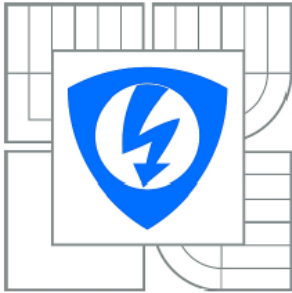




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ALGORITMY VÝPOČTU POLOHY, RYCHLOSTI A ČASU Z GNSS SIGNÁLŮ

ALGORITHMS FOR CALCULATING THE POSITION, VELOCITY AND TIME FROM GNSS
SIGNALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

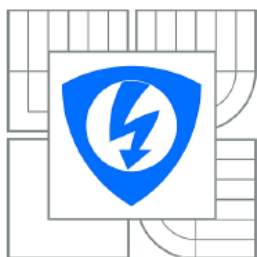
Bc. TOMÁŠ KUČERA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LENKA TEJMLOVÁ

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Tomáš Kučera

ID: 115210

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Algoritmy výpočtu polohy, rychlosti a času z GNSS signálů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy globálních navigačních systémů GPS, Galileo a GLONASS. Provedte rozbor jednotlivých podsystémů, prostudujte a diskutujte jejich vlastnosti. Vypracujte rozbor navigačních signálů a navigačních zpráv.

Provedte akvizici signálů GLONASS a GPS v pásmu L1. Sestavte základní kostru algoritmu v Matlabu pro zpracování C/A GLONASS a GPS navzorkovaných signálů, která umožní výpočet polohy, rychlosti a času s využitím signálů obou navigačních systémů.

Program rozšiřte o grafické uživatelské rozhraní, se zobrazením výsledků a činitelů DOP. Provedte test programu s reálnými navzorkovanými signály a provedte celkové zhodnocení aplikace.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HOFMANN-WELLENHOF, B., LICHTENEEGER, H., COLLINS, J. Global Positioning System: Theory and Practice, New York: Springer, 2001.

[2] European Space Agency. ESA - Navigation [online]. Copyright 2000 – 2011. [11.11.2011]. Dostupné na webu European Space Agency: <http://www.esa.int/esaNA/index.html>

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 24.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Lenka Tejmlová

Konzultanti diplomové práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Výzkum realizovaný v rámci této diplomové práce byl finančně podpořen projektem CZ.1.07/2.3.00/20.0007 **Wireless Communication Teams** operačního programu **Vzdělávání pro konkurenceschopnost**.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Finanční podpora byla poskytnuta Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

Tento příspěvek vzniknul za podpory projektu CZ.1.07/2.3.00/20.0007 WICOMT, financovaného z operačního programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

ABSTRAKT

Tato diplomová práce popisuje principy globálních družicových polohových systémů GNSS, konkrétně systémy GPS, GLONASS a Galileo. Rozebrána je struktura jednotlivých podsystémů GNSS a uvedeny jejich vlastnosti. V interaktivním programovacím prostředí MATLAB je sestaven program zpracovávající navzorkované signály systémů GPS a GLONASS pro výpočet polohy s využitím obou navigačních systémů. Pro výpočet polohy je použita tzv. dálkoměrná metoda, kdy z naměřených pseudozpoždění je hledán průsečík kulových ploch. Výpočet je navržen pouze pro čtyři družice a v případě detekce více družic je opakován pro všechny možné kombinace. Z této polohy je určena kombinace s nejnižším činitelem DOP (Dilution of precision) a výpočet polohy je opakován pro tuto nejvýhodnější konstelaci družic. V práci je vytvořeno uživatelské rozhraní pro načtení vstupních dat, nastavení vstupních parametrů a zobrazení vypočtených hodnot. Po výpočtu z naměřených dat je poloha zobrazena na vybraném online mapovém portálu.

KLÍČOVÁ SLOVA

GNSS, GPS, GLONASS, Galileo, MATLAB, navigační signály, navigační zprávy, DOP.

ABSTRACT

This master thesis describes the principles of the Global Navigation Satellite System GNSS, specifically the GPS, GLONASS and Galileo systems. The thesis analyzes the structure of individual GNSS subsystems and introduces their properties. The algorithm for calculating the position is designed in the interactive programming environment MATLAB for the processing of GPS and GLONASS sampled signals. The position is calculated by a distance measurement method which searches for the intersection of spherical surfaces. The calculation is designed for four satellites and when more satellites are detected, the calculation is repeated for all possible combinations. From this position the combination with the lowest DOP (Dilution of Precision) factor is determined, and the calculation of the position is repeated for the best constellation of satellites. In this thesis the user graphical interface for entering the input of data, input parameters and the display of calculated values are created. Finally the calculation of the measured data is displayed on the selected location online map portal.

KEYWORDS

GNSS, GPS, GLONASS, Galileo, MATLAB, navigation message, navigation signals, DOP.

KUČERA, T. *Algoritmy výpočtu polohy, rychlosti a času z GNSS signálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2013. 69 s., 3 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Lenka Tejmlová

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Algoritmy výpočtu rychlosti, polohy a času z GNSS signálů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

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

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	xi
Seznam tabulek	xiii
Úvod	1
1 Globální družicový polohový systém GNSS	2
2 Globální poziční systém GPS	3
2.1 Kosmický segment.....	3
2.2 Řídicí segment	4
2.3 Uživatelský segment	4
2.4 GPS signály.....	5
2.4.1 Kanály v systému GPS	5
2.4.2 Modulace GPS signálů.....	6
2.4.3 Kódy v systému GPS	6
2.5 Modernizace systému GPS	10
3 GLONASS	11
3.1 Kosmická část	11
3.2 Pozemní část	12
3.3 Uživatelská část	12
3.4 Kanály systému GLONASS	13
3.5 Signály systému GLONASS.....	13
3.5.1 Navigační signál standardní přesnosti SP	13
3.5.2 Navigační signál vysoké přesnosti HP.....	14
3.5.3 Navigační zpráva	14
4 GALILEO	15
4.1 Kosmický segment.....	15
4.2 Řídicí a kontrolní segment.....	16
4.2.1 Globální část	16
4.2.2 Regionální a lokální část.....	17
4.3 Signály systému Galileo	17

