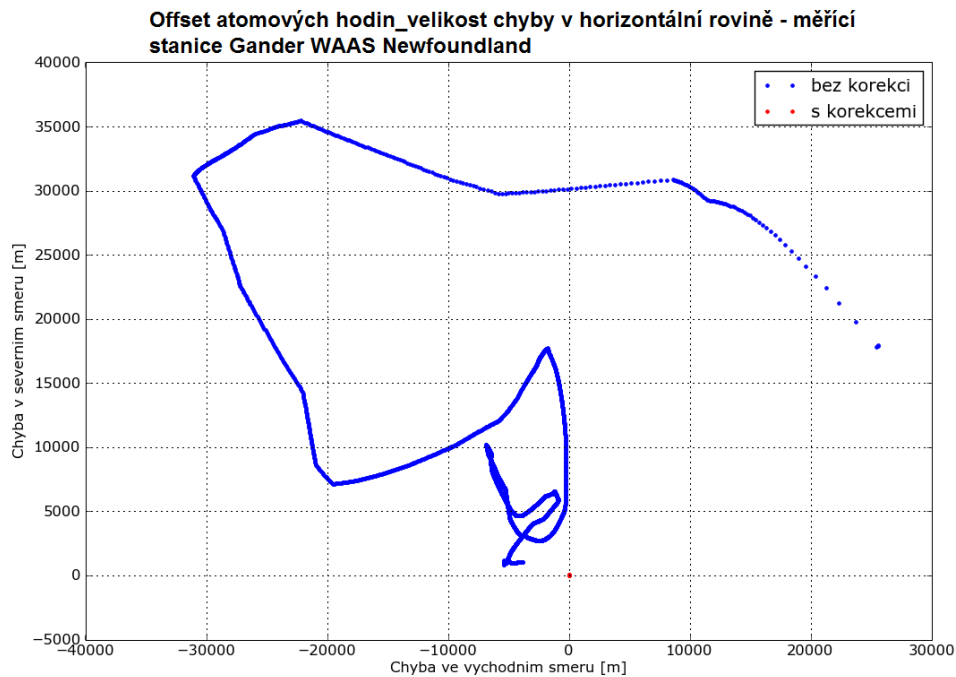
Vzhledem k údajům uvedeným v [1] zabývajících se různými stavy atmosféry (déšť, sníh, atd.) a jejich dopadem na přesnosti výpočtu polohy, nebylo provedeno praktické ověření. V literatuře je totiž uvedeno, že většina troposférického zpoždění, asi 90%, působí na GPS signály při "suché" atmosféře. Tudíž za těchto předpokladů a znalostí získaných z výše uvedených výsledků jsem zbylým 10% nepřikládal velkou důležitost.

4.5 Vyhodnocení vlivu nestálosti atomových hodin

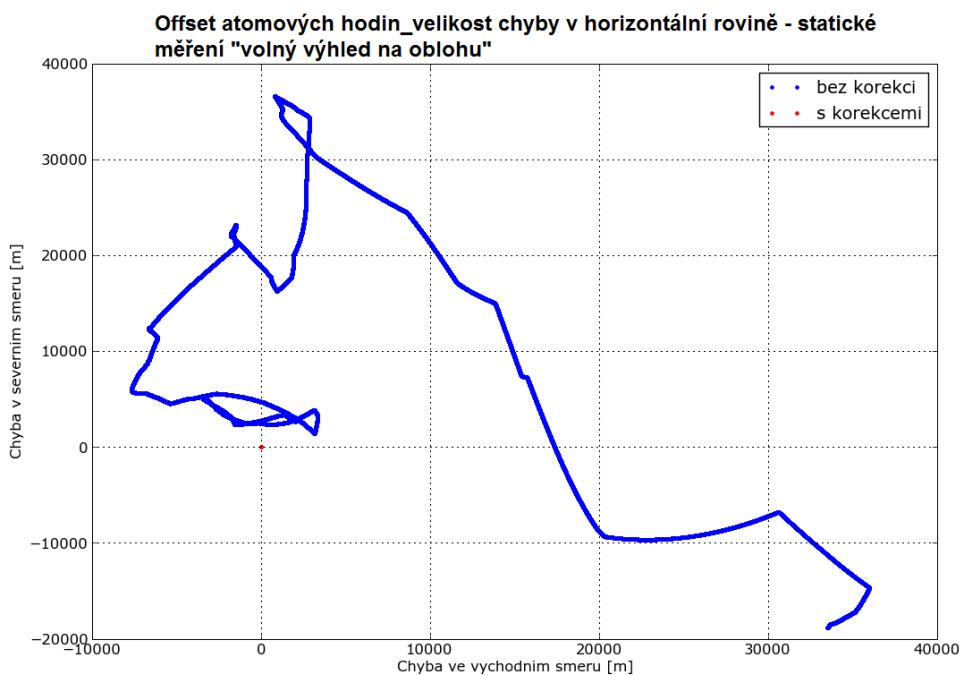
Naměřená data byla analyzována dle metodiky popsané v podkapitole 3.5. Použitá data mají stejné vlastnosti jako je popsáno na začátku kapitoly 4.3. U všech analyzovaných dat v této podkapitole byly aplikovány korekce vlivu pohybu satelitu během doby šíření signálu k přijímači, korekce vlivu rotace Země během doby šíření signálu a korekce relativistického efektu.

Graf 34 a 35 zobrazuje vliv offsetu atomových hodin na velikost chyby výpočtu polohy v horizontální rovině. Jak je z grafů patrné, při použití korekcí, které jsou přenášeny v navigační zprávě, je velikost chyby v horizontální rovině nulová vůči naměřeným datům, na které nebyly korekce použity. Ve skutečnosti tato hodnota není nulová, viz. předchozí výsledky, avšak vzhledem k hodnotám vneseným na osách se jeví jako nulová. Z grafu 34 vyplývá, že celkový rozptyl chyby ve východním směru

bez použití korekcí dosahuje téměř 60km, v severním směru asi 35km. U grafu 35 je rozptyl velikosti chyby ve východním směru asi 43km a v severním směru 56km.

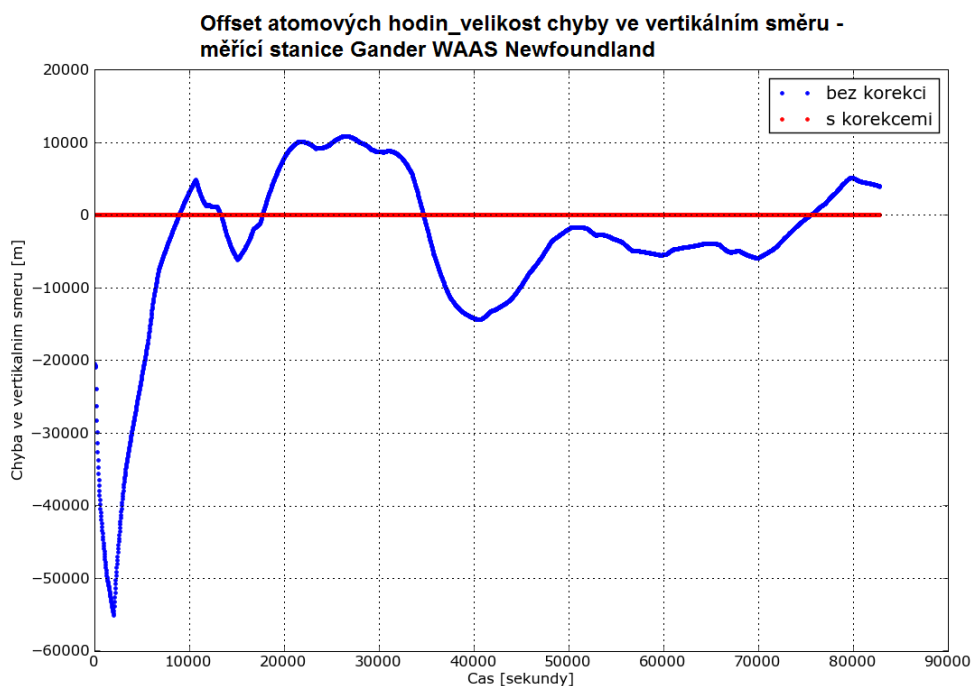


Graf 34

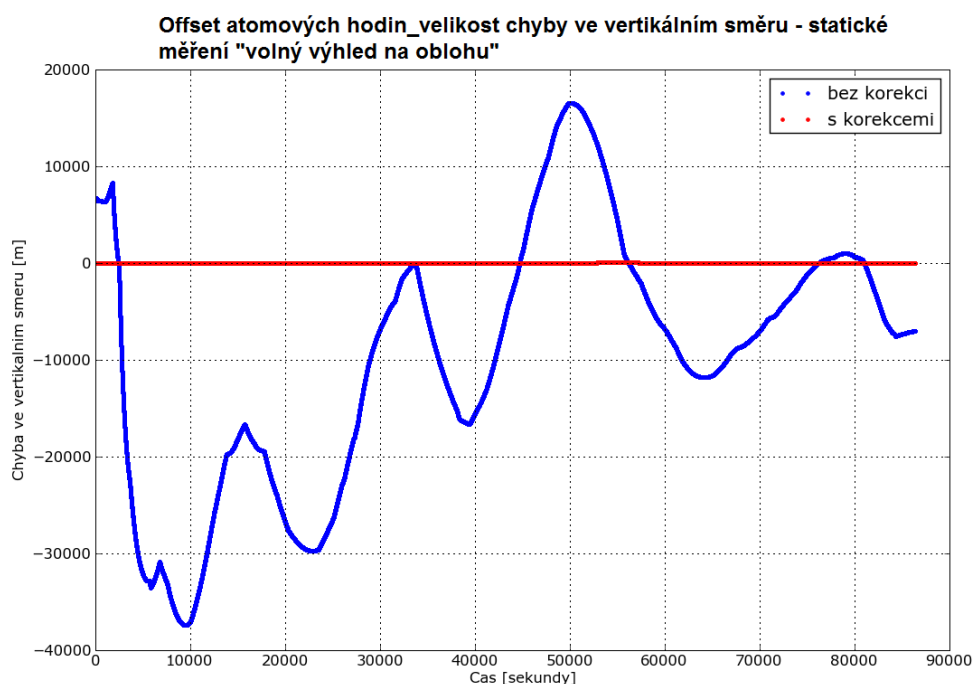


Graf 35

Na následujících grafech 36 a 37 je zobrazen vliv offsetu atomových hodin na velikost chyby výpočtu polohy ve vertikálním směru. Velikost chyby při použití korekcí vůči velikosti chyby bez použití korekcí se opět jeví jako nulová. Rozptyl velikosti chyby ve vertikálním směru bez použití korekcí u grafu 36 dosahuje 65km, u grafu 37 je tato hodnota rovna 55 km.