4.4	Kódy systému Galileo.....	18
4.4.1	Kódy v pásmu E1.....	19
4.4.2	Kódy v pásmu E6.....	19
4.4.3	Kódy v pásmu E5.....	19
4.4.4	Navigační zpráva v systému Galileo	20
5	Určování polohy	22
5.1	Úhломěrná metoda.....	22
5.2	Metoda dopplerovská.....	22
5.3	Metoda interferometrická	23
5.4	Dálkoměrná metoda.....	23
6	Geodetické souřadné soustavy	25
6.1	Převod z geodetických do kartézských souřadnic	25
6.2	Převod z kartézských do geodetických souřadnic	26
7	Predikce polohy družic	28
7.1	Funkce pro výpočet polohy družic.....	31
8	Výpočet polohy z GPS signálu	35
8.1	Generátor repliky C/A kódu	36
8.2	Měření pseudovzdálenosti ze vstupního signálu	37
8.2.1	Funkce pro výpočet pseudozpoždění.....	39
8.3	Určení polohy z vypočtených pseudozpoždění	41
8.3.1	Funkce pro výpočet polohy uživatele	43
9	Výpočet pozice z GLONASS signálu	45
9.1	Generátor repliky kódu SP.....	45
9.2	Výpočet pseudozpoždění	46
9.3	Výpočet polohy uživatele	48
10	Generátory GNSS signálů	49
10.1	Generátor GPS signálu.....	49
10.2	Generátor GLONASS signálu	50
11	Výpočet činitele DOP	51
12	Grafické uživatelské rozhraní	55
12.1	System.....	56

12.2	GPS a GLONASS parametry.....	57
12.3	Čas (UTC).....	58
12.4	Odhad výchozí pozice.....	58
12.5	Vypočti.....	58
12.6	Zobrazení pozice.....	59
12.7	DOP	59
13	Test programu s reálnými navzorkovanými signály	60
13.1	Měření reálných signálů vysílaných družicemi	60
13.2	Měření signálu z generátoru Tabor WW1071	61
	Závěr	64
	Literatura	66
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	68
	Seznam příloh	70

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1:	Rozmístění GPS družic na oběžných drahách (převzato z [8]).	3
Obr. 2.2:	BPSK modulace nosné.	6
Obr. 2.3:	GPS signály.	7
Obr. 2.4:	Struktura rámce navigační zprávy.	9
Obr. 2.5:	Struktura telemetrického TLM a předávacího (handover) slova HOW.	9
Obr. 4.1:	Frekvenční pásmo systému Galileo.	17
Obr. 6.1	Parametry elipsoidu pro definovaný bod P.	26
Obr. 7.1:	Rovina dráhy družice.	28
Obr. 7.2:	Určení argumentu perigea.	29
Obr. 7.3:	Soubor prvků pro GPS družici SVN 32.	31
Obr. 7.4:	Zobrazení poloh všech GPS družic a jejich oběžných drah.	33
Obr. 7.5:	Zobrazení poloh všech GLONASS družic a jejich oběžných drah.	34
Obr. 8.1:	Blokové schéma výpočtu polohy uživatele z naměřeného signálu.	35
Obr. 8.2:	Generátor C/A kódu pro GPS družice.	36
Obr. 8.3:	Synchronizace dálkoměrného signálu v přijímači.	38
Obr. 8.4:	Princip hledání shody mezi signálem GPS a kopií signálu.	38
Obr. 8.5:	Průběh korelace pro pět bitů navigační zprávy v systému GPS.	39
Obr. 8.6:	Principiální schéma demodulátoru BPSK.	40
Obr. 8.7:	Časový průběh korelace mezi GPS signálem a vytvořenou replikou pro družici SVN3.	41
Obr. 8.8:	Iterační proces pro určení polohy přijímače.	44
Obr. 9.1:	Generátor PRN sekvence dálkoměrného kódu SP.	46
Obr. 9.2:	Princip Costasovy smyčky.	46
Obr. 9.3:	Průběh korelace pro pět bitů navigační zprávy v systému GLONASS pro družici SVN 731.	47
Obr. 9.4:	Časový průběh korelace mezi přijatým signálem a vytvořenou replikou pro družici SVN 731.	47
Obr. 9.5:	Zobrazení výchozí a vypočtené pozice (www.mapy.cz, Svitavy – náměstí Míru).	48
Obr. 10.1:	Spektrum GPS signálu.	50

Obr. 11.1: Vliv použitých družic na vznik chyby při určování polohy.....	51
Obr. 11.2: Vliv výběru vhodných družic na určení výsledné polohy.	54
Obr. 12.1: Výsledné grafické uživatelské rozhraní GUI.	55
Obr. 12.2: Možnost nastavení počtu vstupních souborů v bloku GLONASS parametry.	57
Obr. 12.3: Nastavení výchozí pozice v uživatelském rozhraní.	58
Obr. 12.4: Zobrazení vypočtené pozice s nejnižším činitelem DOP.	59
Obr. 12.5: Zobrazení činitele DOP se slovním popisem vypočtené hodnoty.	59
Obr. 13.1: Schéma zapojení měřicího pracoviště.....	60
Obr. 13.2: Napájení LNA zesilovače stejnosměrnou vazbou.	60
Obr. 13.3: Schéma zapojení měřicího pracoviště s arbitrárním generátorem Tabor.....	61
Obr. 13.4: Struktura jednoho vzorku (2 bajtů).	62
Obr. 13.5: Výpočet výsledné polohy přijímače systému GNSS.	63

SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1:	Přehled parametrů kódů v systému Galileo a GPS [14].	20
Tab. 4.2:	Tabulka parametrů navigační zprávy v systému Galileo [15].	21
Tab. 6.1:	Parametry referenčních elipsoidů používaných v GNSS.....	25
Tab. 7.1:	Příklad prvků 2-LINE elementů pro družici GPS SVN 32.....	31
Tab. 8.1:	Příslušné buňky binárního modulu součtu pro generování C/A kódu.	37
Tab. 11.1:	Hodnocení vypočteného činitele DOP.....	53
Tab. 13.1:	Vypočtené pozice s odchylkou od skutečné polohy z GNSS systémů.	63

ÚVOD

Již od počátku lidské civilizace lidé oplývali touhou poznávat svět, prozkoumávat nové oblasti a cestovat. S těmito činnostmi, ať už rekreačními či obchodními, velmi úzce souvisí zaznamenávání specifických dat, která dokáží jednoznačně popsat dané místo na zeměkouli. Za tímto účelem se už mnoho staletí sestavují mapy a pomocí nich je stanovena daná poloha a nejkratší cesta k cíli. S mapami je tedy velmi úzce spjat pojem navigace.

V počátcích lodní dopravy na velké vzdálenosti neměli mořeplavci k dispozici žádné mapy, a tak se orientovali podle význačných bodů na pobřeží. Avšak při plavbě na otevřeném moři byly zapotřebí jiné orientační body, těmi se staly ve dne Slunce, v noci hvězdy. Jejím pozorováním šlo určit zeměpisnou šířku, na které se nacházeli. Velký pokrok v navigaci nastal při vynalezení kompasu. Z počátku k němu námořníci nechovali velkou důvěru a raději užívali olovnici k měření hloubky moře či typu jeho dna. Nashromážděné znalosti a zkušenosti z plaveb se zaznamenávaly do map, kde byly zakresleny obrysy pobřeží či jiné pomocné informace [1].

Po počátečních pokusech přenosu informací pomocí radiových vln se začaly budovat radiomajáky, které vysílaly smluvené signály a z nich bylo možné pomocí směrových antén určit azimut ke konkrétním radiomajákům. S rostoucí vzdáleností od radiomajáků také rostla chyba zaměření. V další fázi vývoje byly vynalezeny systémy na bázi časových měření. Tyto systémy byly nezávislé na vzdálenosti od radiomajáků, čímž se zvýšila přesnost zaměření polohy. Na přesnost zaměření má největší vliv ionosféra a troposféra, kterou se šíří radiová vlna. V porovnání se systémy úhlového měření jsou tyto chyby zanedbatelné [6].

Vizí navigačních systémů bylo vždy určit pozici přijímače kdykoliv, kteroukoliv roční a denní dobu, za jakýchkoliv povětrnostních podmínek, a to kdekoliv na zeměkouli. Splnit tyto požadavky s použitím různých radiomajáků, vysílačů apod. by bylo technicky velmi obtížné a finančně velmi nákladné. Po vyslání první umělé družice Sputnik 1 do vesmíru 4. října 1957 začali vědci zkoumat vlastnosti přijímaných signálů vyslaných z této družice. Došli k závěru, že lze určit parametry oběžné dráhy družice z Dopplerova posunu signálů a známých souřadnic přijímače. Následně se tedy začali zabývat opačným případem, kdy při znalosti známých parametrů oběžné dráhy družice a známé polohy družice je možné určit polohu uživatele. Tento objev položil základní kámen k družicovým navigačním systémům.

První družicové systémy byly určeny pouze pro vojenské účely. Prvním plně funkčním pozičním navigačním systémem se stal GPS provozovaný Ministerstvem obrany USA. Od roku 1994 byl systém GPS otevřen i pro civilní účely. V SSSR byl vyvinut globální navigační systém GLONASS provozovaný ruskou armádou jako obdoba amerického GPS. V současné době Evropská unie zavádí družicový navigační systém Galileo a Čínská lidově demokratická republika vyvíjí systém Compass. Všechny tyto uvedené systémy a mnoho dalších bude v budoucnu tvořit Globální družicový polohový systém GNSS, který bude implementován v jednom přijímači a s využitím všech dostupných systémů dokáže určit výrazně přesněji danou polohu, rychlost a aktuální čas v co nejkratší možné době [3].

1 GLOBÁLNÍ DRUŽICOVÝ POLOHOVÝ SYSTÉM GNSS

V poslední několika letech došlo ke zvýšenému zájmu o navigační systémy založené na globálních družicových polohových systémech (GNSS), jakým je např. globální poziční systém GPS, různé sítě na bázi buňkových systémů nebo začlenění těchto dvou technologií pro širokou škálu aplikací. Příkladem může být automatický lokalizační systém pro určení polohy vozidla AVL, různé sledovací systémy, navigace, systémy pro pěší navigaci, inteligentní dopravní systémy a systémy pro přesné určení polohy nouzově volajících. Během posledních 20 let se odehrálo v oblasti navigace družicovými systémy mnoho důležitých událostí. Těmito událostmi jsou např. úplné zprovoznění systému GPS pro civilní uživatele a jeho postupná modernizace od roku 2000, vývoj nového evropského satelitního systému Galileo a rekonstrukce ruského satelitního systému GLONASS [6].

Hlavním významem systému GNSS je kompatibilita mezi různými satelitními navigačními systémy, jako např. mezi GPS, Galileo, GLONASS, v budoucnu i Compass, bez ohledu na typ každého systému, s cílem dosáhnout co nejvyšší spolehlivosti a přesnosti [3].

Jak již bylo zmíněno výše, systém GNSS tvoří tři hlavní satelitní technologie GPS, GLONASS a Galileo. Každý z nich se lze rozdělit na tři části:

- kosmický segment,
- řídicí segment,
- uživatelský segment.