Graf 36



Graf 37

Shrnutí výsledků:

Jak je z údajů uvedených v podkapitole 4.5 patrné, jedná se o vliv, který způsobuje chybu ve výpočtu polohy v řádu jednotek až desítek kilometrů. Z toho vyplývá, že je nezbytné používat korekce atomových hodin při všech prováděných výpočtech polohy. Lze také předpokládat, že v případech, kdyby docházelo ke zhoršení přesnosti výpočtu polohy v řádu jednotek až desítek kilometrů, je na vině s největší pravděpodobností offset atomových hodin.

5. Návrh metod pro potlačení nepříznivých vlivů

Tato kapitola částečně navazuje na závěry uvedené v kapitole 4. Jsou zde představeny možné systémové opatření, které by minimalizovaly dopad působících vlivů na výpočet polohy pomocí GPS na minimum. V poslední podkapitole je uvedeno několik možných řešení, jak zvýšit integritu systému GNSS vlakového lokátoru.

5.1 Technická opatření eliminující působení nepříznivých vlivů

5.1.1 Možná opatření eliminující vliv maskování satelitních signálů

Hlavním důvodem proč eliminovat vliv maskování je především zvýšení dostupnosti dostatečného počtu satelitních signálů pro výpočet polohy a z toho plynoucí možnost kontinuální lokalizace železničního vozidla. Jediným možným opatřením, jak eliminovat vliv maskování je odstranění husté vegetace nebo některých objektů v blízkém okolí železniční tratě. Proto jsou v této podkapitole uvedeny i prostředky pro zvýšení dostupnosti navigační služby.

Mezi tyto prostředky patří tzv. "multisystémové přijímače", který umožňuje zpracovávat signály a využít je pro výpočet polohy hned od několika globálních navigačních systémů. Druhou možností je použití tzv. "hybridního systému", který slučuje inerciální navigaci s GNSS. Dále lze využít systému DGPS (Differential Global Positioning System) pro zvýšení počtu satelitů.

Multisystémový přijímače

Jak již bylo zmíněno, jedná se o zařízení, umožňující zpracovávat signály od různých globálních navigačních systémů a následně je využít pro výpočet polohy. V současnosti jsou v plném provozu dva GNSS systémy, konkrétně GPS a Glonass. V blízké budoucnosti by k těmto systémům měl přibýt i systém Galileo.

Využití několika GNSS systémů má výhodu ve značném zvýšení počtu viditelných satelitů na obloze. Využití této koncepce by potencionálně mohlo vést ke zvýšení dostupnosti dostatečného počtu satelitních signálů pro výpočet polohy i v kritických oblastech z pohledu maskování. Dalšími výhodami této koncepce je možné zvýšení robustnosti a integrity celého systému. Některé multisystémové přijímače lze nalézt v [25]. Předpokládám, že tento přístup by byl z pohledu zvýšení dostupnosti navigační služby efektivní a také finančně nejméně náročný.

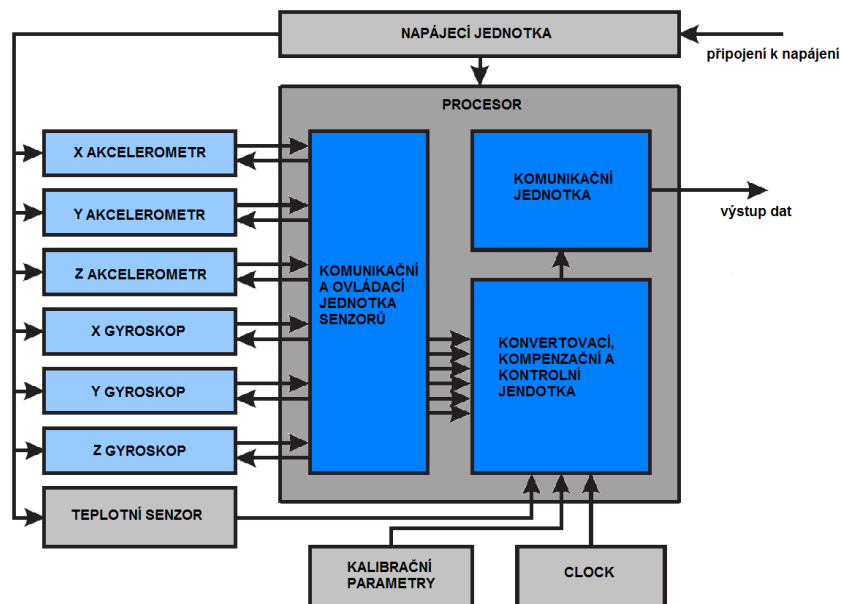
GNSS a inerciální navigace

Tato koncepce je založena na principu vzájemné spolupráce GNSS a inerciální navigace při výpočtu polohy v rámci dané aplikace. V případě maskování satelitních signálů, kdy v dané aplikaci není samotný GNSS schopen provést výpočet polohy, jsou do navigačních rovnic použity informace z inerciální navigace. V oblastech jako jsou mosty nebo dlouhé tunely je prakticky nemožné využít GNSS ke kontinuálnímu určení polohy železničního vozidla. V těchto případech je využití inerciální navigace nezbytné. Největší výhodou této koncepce je především zvýšení kontinuity lokalizace železničního vozidla a také i možné zvýšení integrity celého systému.

Inerciální navigace je založena na měření několika veličin jako jsou zrychlení, rychlost, vzdálenost a náklon. Zrychlení, rychlost a ujetou vzdálenost lze určit pomocí akcelerometru. Ten měří zrychlení a při následné integraci lze určit jak rychlost, tak ujetou vzdálenost. U železničních vozidel se běžně místo akcelerometru setkáme s odometrem. Pro účel navigace v souřadném systému, tedy znalosti směru jízdy je využít gyroskop, který měří náklon od své referenční osy.

Inerciální navigace jako taková je již mnoho let využívána v různých oblastech, například slouží pro navádění raket krátkého doletu, či v automobilech při vystřelení airbagu a dalších aplikacích. Její vlastnosti jsou proto dobře známé. Mezi její přednosti patří nezávislost na okolním prostředí a tedy odolnost vůči vnějším vlivům, vysoká pohotovost, vysoká četnost výstupu hodnot (>50Hz) a také odolnost proti krátkodobým nepřesnostem. Nicméně tento druh navigace má také své záporné vlastnosti, mezi které patří především zhoršující se přesnost navigačního řešení s dobou měření. Jinými slovy inerciální navigace vykazuje značný drift. Na začátku každého měření je také zapotřebí provést nastavení počáteční polohy v souřadném systému. Na kvalitu navigačního řešení má vliv samotná kvalita použitých senzorů. Ta je značně závislá na ceně, která se může pohybovat v řádu stovek euro až stovek tisíc euro [3].

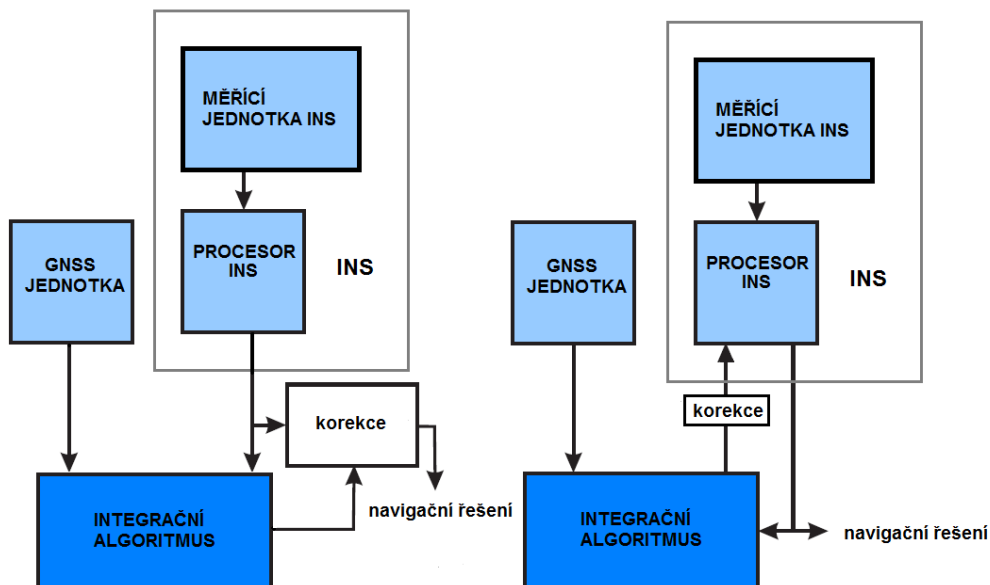
Na následujícím obrázku 39 je znázorněno blokové schéma typické měřicí jednotky inerciální navigace. Lze si všimnout, že v levé části se nachází 3 akcelerometry a 3 gyroskopy. Tento přístup je nutný vzhledem k použití pro plně trojrozměrné navigační řešení. Vzhledem k množství použitých senzorů je zapotřebí provést analýzu vhodnosti senzorů určité kvality a ceny, s ohledem na přesnost navigačního řešení.