Tyto sekce jsou shodné ve všech uvedených satelitních technologiích, které všechny dohromady tvoří GNSS. V současnosti je plně funkční družicový systém GPS a většina celosvětových aplikací souvisí právě s technologií GPS. Po znovuoobnovení ruského satelitního systému GLONASS je systém od roku 2001 zpřístupněn i pro civilní uživatele. Na trhu již existují GNSS přijímače, které využívají obě technologie současně. Družicový navigační systém Galileo provozovaný Evropskou unií má být spuštěn od roku 2014. Vývoj celého systému GNSS bude směřovat k integraci všech dostupných polohových systémů, a to nejen globálních satelitních systémů (GPS, GLONASS, Galileo, Compass), ale i regionálních satelitních systémů jakými jsou čínský Beidou, Indií vyvíjený IRNSS nebo japonský QZSS. Tyto systémy často doplňují GNSS.

Pro zpřesnění současných systémů na daném území se používají další tzv. SBAS systémy, které využívají geostacionárních družic, pozemní stanice získávají korekční data charakteristická pro dané území a za pomoci družic jsou vysílána k uživatelům. Jedná se zejména o korekci různých jevů. Hlavním přínosem těchto systémů je přesnější určení polohy a včasné varování v případě poruchy některé družice GPS. V USA se jedná o systém WAAS, v Evropě EGNOS, Kanadě C-WASS, Indii GAGAN, Číně SNAS a Japonsku MSAS. Tyto systémy se používají převážně v leteckém či lodním provozu [8].

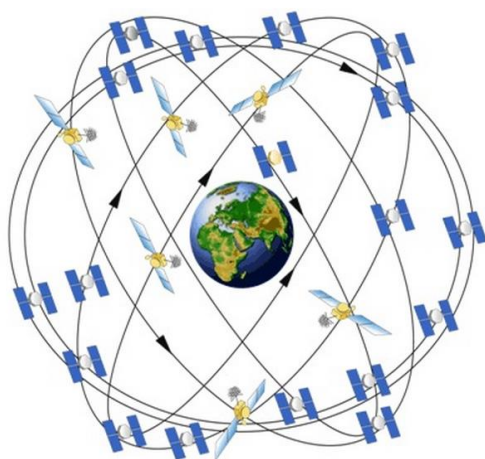
2 GLOBÁLNÍ POZIČNÍ SYSTÉM GPS

GPS je globální poziční systém provozovaný Ministerstvem obrany Spojených států amerických, jehož původní název byl GPS Navstar. Vyvíjen byl od roku 1973 pouze pro potřeby vojenských ozbrojených sil USA a od roku 1994 je část jeho služeb přístupná i civilním uživatelům [9]. Přijímačem GPS lze za každého počasí určit polohu, rychlost a čas na výchozím geografickém referenčním systému WGS 84. V systému GPS jsou vysílány kódované satelitní signály, které mohou být zpracovány v přijímači GPS, který umožňuje určit polohu, rychlost a čas. GPS se skládá ze tří hlavních částí:

- kosmický segment,
- řídicí segment,
- uživatelský segment.

2.1 Kosmický segment

Kosmická část systému se skládá z GPS satelitů. Tato kosmická zařízení vysílají rádiové signály z vesmíru. Družice jsou rozmístěny na šesti téměř kruhových oběžných drahách s nadmořskou výškou kolem 20 200 km se sklonem 55° od roviny rovníku. Vzájemně jsou posunuty o 60° (viz. Obr. 2.1) a oběžná doba družice je přibližně 11 hodin a 58 minut (polovina tzv. siderického dne) [1]. V družici jsou umístěny atomové hodiny, které udržují velmi přesný čas a jejich přesnost dosahuje 10^{-13} s. V družici je dále umístěna komunikační jednotka pro příjem povelových signálů a navigačních zpráv. Dále obsahuje palubní počítač a systém pro korekci oběžné dráhy družice. Baterie jsou dobíjeny solárními panely.



Obr. 2.1: Rozmístění GPS družic na oběžných drahách (převzato z [8]).

Kosmický segment byl původně projektován pro 24 družic, ale nyní je využíván až na mezní počet 32 družic. Díky této konstelaci lze přijímat signály z minimálně čtyř družic kdekoli na zemi. Aktuální počet provozuschopných družic je uveden na webových stránkách navigačního centra Ministerstva obrany USA [4].

2.2 Řídicí segment

Řídicí část systému (OCS) se skládá ze tří částí:

- hlavní řídicí středisko,
- monitorovací střediska,
- pozemní řídicí stanice.

Monitorovací stanice jsou rozmístěny po celém světě a jsou vybaveny přijímači s přesnými atomovými hodinami. Nepřetržitě měří pseudovzdálenosti ke všem družicím a výsledná data předávají hlavnímu řídicímu středisku.

Hlavním úkolem řídicího segmentu je sbírat a vyhodnocovat data z monitorovacích stanic. Data jsou použita pro výpočet tzv. efemerid, což jsou údaje o zdánlivé poloze pohyblivých astronomických objektů, v tomto případě družic. Tato data jsou pak zasílána uživatelům v navigační zprávě. Hlavní řídicí středisko sleduje družice na jejich oběžné dráze, zasílá jim různé povely, spravuje a synchronizuje atomové hodiny všech družic. Hlavní řídicí středisko se nachází v Schriever Air Force Base ve státě Colorado. Výsledky z hlavního řídicího střediska jsou předány pozemním řídicím stanicím, které data pošlou daným družicím přes radiový kanál jednou nebo dvakrát za den.

Kdyby došlo k vyřazení řídicího segmentu ať už z jakéhokoliv důvodu, přešly by družice do automatického režimu, kdy by si předávaly informace o svých efemeridách a stavu svých palubních hodin a dále zasílaly uživatelům potřebné informace v navigační zprávě. V tomto stavu by byly schopné vydržet po dobu až půl roku (Blok IIR), podle typu bloku dané družice [1].

2.3 Uživatelský segment

Uživatelská část GPS se skládá z přijímače a uživatelského prostředí. GPS přijímače převádějí signály z družice k určení polohy, rychlosti a času. Přijímač z přijatých časových značek a informací o efemeridách družice určí potřebná data. Obecně platí, že čím více signálů z jednotlivých družic se podaří zachytit, tím jsou určené souřadnice přesnější. Komunikace probíhá pouze od družice k přijímači, je tedy jednosměrná.

Přijímače lze rozdělit do mnoha kategorií, obecně je lze rozdělit podle typu použití, tj. jak přesně a rychle je potřeba určit polohu, rychlost a čas. S těmito požadavky souvisí princip dostupných přijímačů a lze je rozdělit podle typu přijímaných pásem, tj. zda-li pracují na jednom či více kanálech. Standardní přijímač obsahuje anténu, předzesilovač, procesor, komunikační rozhraní (zobrazovací jednotku), zdroj napětí, paměť a časovou základnu.

Uživatelé, kteří využívají systém GPS, lze rozdělit do dvou kategorií, na autorizované uživatele a ostatní uživatele. Autorizovaní uživatelé mají k dispozici dekódovací klíč k P(Y) kódu, popř. M kódu. Tyto kódy jsou vysílány na frekvencích L1 a L2. Autorizovaní uživatelé mají zaručenu vyšší přesnost a tyto služby využívá především vojenský sektor USA. Ostatní uživatelé mají k dispozici C/A kód na frekvenci L1 a C kód na frekvenci L2. Typickými odvětvími uživatelů využívajících civilního kódu jsou např. doprava, geologie, geofyzika, archeologie, zemědělství, turistika atd [1],[6].

2.4 GPS signály

Každý signál vyslaný družicí GPS je kombinací nosné vlny, dálkoměrného kódu a navigační zprávy. Vytváření signálu probíhá v celé řadě kroků. Vychází se při tom z faktu, že veškeré složky signálu jsou odvozovány násobením a dělením základní frekvence.

2.4.1 Kanály v systému GPS

Signály v systému GPS jsou vysílány ve frekvenčním pásmu v rozmezí 1-2 GHz. Pásma, na kterých družice vysílají, jsou záměrně zvolena tak, aby byl signál co nejméně utlumen na přenosové trase meteorologickými vlivy. Všechny signály vysílané z družic jsou řízeny atomovými hodinami s přesností 10^{-13} s a jsou generovány celočíselnými násobky kmitočtu $f_0 = 10,23$ MHz [1]. Systém GPS v současnosti vysílá na 5 kanálech:

- L1 ($154f_0 = 1575,42$ MHz),
- L2 ($120f_0 = 1227,62$ MHz),
- L3 ($135f_0 = 1381,05$ MHz),
- L4 ($180f_0 = 1841,40$ MHz),
- L5 ($115f_0 = 1176,45$ MHz).

Družice systému GPS vysílají radiové signály, které umožňují uživatelům určovat svoji polohu a čas. Po spuštění systému GPS byly vysílány signály se dvěma různými kódy:

- C/A kód (Coarse/Acquisition code), který je veřejně dostupný,
- P kód (Precision code), který je přístupný jen autorizovaným uživatelům.

S postupnou modernizací systému GPS a vypuštěním nových bloků družic se zavádějí nové kódy:

- C kód (Civilian code), který je veřejně dostupný,
- M kód (Military code), který je přístupný jen autorizovaným uživatelům.

V kanálu L1 je vysílán C/A kód pro civilní uživatele a P(Y) kód, který je šifrovaný a dostupný pouze pro autorizované uživatele, např. vojenské služby. Družice bloku IIR-M a novější vysílají na kanálu L1 také vojenský M kód.

Kanál L2 vysílá šifrovaný P(Y) kód pro autorizované uživatele. Družice bloku IIR-M a novější vysílají dále na kanálu L2 vojenský M kód a civilní C kód.

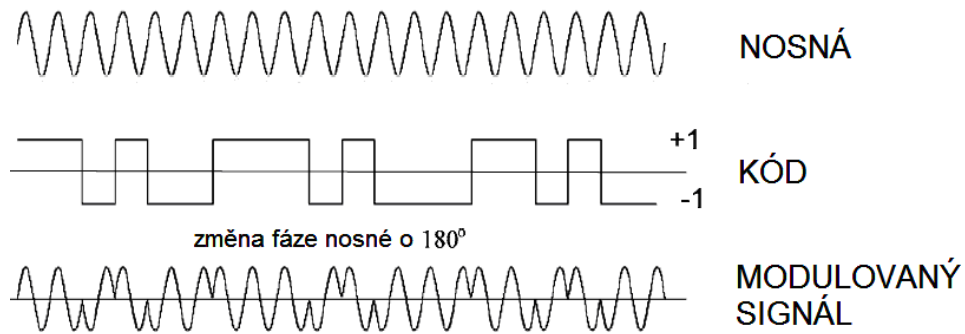
Na kanálu L3 se vysílají data pro monitorování startu balistických raket, detekci jaderných výbuchů a dalších vysokoenergetických zdrojů.

Kanál L4 vysílá signál pro měření ionosferické refrakce. Při šíření signálu ionosférou dojde ke zpoždění signálu, což způsobí chybu při určování polohy. Refrakci lze eliminovat měřením časového zpoždění na dvou kmitočtech.

Kanál L5 vysílá civilní signál SoL (Safety of life). Frekvence kanálu L5 spadá do mezinárodně chráněné oblasti letecké navigace, kde je garance minimálního šumu.

2.4.2 Modulace GPS signálů

Nosné L1 a L2 jsou modulovány fázovou modulací BPSK. Signály slouží k určení hodin z družice a předávají různé informace, jakými jsou např. orbitální parametry družice. Kódy se skládají ze sekvencí stavů +1 nebo -1, což odpovídá binárním hodnotám 0 nebo 1. Modulace BPSK provádí posun nosné o 180°, pokud dojde v kódu ke změně stavu (viz Obr. 2.2).