Obrázek 39_Typické blokové schéma měřicí jednotky inerciální navigace - převzato s úpravami z [3]

U této koncepce jde především o komplementaritu samotných systémů. GNSS eliminuje vliv driftu INS (Inertial Navigation System) tím, že provádí častou kalibraci INS. Naopak inerciální navigace umožňuje provádět navigační řešení i v případech, kdy u GNSS není dostupné dostatečné množství satelitních signálů. Obecně lze říci, že dochází k porovnávání navigačních řešení jednotlivých systémů, z kterých

vzejdou korekční parametry, upravující navigační řešení inerciální navigace. Konkrétní volba architektury je závislá na použitých korekčních parametrech, na druhu měření pomocí GNSS (kódové, fázové) a na HW-konfiguraci. Otázku volby konkrétní architektury je nutné podrobně analyzovat. Na obrázku 40 jsou jako příklad znázorněny dvě možné architektury hybridního systému. Další informace o inerciální navigaci a koncepci "hybridního systému" lze nalézt v [3]. Tato koncepce umožňuje poskytovat informaci o poloze i v oblastech, kde dochází ke značnému blokování satelitních signálů a tudíž, kde GNSS nemůže být využita.

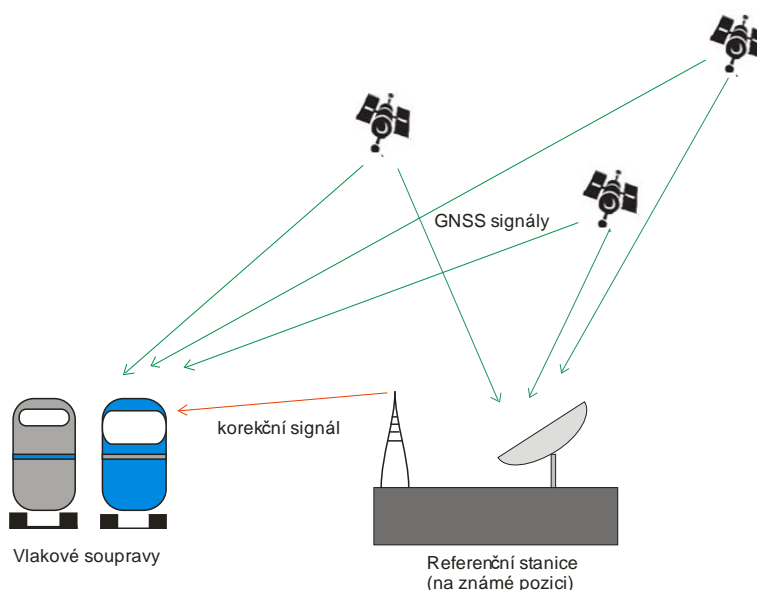


Obrázek 40_Možné architektury hybridního systému navigace - převzato s úpravami z [3]

DGPS

Základní ideou použití DGPS je snížení nebo dokonce odstranění některých nepříznivých vlivů, které působí stejnou měrou na všechny uživatele v dané oblasti. Mezi tyto vlivy patří nepřesnost atomových hodin, chyba efemerid a chyby způsobené průchodem signálů od satelitů k přijímači.

Na obrázku 41 je uvedeno obecné schéma DGPS. Satelitní signály jsou přijímány přijímačem jak na vlakové soupravě, tak přijímačem referenční stanice, u kterého je známá přesná poloha. V referenční stanici se provede výpočet rozdílu přesné a změřené polohy a z těchto údajů jsou vytvořeny korekční parametry. Ty jsou pomocí rádiových vln (korekční signál) vysílány k vlakové soupravě, kde dojde k úpravě navigačního řešení s použitím těchto korekcí, což vede k přesnějšímu výpočtu polohy.



Obrázek 41_Obecné schéma DGPS

System DGPS lze rozdělit na LADGPS (Local-Area DGPS), který slouží pro šíření korekcí na omezeném území v řádu desítek až stovek kilometrů a na WADGPS (Wide-Area DGPS), který slouží pro šíření korekcí na velmi rozlehlém území, například celém kontinentu. K pokrytí celého kontinentu korekčním signálem se využívá několika satelitů na specifických orbitách, tak aby bylo docíleno kontinuálního pokrytí daného území. Mezi zástupce WADGPS patří například systémy WAAS a EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System).

S pohledu zvýšení dostupnosti satelitních signálů je nezbytné, aby přijímač umožňoval příjem signálů od některého z WADGPS systémů, tak aby bylo možné provádět výpočet pseudovzdálenosti mezi přijímačem a satelity WADGPS. Na území České Republiky je možné přijímat korekční signály od systému EGNOS, avšak tyto signály je možné použít jen pro korekci výše zmíněných vlivů. Tzv. "ranging" funkce, tedy možnost provádět výpočty pseudovzdálenosti mezi přijímačem a satelity systému EGNOS není v současnosti podporována [26]. Například systém WAAS tuto funkci podporuje [27]. Použití tohoto přístupu na území České Republiky nemá v současnosti z pohledu zvýšení dostupnosti navigační služby žádné uplatnění.

5.1.2 Možná opatření eliminující vliv ionosférického a troposférického zpoždění

Korekční modely

Eliminace atmosférických vlivů je důležitá především z pohledu přesnosti výpočtu polohy. Základním řešením je použití korekčních modelů, viz. kapitola 2, které do jisté míry snižují působení ionosféry a troposféry na satelitní signály. V podkapitolách 4.3 a 4.4 jsou uvedeny výsledky měření (ovlivnění přesnosti výpočtu polohy) s použitím korekčních modelů. Použití korekčních modelů při výpočtu polohy lze doporučit. Jejich výhodou je snadnost implementace, zvýšení přesnosti výpočtu polohy a ne příliš značné finanční náklady.

Lokální referenční stanice

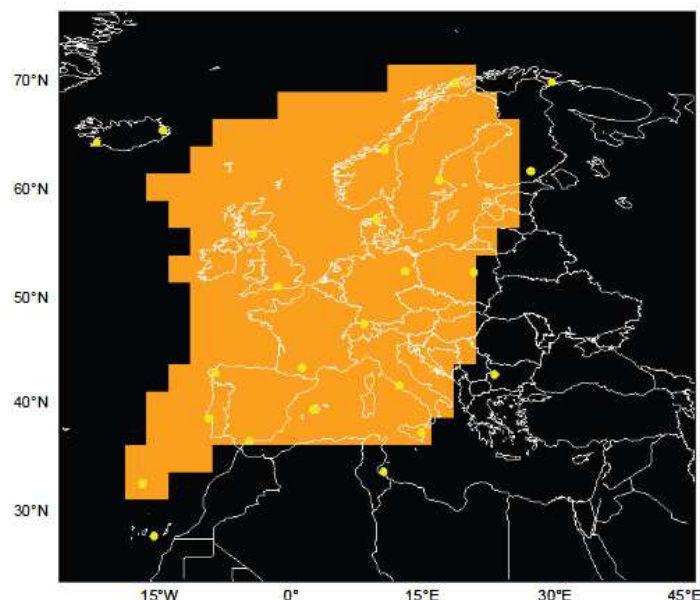
Dalším možným řešením je použití LADGPS. Konkrétně se jedná o umístění referenční stanice nebo několika referenčních stanic na území České Republiky. Referenční stanice se nachází na exaktně známé pozici a provádí jednak měření polohy pomocí GPS a dále meteorologická měření. Po vyhodnocení všech údajů týkajících se ionosférického a troposférického zpoždění nad daným územím vytvoří korekční parametry, které pomocí rádiového spojení (přímý rádiový spoj, GSM, internet) zasílá přímo na železniční vozidlo. Použití tohoto přístupu by mohlo vést ke značné eliminaci atmosférických vlivů. Avšak vybudování referenční stanice (stanic) by bylo finančně velice náročné.

Duální přijímač

Vliv ionosférického zpoždění lze téměř 100% eliminovat použitím duálního přijímače a implementací algoritmu, viz. vztah 32 v podkapitole 2.1.1.2. Výhodou je snadnost implementace a zvýšená přesnost výpočtu polohy, nevýhodou je především vyšší cena GPS přijímače.

EGNOS

Posledním možným opatřením jak snížit vliv ionosférického zpoždění je využití korekcí poskytovaných systémem EGNOS. Tento systém zahrnuje zhruba 40 monitorovacích stanic na území Evropy a 3 satelity, které svými korekčními signály pokrývají celý evropský kontinent. Tyto korekční signály přenášejí přesné údaje o offsetu atomových hodin, o drahách pohybu satelitů a současném stavu ionosféry nad daným územím.



Obrázek 42_Mapa EGNOS - převzato s úpravami z [26]

System EGNOS nabízí 3 služby, kde pro účely eliminace ionosférického zpoždění v reálném čase je zřejmě nejvhodnější služba Open Service (OS). Z dokumentu [26] vyplývá, že na území ČR je minimální dostupnost při využití služby OS 99% při celkové chybě určení polohy ve vertikálním směru - 4m a v horizontálním směru - 3m. Obrázek 42 zobrazuje mapu, ve které jsou tyto parametry splněny a prokázány dlouhodobým měření.