Obr. 2.2: BPSK modulace nosné.

Pokud jsou na jednu nosnou frekvenci modulovány dva signály, je druhá modulace opět fázově posunuta a jedná se tedy o modulaci QPSK. Protože všechny družice vysílají na stejném kmitočtu, používá se pro oddělení jejich signálu metody kódového multiplexu CDMA.

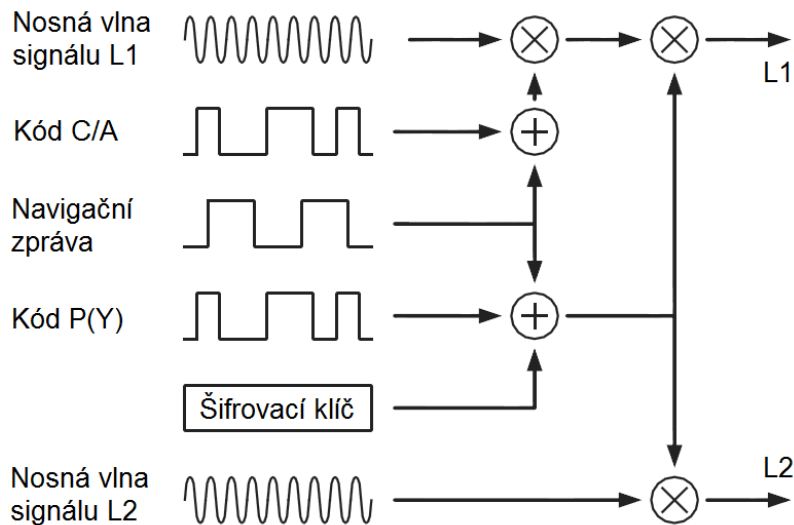
2.4.3 Kódy v systému GPS

Tak jako základní frekvence nosných kanálů, tak i frekvence kódů nesoucí požadované informace jsou odvozeny od základní frekvence f_0 . Původně byly v systému GPS vysílány pouze 3 druhy signálů C/A kód, P(Y) kód a navigační zpráva.

Signál vyslaný z družice je rozprostřen ve spektru, čímž je pak méně náchylný k rušení. Základní princip techniky rozprostření spektra je ten, že informace signálu s malou šířkou pásma je přeměněna (modulována) signálem s velkou šířkou pásma [1]. Generování pseudonáhodných sekvencí (PRN) je založeno na použití zařízení nazývaného zpětný posuvný registr (LFSR). Toto zařízení může generovat velké množství různých pseudonáhodných kódů, ale takto vygenerované kódy se budou po nějaké době opakovat. Pro rozlišení signálů z jednotlivých družic se využívají kódy z Goldových posloupností. Jednotlivé posloupnosti jsou vzájemně málo korelované a vedlejší maxima autokorelačních funkcí jsou zanedbatelná [6].

Signál L1 skládající se z P-kódu, C/A kódu a navigační zprávy je modulován pomocí kvadraturní fázové modulace QPSK. Schéma tvorby signálu L1 a L2 je znázorněno na Obr. 2.3. C/A kód je umístěn na nosné L1 se zpožděním o 90° oproti P-kódu, protože oba mají stejnou bitovou periodu. Pro L1 a L2 platí:

$$\begin{aligned} L1(t) &= P(t) \cdot W(t) \cdot \cos(2\pi f_1 t) + C/A(t) \cdot D(t) \cdot \sin(2\pi f_1 t) \\ L2(t) &= P(t) \cdot W(t) \cdot D(t) \cdot \cos(2\pi f_2 t) \end{aligned} \quad (2.1)$$



Obr. 2.3: GPS signály.

C/A kód (Coarse / Acquisition code):

C/A ($f_0/10$) kód se skládá z pseudonáhodné posloupnosti 1023 nul a jedniček, který je svým charakterem blízký šumu (tzv. PRN kód). Z takovéto posloupnosti lze vytvořit 2^{1023} kombinací, avšak matematicky bylo určeno 37 vzájemně nejméně korelovaných čísel, tzv. Goldových posloupností. Tyto posloupnosti jsou nejenom vzájemně málo korelované, ale i vedlejší maxima autokorelační funkce jsou zanedbatelná. C/A kód je vysílán rychlostí 1,023 Mbit/s, opakuje se tedy každou milisekundu (10^{-3} s). Každá družice má přidělenou svoji vlastní posloupnost nul a jedniček (svůj vlastní C/A kód), čímž jsou družice jednoznačně identifikovány. Rovnice pro dekodování C/A kódu jsou všeobecně známé, takže tento kód je běžně přístupný pro civilní aplikace. Proto je tento kód používán civilními přijímači pro navigaci a mapování. C/A kód je tedy základním signálem pro standardní polohovou službu [1],[10].

P(Y) kód (P-kód, precizní kód)

P(Y) je vojenský PRN kód. Jedná se o asymetricky šifrovaný kód P, který je možné číst jen za pomoci známého dešifrovacího klíče. Toto šifrování je označováno jako AntiSpoofing (A-S) a účelem je ověřit pravost signálu z družic. Je provedeno modulováním Y kódu $P \times Y = P(Y)$, jehož dešifrování mohou provádět pouze autorizovaní uživatelé pomocí W kódu $P = P(Y) \times W$. Detaily Y i W kódu podléhají vojenskému utajení. P(Y) je modulován na obě nosné L1 a L2 [1], [10].

P kód je také PRN kód přibližné délky $2,35 \cdot 10^{14}$ bitů. Je rozdělen na 38 sekvencí, kde 32 je vyhrazeno družicím a 6 rezervováno pro jiné účely. Délka jedné sekvence pro jednu družici je $6,1871 \cdot 10^{12}$ bitů a při datové rychlosti 10,23 Mbit/s se opakuje jednou týdně. Takováto délka P kódu zajistí, že jednotlivé posloupnosti budou ještě mnohem méně korelované, čímž se více eliminuje nejednoznačnost.

Navigační zpráva

Při určení polohy přijímače GPS je nutné znát přesnou polohu vysílajících družic v době

odeslání dálkoměrného kódu. Tato vzdálenost se počítá na základě parametrů její dráhy, které sama družice vysílá ve formě tzv. navigační zprávy. Navigační zpráva obsahuje nejen parametry oběžné dráhy dané družice, ale i celou řadu dalších údajů:

- čas vysílání počátku zprávy,
- přesné kepleriánské efemeridy družice,
- údaje umožňující přesně korigovat čas vysílání družice,
- almanach,
- koeficienty ionosférického modelu,
- stav družice.

Z navigační zprávy lze tedy určit přesné souřadnice družice a přesný čas, kdy byl dálkoměrný kód vyslán.

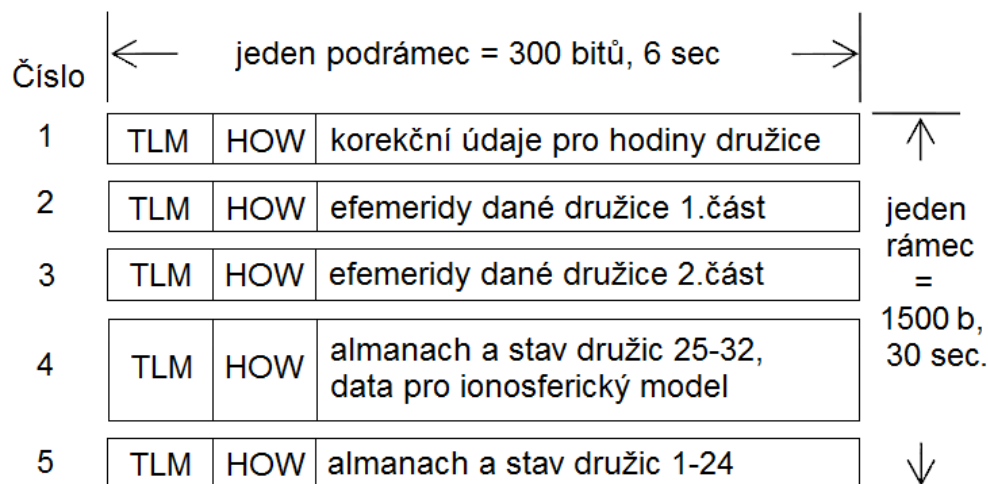
Almanach obsahuje méně přesné parametry oběžných drah všech družic umístěných v kosmickém segmentu (v podobě kepleriánských efemerid) a údaje o stavu těchto družic. To umožňuje přijímači, aby při znalosti aktuálního almanachu byl schopen začít vyhledávat družice aktuálně viditelné v dané oblasti. To umožní výrazně snížit dobu potřebnou pro nastartování přijímače a získání signálu. Tyto přibližné parametry oběžných drah využívá přijímač dále pro přednastavení přibližných poloh družic a Dopplerova posunu nosných frekvencí každé družice sestavy GPS.

Koeficienty ionosférického modelu používá přijímač pro přibližný odhad vlivu ionosféry na signály GPS pro kterékoliv místo a kterýkoliv čas. Ionosférickou refrakci lze ještě více eliminovat dvoufrekvenčním měřením.

Stav družice informuje uživatele o závadách na družici a o tom, zda a v jakém rozsahu je možné ji použít pro určování polohy. Kromě výše uvedených dat jsou ještě v rámci bloku 4 a 5 přenášeny další systémové údaje, které popisují další detaily celého systému. Data obsažená v navigační zprávě jsou za normálních okolností platná po dobu 4 hodin.

Navigační zpráva je modulovaná zvláště na signál. Skládá se z 25 rámců, jejichž odvysílání trvá 12,5 minuty. Každý rámeček obsahuje 5 podrámčů, které obsahují data:

1. podrámec: číslo týdne v časové referenci GPS, korekce pro atomové hodiny a zdravotní stav dané družice.
2. podrámec: efemeridy dané družice 1. část.
3. podrámec: efemeridy dané družice 2. část.
4. podrámec: almanach a zdravotní stav družic 25-32, data pro ionosférický model, stav vysílání režimu AntiSpoofing.
5. podrámec: almanach a zdravotní stav družic 1-24.

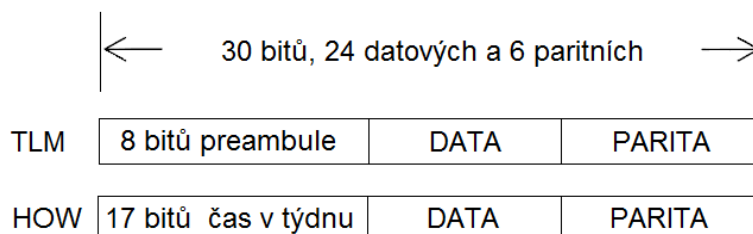


Obr. 2.4: Struktura rámce navigační zprávy.

První tři podrámece mají vždy stejný obsah. První obsahuje údaje o korekcích hodin, další dva pak přesné efemeridy družice. Jejich obsah se aktualizuje několikrát za den. Mezi okamžiky aktualizace je obsah těchto podrámců konstantní. Čtvrtý a pátý podrámec je použit pro přenos dalších stránek dat (je jich celkem 25, obsahují všechny zbylé přenášené údaje). Tyto podrámece se periodicky opakují vždy po 12,5 minutách a jejich obsah je aktualizován několikrát za týden.