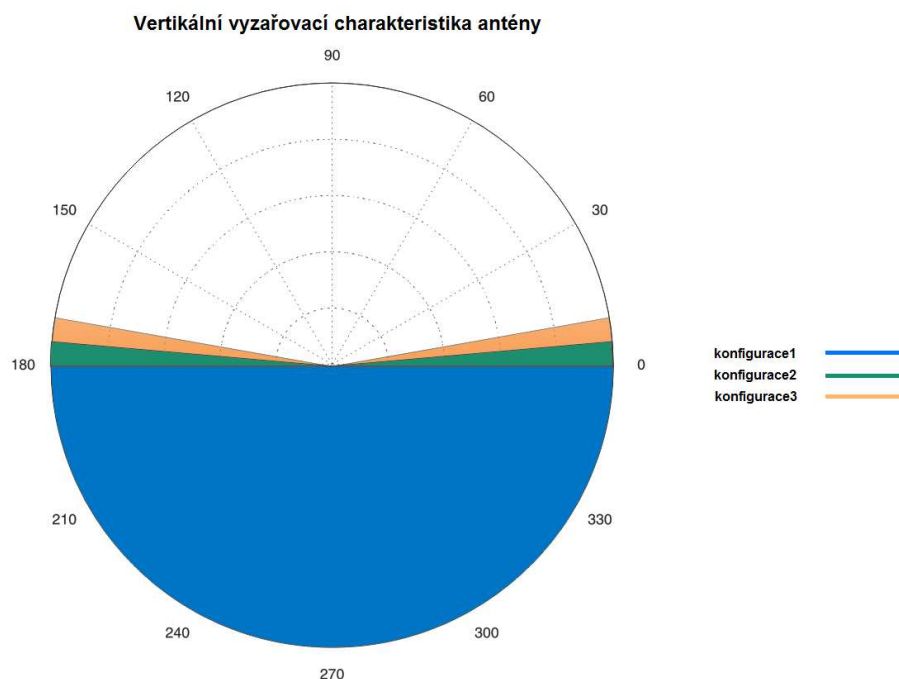
Využití tohoto přístupu by nejen minimalizovalo vliv ionosférického zpoždění, ale také by snížilo velikost chyby způsobenou nestálostí atomových hodin a chybou efemerid. Výhodou je snadnost implementace, kdy je zapotřebí pouze přijímač podporující EGNOS signály a dále vyšší přesnost výpočtu polohy. Finanční náklady u tohoto přístupu jsou minimální.

5.1.3 Možná opatření eliminující vliv mnohacestného šíření

Eliminovat vliv mnohacestného šíření v oblastech, které tento nepříznivý vliv postihuje, lze dvěma způsoby. Jednak vhodným návrhem antény, především úpravou vyzářovací charakteristiky a dále vhodným HW-návrhem přijímače, zejména úpravou korelátoru.

Anténa

Nejjednodušším a neúčinnějším opatřením je umístění antény do místa, kde nedochází k odrazům. To však s ohledem na různorodost prostředí okolo železničních tratí není možné. Předpokládám, že anténa bude umístěna na střeše železničního vozidla. Dalším předpokladem je, že značné množství reflexních povrchů jako jsou například vodní plochy, nižší objekty, nebo ostatní železniční vozidla budou v úrovni antény, nebo spíše pod ní. Z tohoto důvodu je zapotřebí upravit směrovou charakteristiku antény tak, aby signály přicházející z pod úrovně antény byly utlumeny. Na obrázku 43 je tento případ označen jako konfigurace1.



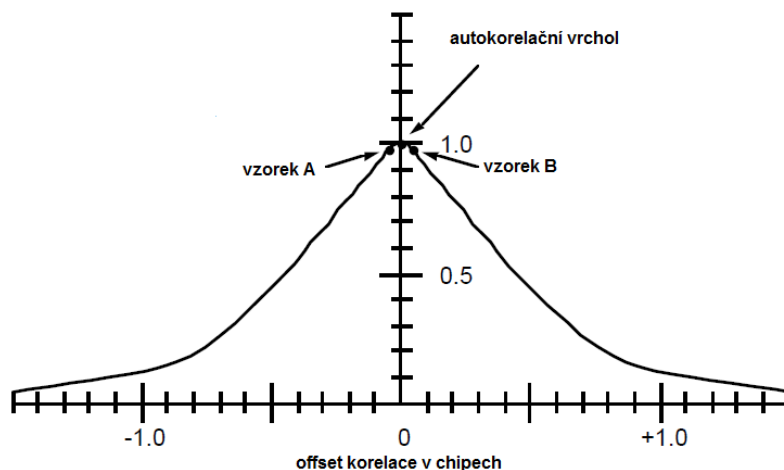
Vyzařovací charakteristiku lze také upravit tak, že nebudou přijímány signály od satelitů na nízkých elevačních úhlech. Například konfigurace2 (5° elevační maska) nebo konfigurace3 (10° elevační maska), viz. obrázek 43.

Anténa použitá pro příjem GPS signálů by měla být navržena jako RHCP. Při změně polarizace vlivem odrazů by tak z vlastní podstaty došlo ke značnému útlumu příchozích signálů s LHCP.

Korelátor

Z údajů uvedených v podkapitole 2.1.5 vyplývá, že návrh korelátoru, konkrétně tzv. korelační vzdálenost má značný vliv na omezení působení mnohacestného šíření. Čím je totiž korelační vzdálenost mezi vzorky A a B na obrázku 44 menší, tím je dosahována vyšší odolnost vůči mnohacestnému šíření. Z tohoto důvodu je vhodné použít autokorelační funkci s tzv. úzkým korelačním vzorkováním, viz. obrázek 44. Vhodné je také použít korelátor s vysokou strmostí průběhu autokorelační funkce s ohledem na pokud možno co nejvyšší jednoznačnost shody sekvencí.

Autokorelační funkce s úzkým korelačním vzorkováním



Obrázek 44_Autokorelační funkce s úzkým korelačním vzorkováním

Vzdálenost mezi vzorky A a B je vhodné nastavit na 0,1 chipu, nižší korelační vzdálenost již nepřináší další zlepšení. Vyšší strmosti průběhu je docíleno rozšířením šířky frekvenčního pásma vstupního filtru. Při volbě šířky frekvenčního pásma vstupního filtru musí být brán ohled na změnu vzorkovací frekvence a na možnost interference od dalších telekomunikačních systémů [4].

5.2 Návrh možných opatření vedoucích k zajištění potřebné úrovně integrity

V této podkapitole je uvedeno několik řešení, vedoucích k možnému zvýšení integrity bezpečnosti GNSS vlakového lokátoru. Na začátku návrhu zařízení sloužícího pro bezpečnostní aplikace v železniční dopravě je nutné definovat bezpečnostní požadavky zahrnující jak požadavky na funkční bezpečnost, tak na integritu bezpečnosti. Tyto bezpečnostní požadavky mohou být různé pro jednotlivé aplikace, avšak obvykle je vyžadována co nejvyšší úroveň integrity bezpečnosti, označována jako úroveň 4 (SIL4), viz. [28]. GNSS přijímače obecně uživateli poskytují informaci s

úrovni integrity bezpečnosti 0 (SIL 0), což poukazuje na to, že se jedná o zařízení, na které nejsou kladeny žádné bezpečnostní požadavky. Více o požadavcích na GNSS vlakový lokátor lze nalézt v [29].

Proto, aby výstupní informace z GNSS přijímače byly důvěryhodné, dosahovaly pokud možno co nejvyšší úroveň SIL, je nutné zavést jistá opatření. Výskyt náhodných a systematických poruch u systémů GNSS může vzniknout v několika rovinách. Jednou z těchto rovin jsou samotné družice a ostatní pozemní součásti družicového navigačního systému. Provozovatelé GNSS neručí za funkčnost a tudíž i spolehlivost těchto systémů. Výjimkou může být služba SoL (Safety of Life) poskytovaná systémem EGNOS [30], více v následující části. Další rovinu tvoří vlivy působící na GNSS signály, a to jak při průchodu od družic k přijímači, tak v okolí samotného přijímače. Poslední rovina se týká technické bezpečnosti přijímače.

a) Řešení spolehlivosti a bezpečnosti signálů vysílaných družicemi, tzv. SIS (Signal In Space)

Jak již bylo výše zmíněno, provozovatelé GNSS nejsou schopni poskytovat informace o spolehlivosti a důvěryhodnosti vysílaných signálů. Varování při selhání jistých částí systému mohou poskytovat pomocí tzv. "Health Messages". Tyto varovné informace může však uživatel indikovat až po několika hodinách od selhání systému, což není v železničních bezpečnostních aplikacích myslitelné [31]. Možným řešením jak dosáhnout jisté úrovně integrity SIS je využití systému EGNOS, konkrétně služby SoL, která byla navržena s ohledem na bezpečnostně-relevantní aplikace v avionice. Tato služba poskytuje varování při selhání systému nebo jeho části maximálně do 6 sekund s rizikem ztráty integrity $2 \cdot 10^{-7}$ /operace přistání. Více informací lze nalézt v [30].

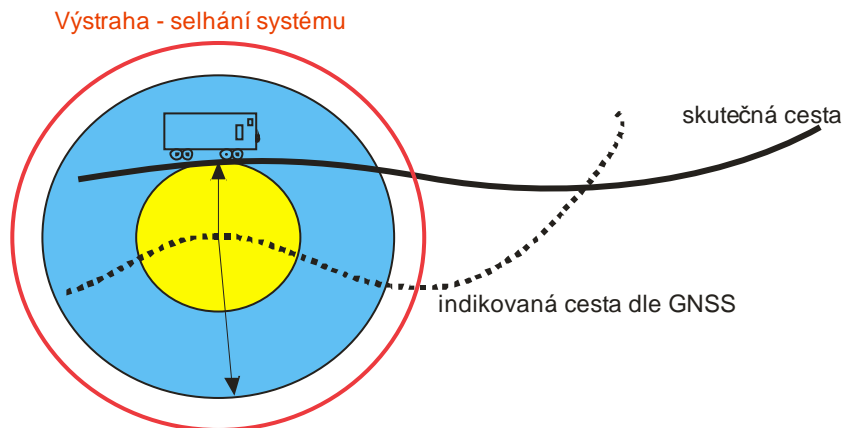
Dalším možným řešením je vytvoření lokálních referenčních stanic stejně jako je uvedeno v podkapitole 5.1.2. Tyto referenční stanice by prováděly měření a vyhodnocování kvality příchozích signálů z GNSS. Pomocí rádiového spoje by poskytovaly přijímačům umístěným na železničním vozidle informaci o důvěryhodnosti SIS.

Z pohledu použitelnosti služby SoL systému EGNOS je zapotřebí provést důkladnou analýzu, zda poskytované služby navržené pro avioniku jsou dostatečné i pro bezpečnostně-relevantní aplikace na železnici. V případě, že se prokáže nedostatečná úroveň bezpečnosti SIS pomocí výše uvedené služby bude zřejmě nezbytné přistoupit k druhé možnosti, kterou je vybudování pozemních referenčních stanic. Tento druhý přístup je mnohem více komplikovaný, především z pohledu lidských a finančních zdrojů. Avšak informace o bezpečnosti SIS by mohly být komerčně využity i pro jiné účely, než jsou bezpečnostně-relevantní aplikace na železnici.

b) Řešení spolehlivosti a bezpečnosti signálů v okolí přijímače

V okolí přijímače mohou působit nepříznivé vlivy jako například mnohacestné šíření nebo interference. Tyto vlivy mohou způsobit značné zhoršení přesnosti výpočtu polohy, či dokonce znemožnit výpočet polohy degradací satelitních signálů. Tento problém lze řešit několika způsoby.

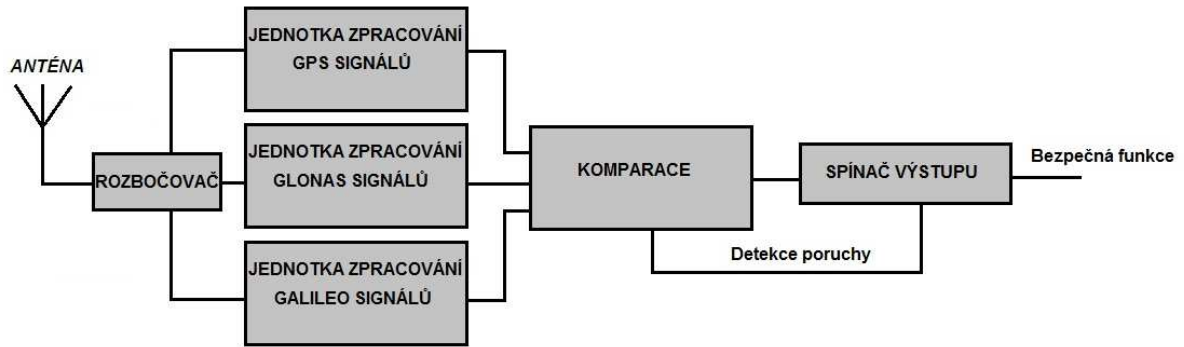
Prvním možným řešením je vytvoření digitální mapy tratě (trati), která by byla následně uložena v paměti GNSS přijímače. Při jízdě železničního vozidla by docházelo ke komparaci skutečné polohy železničního vozidla s mapovými podklady. Při překročení stanovené odchylky, viz. červeně vyznačená oblast na obrázku 45 by systém GNSS vlakového lokátoru varoval před selháním systému. Žlutě je vyznačena oblast běžné provozní odchylky, modře je vyznačena oblast, která je ještě přijatelná pro provoz systému GNSS vlakového lokátoru.



Obrázek 45_Využití digitálních map tratí

Mezi možná řešení se řadí použití techniky RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring), která je obecně používána v bezpečnostně relevantních aplikacích. Tato technika slouží jako monitorovací prostředek GPS signálů pro zjištění vhodnosti použití satelitních signálů při výpočtu polohy z bezpečnostního hlediska. Technika RAIM je založena na principu redundance. Dle principu redundance a minimálního potřebného počtu satelitních signálů pro výpočet polohy je pro správnou funkci této techniky zapotřebí alespoň 5 satelitních signálů, při kterých je možné detekovat chybu. Při příjmu 6 a více satelitních signálů lze chybu identifikovat [32]. Více o technice RAIM a používaném algoritmu lze nalézt v [33].

Další možné řešení je založeno na principu redundance. U tohoto řešení je zapotřebí přijímat signály od několika GNSS - GPS, Glonass a v budoucnu popřípadě dalších, například Galileo. Jelikož charakter přichozících signálů od jednotlivých GNSS systémů je v jistých směrech velmi podobný, především co se týče frekvenčního pásma signálů a výkonové úrovně signálů, působí na všechny tyto signály téměř stejnou měrou výše zmíněné nepříznivé vlivy. Při provedení výpočtu polohy pro každý systém zvlášť by měly být lokální anomálie včas detekovány působením téměř shodného ovlivnění. Na obrázku 46 je obecně naznačena struktura tohoto řešení.



Obrázek 46_Redundantní systém detekce poruchy v okolí přijímače

c) *Řešení spolehlivosti a bezpečnosti správné funkce GNSS přijímače*

Co se týče samotné technické bezpečnosti GNSS přijímače je nutné postupovat dle principů zabezpečovací techniky, a to jak při návrhu hardwaru, tak softwaru. Více informací o principech a postupu vývoje zabezpečovacího zařízení lze nalézt například v [28].

6. Závěr

V diplomové práci se podařilo splnit všechny body zadání. První část práce je zaměřena na seznámení s obecnými principy GNSS systémů. Na základě podrobného zkoumání působících vlivů, které mají přímý dopad na přesnost výpočtu polohy, byla vytvořena teoretická část zabývající se právě působícími vlivy.

Ve snaze ověřit a analyzovat působící vlivy na reálných datech, byla navržena metodika měření a vyhodnocení jednotlivých vlivů v různých prostředích. Návrh měření byl proveden jak pro statické měření, tak také pro mobilní případ použití satelitní navigace.

Součástí této práce bylo provedení praktických měření dle navržených metodik, které dále tvořili vstup pro jejich následnou analýzu. Pro analyzování některých zkoumaných vlivů byla data získána z externích zdrojů. Vzhledem k tomu, že většinu analyzovaných vlivů není možné měřit přímo, nebyla provedena praktická měření některých vlivů, a to především kvůli jejich technické náročnosti, která přesahovala mé možnosti. Analyzovaná data byla vhodně reprezentována. Z velké části byl pro tyto účely využit sofistikovaný nástroj pro analýzu GNSS dat gLAB.

Zhodnocení použitelnosti navržených metod, konkrétně metod měření mnohacestného šíření a šumu, nemohlo být provedeno z důvodu nedostatečné technické vybavenosti.

Největší část praktického měření byla věnována měření maskování satelitních signálů. Z tohoto měření vyplynulo, že nejvíce problematické prostředí z pohledu dostupnosti GPS navigační služby je prostředí s hustým lesním porostem a také prostředí, ve kterém se vyskytuje velké množství vysokých budov. Zajímavým zjištěním při měření dynamických případů byl fakt, že při nízké dostupnosti satelitních signálů vznikaly extrémní chyby při výpočtech polohy v řádu stovek met až jednotek kilometrů.

U všech prakticky ověřených korekčních modelů se prokázala jejich účinnost potlačit nežádoucí vlivy, který ovlivňují přesnost výpočtu polohy. Jejich účinnost se projevila především v přesnosti výpočtu polohy ve vertikálním směru.

Výsledkem této práce jsou taktéž konkrétní návrhy opatření vedoucích k eliminaci zkoumaných vlivů. V závěru práce byla provedena podrobná analýza, která na základě zjištěných údajů z předcházejících kapitol navrhuje vhodná opatření vedoucí k použití GNSS v železničních bezpečnostně kritických aplikacích.

Seznam literatury

- [1] Misra,P.,Enge,P. *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*. 2.vyd. Lincoln. Ganga-Jamuna Press. 2006
- [2] Kaplan,E.D.,Hegarty,Ch. *Understanding GPS: Principles and Applications*. 2.vyd. Norwood. Artech House. 2005
- [3] Groves,P.D. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. Boston/London. Artech House. 2008
- [4] NovAtel. *Discussions on RF Signal Propagation and Multipath*. 2000; Dostupné na World Wide Web: < <http://www.webone.novatel.ca/assets/Documents/Bulletins/apn008.pdf> >, [cit. 24.4.2012]
- [5] Prokop,J.,Vokurka,J. *Šíření elektromagnetických vln a antény*. Praha. SNTL. 1980
- [6] <http://www.freegeographytools.com>
- [7] http://www.solarscience.msfc.nasa.gov/images/ssn_predict_1.gif
- [8] ARINC Engineering Services, LLC. *Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces*. El Segundo. 2004; Dostupné na World Wide Web: < <http://www.navcen.uscg.gov/pdf/IS-GPS-200D.pdf> >, [cit. 15.4.2012]
- [9] Hernandez-Pajares,M. aj. *GPS Data processing: Code and Phase*. Barcelona. 2004; Dostupné na World Wide Web: < http://www.gage14.upc.es/TEACHING_MATERIAL/SLIDES/SLIDES_GPSPD_gAGE_NAV_O9.pdf >, [cit. 25.4.2012]
- [10] Katsougiannopoulos,S. aj. *Tropospheric Refraction Estimation Using Various Models, Radiosonde Measurements and Permanent GPS Data*. 2006; Dostupné na World Wide Web: < http://www.fig.net/pub/fig2006/papers/ps05_04/ps05_04_09katsougiannopoulos_0725.pdf >, [cit. 25.4.2012]
- [11] Niell,A.E. *Global mapping functions for the atmospheric delay at radio wavelengths*. Massachusetts Institute of Technology. Westford. 1996; Dostupné na World Wide Web: < http://www.haystack.mit.edu/ego/pubs/NMF_JGR.pdf >, [cit. 25.4.2012]
- [12] http://www.fas.org/spp/military/docops/army/ref_text/chap07c.htm
- [13] Zogg,J. *GPS Basics*. u-blox ag.2002; Dostupné na World Wide Web: < http://www.geology.isu.edu/geostac/Field_Excercise/GPS/GPS_basics_u_blox_en.pdf >, [cit. 25.4.2012]
- [14] Langley,R.B. Dilution of Precision. *GPS WORLD May 1999*. 1999. Č.5. strana 52-59. ; Dostupné na World Wide Web: < http://www.nrem.iastate.edu/class/assets/nrem446-546/week3/Dilution_of_Precision.pdf >, [cit. 15.4.2012]

- [15] Stolagiewicz,A.A. *Contributions to the foundations of a safety case for the use of GNSS in railway environments*. University College London. 2009
- [16] Langley,R.B. GPS Receiver System Noise. *GPS WORLD June 1997*. 1997. Č.6. strana 40-45.; Dostupné na World Wide Web: < <http://www.gge.unb.ca/Resources/gpsworld.june97.pdf> >, [cit. 15.4.2012]
- [17] Příhoda,M. *Měření šumového čísla a šumových parametrů*. ČVUT. Praha. 2010
- [18] u-blox AG. *ANTARIS GPS Evaluation Kit - User's Guide*. 2004.; Dostupné na World Wide Web: < http://www.cbradio.cz/doc/_Other/GPS/ublox_Tim_LH/kit.pdf >, [cit. 15.4.2012]
- [19] Hernandez-Pajares,M. aj. *The ESA/UPC GNSS-Lab tool (gLAB): An Advanced multipurpose package to process and analyse GNSS data*. Noordwijk. European Space Agency. 2010; Dostupné na World Wide Web: <http://gage6.upc.es/gAGE_WEB/papers/2010/gLAB_paper_Navitech-1.pdf >, [cit. 15.4.2012]
- [20] <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- [21] Gurtner,W.,Estey,L. *RINEX The Receiver Independent Exchange Format Version 3.0*. Astronomical Institute,UNAVCO. University of Bern,Boulder Colorado.2007.; Dostupné na World Wide Web: < <http://www.epic.awi.de/29985/1/Gur2007a.pdf> >, [cit. 15.4.2012]
- [22] <http://facility.unavco.org/software/teqc/teqc.html>
- [23] <http://www.ngs.noaa.gov/CORS/>
- [24] Larson,K.,Akos,D.,Marti,L. *Characterizing Multipath from Satellite Navigation Measurements in Urban Environments*. University of Colorado at Boulder. 2006
- [25] GPS World. *2010 Receiver Survey*. 2010; Dostupné na World Wide Web: < <http://www.gpsworld.com/professional-oem/2010-receiver-survey-9361>>, [cit. 15.4.2012]
- [26] European Commission. *EGNOS Service Definition Document - Open Service*. 2009; Dostupné na World Wide Web: < http://www.essp-sas.eu/service_definition_documents.pdf >, [cit. 18.4.2012]
- [27] Federal Aviation Administration. *GLOBAL POSITIONING SYSTEM WIDE AREA AUGMENTATION SYSTEM (WAAS) PERFORMANCE STANDARD*. 2008; Dostupné na World Wide Web: < <http://www.gps.gov/technical/ps/2008-WAAS-performance-standard.pdf> >, [cit. 18.4.2012]
- [28] Chudáček,V. aj. *Železniční zabezpečovací technika*. ČD-VÚŽ. Praha. 2005
- [29] Chudáček,V.,Lochman,L.,Stolín,M. *Navigační satelitní systémy v železniční zabezpečovací technice ?*. Praha. 2001; Dostupné na World Wide Web: < <http://www.cd rail.cz/vts/CLANKY/1205.pdf> >, [cit. 15.4.2012]

[30] European Commission. *EGNOS Service Definition Document - Safety of Life*. 2011; Dostupné na World Wide Web: < http://www.essp-sas.eu/service_definition_documents.pdf >, [cit. 18.4.2012]

[31] Hernandez-Pajares, M. aj. *EGNOS TUTORIAL*. gAGE/UPC. Barcelona. 2004; Dostupné na World Wide Web: < <http://www.nacc.upc.es/gnss-pdf/EGNOS-gAGE.pdf> >, [cit. 15.4.2012]

[32] Svoboda, A. *Zavádění systémů přesného přístrojového přiblížení na bázi GPS*. Univerzita Pardubice. Pardubice. 2010

[33] Sun, Q., Zhang, J. *RAIM method for improvement on GNSS reliability and integrity*. Univerzita Beihang. Beijing. 2009

Příloha A_popis měřících stanovišť

1. Statický případ - maskování

Při záznamu dat ovlivněných maskováním jsem postupoval dle metodiky uvedené v podkapitole 3.2. Prvním z měřených případů byl případ volného výhledu na oblohu s minimálním množstvím okolních objektů. Měření probíhalo na střeše budovy společnosti AŽD Praha s.r.o., konkrétně Žirovnická 3146/2 Praha 10. Na obrázku P1 je fotografie měřící antény a částečně okolní prostředí.

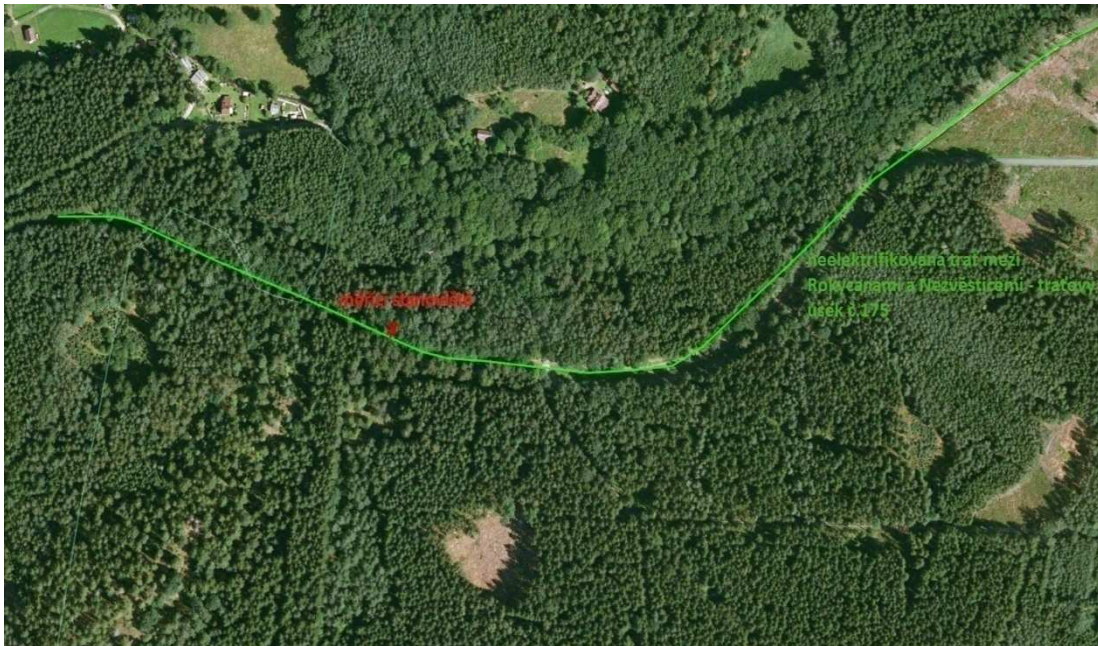


Obrázek P1_fotografie měřícího stanoviště - volný výhled na oblohu s minimálním množstvím okolních objektů

Dalším zkoumaným prostředím byla trať lemovaná hustým lesním porostem smíšeného typu. Měření probíhalo na neelektrifikované trati mezi městy Rokycany a Nezvěstice - traťový úsek 175. Měřící stanoviště je zobrazeno na mapě - obrázek P3 a na fotografii - obrázek P2. Anténa byla umístěna přibližně 2 metry od středu kolejnicového pásu a 1 metr nad kolejnicí.



Obrázek P2_fotografie měřícího stanoviště - lesní porost v okolí tratě



Obrázek P3_mapa okolí měřicího stanoviště - lesní porost v okolí tratě

Vliv budov okolo tratě bylo dalším zkoumaným případem. Z důvodu mé dostupnosti k vhodnému místu s těmito požadavky v okolí tratě jsem provedl záměnu železničního prostředí za prostředí městské aglomerace. Měření probíhalo na Jižním předměstí v Plzni, konkrétně v Bendově ulici. Šířka ulice je zhruba 15 metrů a výška okolních budov dosahuje 10 metrů. Anténa byla umístěna na střeše automobilu, ve výšce cca 1,5 metru a ve vzdálenosti 4 metrů od postranní budovy na jedné straně a ve vzdálenosti 10 metrů na straně druhé.

Na obrázku P4 je zkoumané prostředí - pohled na část Bendovy ulice. Obrázek P5 poukazuje na měřicí stanoviště z leteckého snímku.



obrázek P4_fotografie měřicího stanoviště - budovy v okolí tratě



Obrázek P5_mapa okolí měřícího stanoviště - budovy v okolí tratě

Zářez na trati byl další testovanou oblastí. Pro tento účel bylo vytipováno místo na trati v blízkosti města Rokycany. Jedná se o elektrifikovanou trať mezi Berounem a Plzní, traťový úsek č.170. Měřící stanoviště je vzdálené zhruba 1,5km od železniční stanice Rokycany ve směru do Berouna. Anténa byla umístěna cca 2,5 metru od středu koleje a ve výšce 240cm nad kolejnicí.

Na obrázku P6 je fotografie traťového úseku se zářezem. Na následujícím obrázku P7 je vyznačena část trati a měřící stanoviště.



Obrázek P6_fotografie traťového úseku - zářez na trati



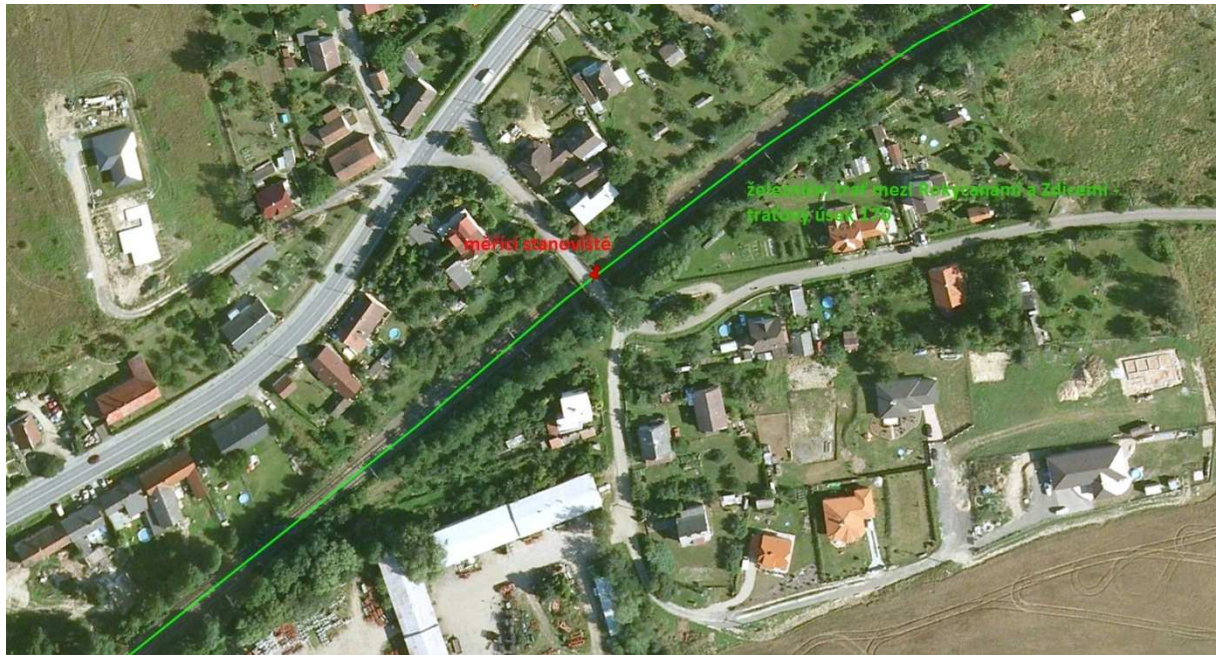
Obrázek P7_mapa okolí měřicího stanoviště - zářez na trati

Posledním testovaným prostředím byla trať, nad kterou je most. Pro tyto účely byl vybrán most na stejné trati jako v předešlém případě, traťový úsek 170. Most se nachází zhruba 3km od železniční stanice Rokycany ve směru do Berouna. Most má následující rozměry - délka 9m, šířka 12,5m a výška nad kolejnicí 8m. Anténa byla umístěna u jedné stěny mostu, přibližně 2,5 metru od středu jedné z kolejí. Výška antény nad kolejnicí byla 80cm.



Obrázek P8_fotografie traťového úseku - most nad trati

Na obrázku P8 je fotografie traťového úseku s mostem a na následujícím obrázku P9 je vyznačena část tratě s měřicím stanovištěm.



Obrázek P9_mapa okolí měřicího stanoviště - most nad trati

2. Dynamický případ - maskování

Pro dynamický případ záznamu GPS raw dat byly vybrány vhodné lokace, podobné jako je tomu ve statickém případě. Lokace byly vybrány s ohledem na stejnorodost a co největší vzdálenost testovaného úseku.

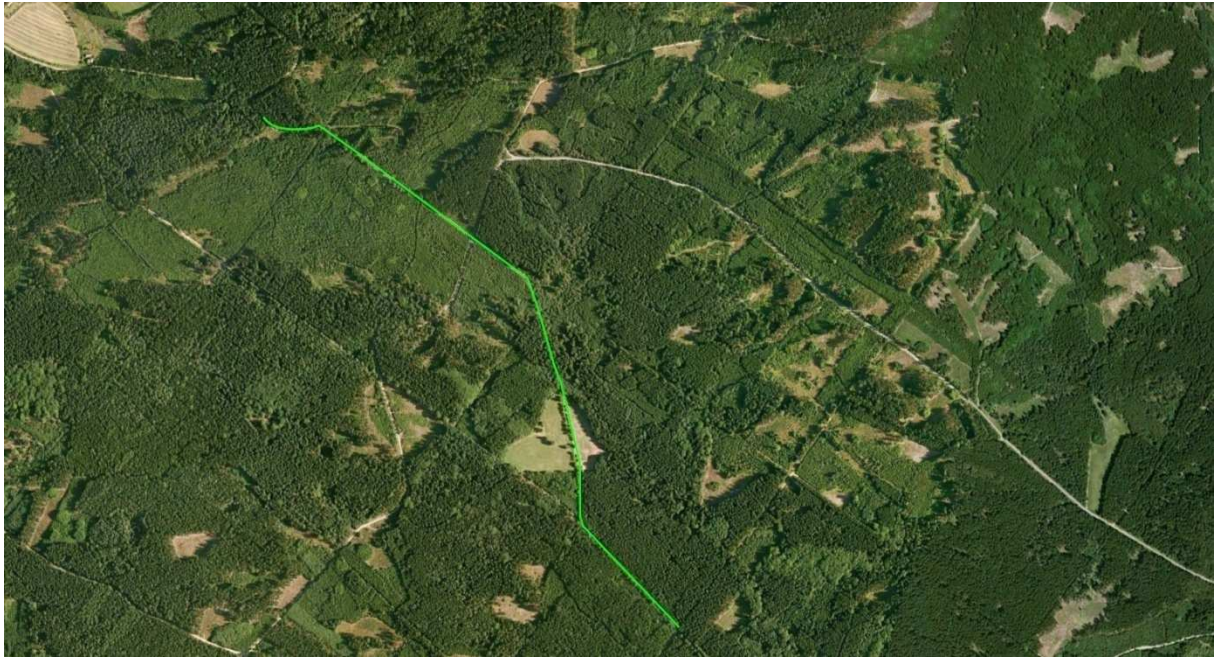
Rychlost jízdy automobilu a její změny jsou ovlivněny několika faktory. Prvním z nich jsou pravidla silniční dopravy, dále hustota provozu, kvalita pozemních komunikací a výkonnostní parametry automobilu.

První testovanou oblastí v dynamickém případě je silniční úsek lemovaný lesním porostem. Tento úsek byl téměř po celé své délce obklopen hustým lesním porostem. Testovaný úsek se nachází na silnici mezi obcemi Těžkov a Sklená Huť. Jeho délka je přibližně 1,3 km a vzdálenost mezi stromy je zhruba 10 až 12 metrů. Výška okolních stromů se pohybuje v rozmezí 8 až 15 metrů.

Na obrázku P10 je fotografie části měřené trati. Obrázek P11 zobrazuje celou testovanou trať.



obrázek P10_fotografie měřené trati - hustý lesní porost



Obrázek P11_ mapa okolí měřené tratě - hustý lesní porost

Druhým testovaným prostředím bylo prostředí vysokých okolních budov. Měření opět probíhalo v části Jižní předměstí v Plzni. Na obrázku P12 je mapa s vyznačenou testovací trasou. Konkrétně se jedná o ulice Koperníkova, Hálkova, Skrétova a Tylova. V okolí testované trati se pohybuje výška budov zhruba mezi 8 až 12 metry, šířka trati je asi 15 metrů. Anténa byla umístěna na střeše automobilu, ve výšce cca 1,5 metru. Trať má velice podobný charakter jako je zobrazen na obrázku P4.



obrázek P12_ mapa okolí testované tratě - vysoké budovy

V Plzni byla pro případ vlivu mostů vytipována trať s co největším množstvím mostů, konkrétně se jedná o pět mostů různé velikosti. Na obrázku P13 je tato trať vyznačena v celé své délce. Na obrázku P14 a P15 jsou hned za sebou dva mosty, které jsou od sebe vzdáleny maximálně 4 metry, na obrázku P13 je tato oblast označena jako most1. Největší rozměry mají most 2 a 4 (obrázek P16). Most 2 je asi 100 metrů dlouhý a 8 metrů široký. Most 4 je přibližně 30 metrů dlouhý a 20 metrů široký. Anténa byla umístěna na střeše automobilu ve výšce asi 1,5 metru.



Obrázek P14_fotografie měřené trati - most1



Obrázek P15_fotografie měřené trati - most1



Obrázek P16_fotografie měřené trati - vlevo most2, vpravo pohled od mostu 2 k mostům 3 a 4



Obrázek P13_mapa okolí testované tratě - mosty

Jako trať s volným výhledem na oblohu a s minimálním počtem okolních objektů byla vybrána silnice mezi obcemi Holoubkov a Těžkov. Celý testovaný úsek je zobrazen na obrázku P17. Jedná se o zhruba 1,7km dlouhý úsek, šířka je přibližně 8 metrů. Na obrázku P18 je fotografie této tratě. Z ní je patrné, že v okolí tratě je pouze několik stromů menšího vzrůstu. Anténa byla umístěna na střeše automobilu ve výšce 1,5 metru.



Obrázek P18_fotografie měřené trati - volný výhled na oblohu



Obrázek P18_mapa okolí měřené tratě - volný výhled na oblohu

3. mnohacestného šíření

Pro vyhodnocení vlivu mnohacestného šíření byla vybrána železniční zastávka Plzeň - Jižní předměstí. Tato zastávka je umístěna zhruba 6 metrů pod úrovní okolních ulic. Na jedné straně jsou navíc budovy vysoké asi 10 metrů. Na obrázku P19 je fotografie této zastávky. Obrázek P20 zobrazuje okolí měřícího stanoviště.



Obrázek P19_fotografie měřícího stanoviště - mnohacestné šíření

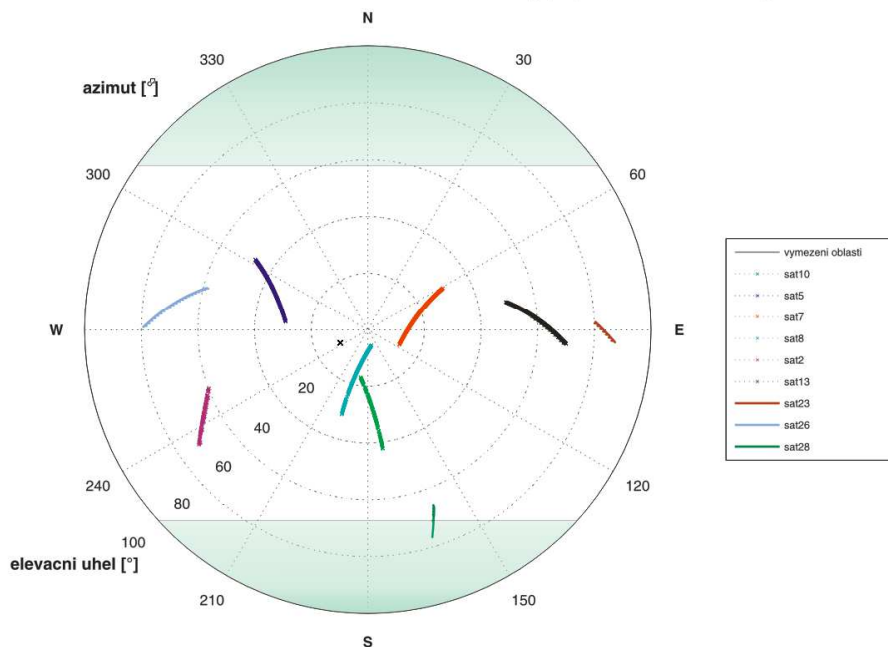


Obrázek P20_okolí měřícího stanoviště - mnohacestné šíření

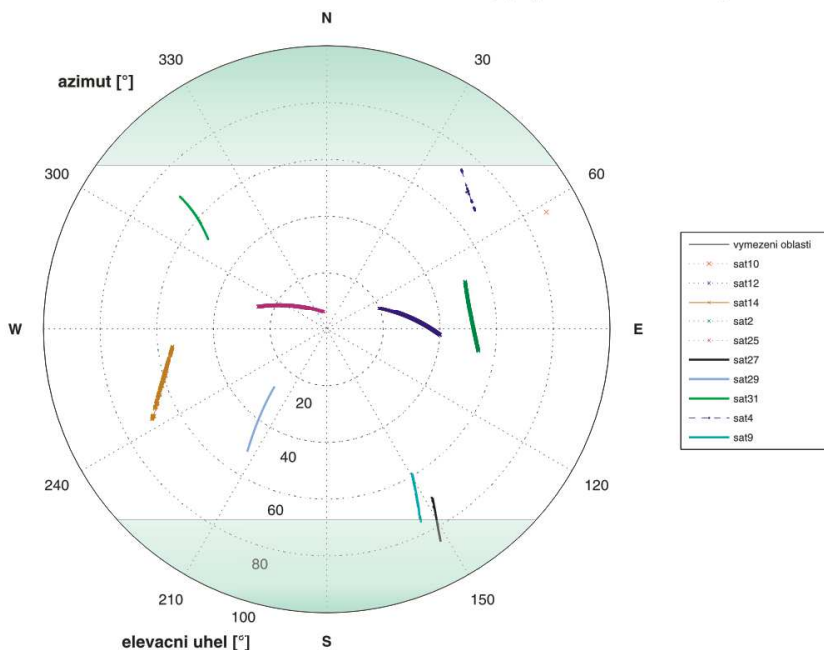
Příloha B_ rozložení satelitů na obloze během doby měření

Budovy v okolí železniční tratě

Pohyb satelitu na obloze během mereni - 10:38hod. az 11:32hod. - staticky pripad "maskovani signalu budovami"

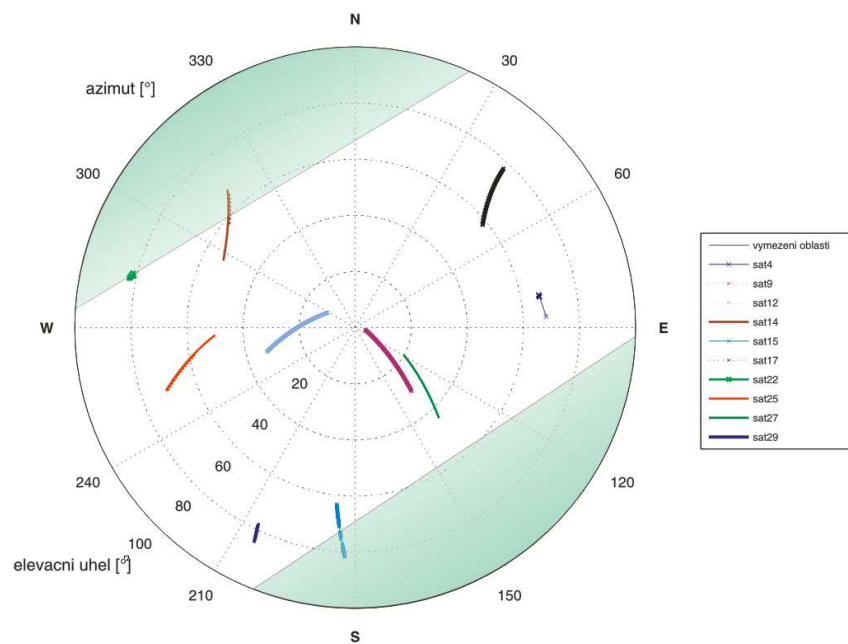


Pohyb satelitu na obloze během mereni - 18:43hod. az 19:33hod. - staticky pripad "maskovani signalu budovami"

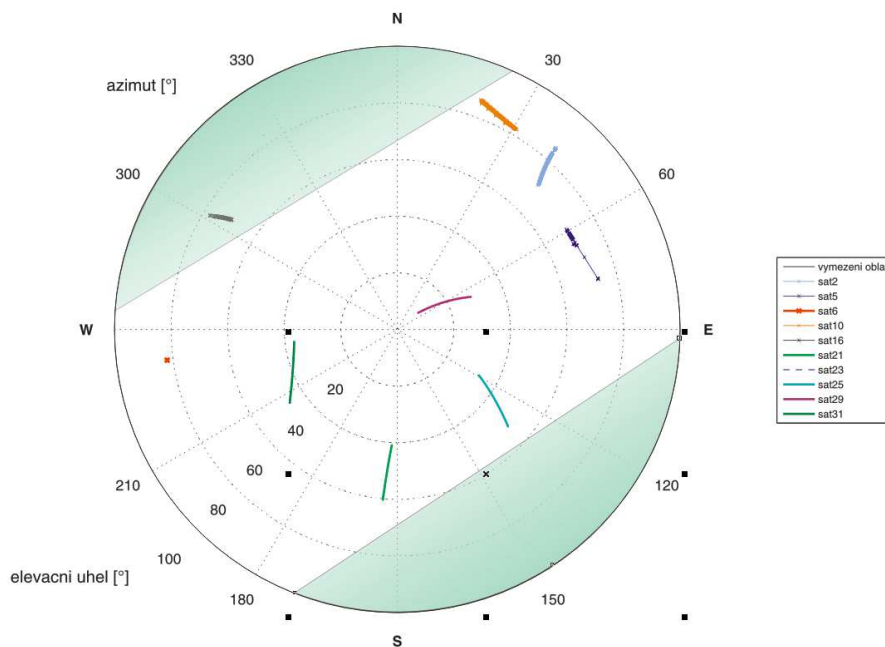


Zářez na železniční trati

Pohyb satelitu na obloze během měření - 16:28hod. az 17:21hod. - staticky případ "vliv zarezu na trati"

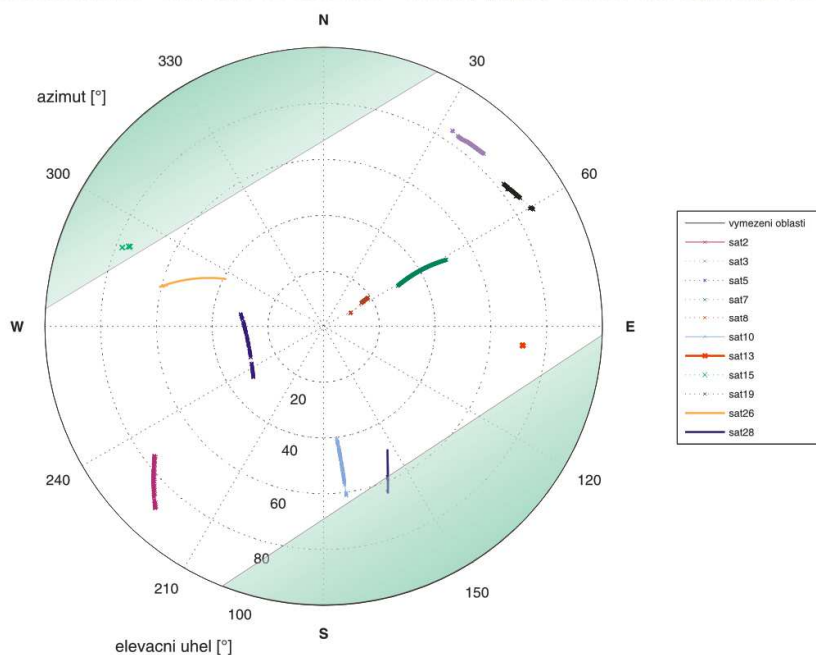


Pohyb satelitu na obloze během měření - 20:29hod. az 21:12hod. - staticky případ "vliv zarezu na trati"



Most nad železniční tratí

Pohyb satelitu na obloze během mereni - 11:02hod. az 11:52hod. - staticky pripad "maskovani signalu pod mostem"



Pohyb satelitu na obloze během mereni - 19:40hod. az 20:34hod. - staticky pripad "maskovani signalu pod mostem"