Délka rámce 1500 bitů je rozdělena na již zmíněných 5 podrámců s délkou 300 bitů. Každý podrámec je dělen do 10 slov, každé po 30 bitech, z nichž pouze 24 bitů je použito pro přenos. Zbylých šest bitů je použito pro zabezpečení dat proti chybám při přenosu. Těchto 6 paritních bitů slouží k zabezpečení přenosu kanálového kódování, které se provádí pomocí Hammingova kódu (32,26) se vzdáleností 4. Tento mechanismus umožňuje detekovat ve slovu 3 chybné bity nebo 1 automaticky opravit.

První část podrámece obsahuje vždy telemetrické slovo (TLM) a informuje o začátku podrámece. Druhá část podrámece je tvořena tzv. předávacím slovem (HOW), které obsahuje informaci o pořadí podrámece v aktuálním týdnu GPS ($7 \times 24 \times 60 \times 2 \times 5 = 100\ 800$ možných hodnot) a pořadové číslo podrámece v aktuálním rámci. Protože jeden bit trvá 20 ms, je slovo dlouhé 0,6 s, podrámec 6 s a každý rámeček 30 s. Části navigační zprávy se distribují i mimo radiové vysílání družic ve zvláštních souborových formátech [1],[7],[10].



Obr. 2.5: Struktura telemetrického TLM a předávacího (handover) slova HOW.

2.5 Modernizace systému GPS

Po spuštění systému GPS došlo k rozsáhlému komerčnímu využití této technologie. Díky novým technologiím používaných v družicích a přijímačích se americká vláda rozhodla ještě více rozšířit možnosti výhod GPS pro komerční využití. V roce 2000 byla schválena modernizace celého systému, který byl nazván jako GPS III. GPS III by měl být spuštěn do roku 2014 [3]. Kromě stávajících GPS signálů se postupně budou z družic GPS přenášet i nové signály, zvýší se robustnost signálů a zlepší se odolnost proti rušení.

Pro letecké radionavigační služby bude zaveden kanál L5. Dále bude přidán civilní signál C/A na nosné L2C v kanálu L2 a do kanálu L1 a L2 bude přidán nový vojenský kód M. Tento nový vojenský kód má lepší vlastnosti především ve špatných podmínkách a má nahradit stávající P(Y) kód vysílaný na kanálech L1, L2.

Nový civilní kód L2C má přinést především eliminaci ionosférické refrakce měření na dvou kmitočtech a zvýšit rozlišovací schopnost systému při nejednoznačnosti řešení. Špičkové komerční dvoufrekvenční přijímače budou založeny na zpracování signálů z L1 kódovaného C/A kódem a nově navrženého L2C kódu pro L2. V příštích několika letech budou přijímače více složitější, aby mohly přijímat nové komerční kódy a šifrovaná data P kódem na L2. Signál L2C předpokládá vyšší ochranu přenosu a lepší korelační vlastnosti oproti kódu C/A, z důvodu větší délky kódu L2C. Užitečnější to bude především v náročnějších podmínkách, kde jsou GPS signály slabé, jako např. navigace v městské zástavbě, uvnitř budov či v zalesněných oblastech.

V kanálu L1 bude vysílán kód L1C se stejnou definicí jako L2C. L1C bude vysílán společně s C/A kódem na L1 frekvenci, který bude mít sníženou dostupnost, ale pro zachování zpětné kompatibility zůstane zachován.

Pro kanál L5 je vyhrazen kmitočet 1176,45 MHz. Pásmo L5 je mezinárodně rezervované pro letectví s nízkou mírou rušení. Signál bude přenášen s čipovou rychlostí 10,23 MHz podobný P kódu. Vysoká čipová rychlost kódu bude zajišťovat lepší vlastnosti než jaké má signál L1 kódovaný C/A kódem.

V neposlední řadě bude modernizována i navigační zpráva. Současné rámce budou nahrazeny systémem paketů dlouhých 300 bitů. To umožní jeho změny a úsporu šířky datového pásma. Dále bude použita ochrana chyb a číslo nesoucí časovou značku GPS týdně bude rozšířeno z 10-bitů na 13-bitové. Maximální hodnota bude nabývat čísla 8192 a jeho vyčerpání proběhne jednou za 157 let. Každý paket ponese informaci o zdravotním stavu družice a během několika sekund bude možno nezdravou družici vyřadit z výpočtu. To zvýší bezpečnost pro aplikace typu Safety Of Life (SoL).

Staré kódy a nové kódy (vojenské a komerční) pro L1, L2 a L5 budou modulovány složitějšími modulacemi, aby bylo lépe využito přidělené spektrum a všechny přenášené signály byly co nejlépe vzájemně odděleny. Pro modulaci vojenského kódu se bude používat binární posun nosné, tzv. BOC modulace (binary offset carrier) [3],[6].

3 GLONASS

GLONASS ("GLObalnaya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema") se velmi podobá systému GPS. Satelitní radionavigační systém GLONASS umožní uživateli určit čas a polohu uživatele kdekoli na Zemi nebo nad Zemí. Systém je provozován ruským ministerstvem obrany a je dostupný i civilním uživatelům.

Vývoj systému GLONASS byl zahájen v roce 1970 vytvořením dokumentu Ministerstva obrany SSSR o vývoji jednotného navigačního systému pro použití kdekoli na zemi, vodě i ve vzduchu. V roce 1991 bylo na oběžné dráze ve dvou rovinách 12 družic, což stačilo pro omezený provoz systému a plně provozu schopný byl od prosince roku 1995. Od počátku existence provází systém mnoho problémů, což mělo vliv na jeho přenos a činnost vůbec. Na konci 90. let byla kosmická část systému v úpadku a v roce 2002 obsahovala pouze 8 provozuschopných družic, čímž byl systém prakticky nepoužitelný. V srpnu roku 2001 byl ruskou vládou schválen federální program "Globální navigační systém", podle něhož bude systém plně funkční v roce 2011. S nátlakem ruského prezidenta a spoluprací Ruska s Indií na systému GLONASS dosáhl kosmický segment plně konstelace v roce 2008 [6], [10], [11]. Podobně jako systém GPS lze systém GLONASS rozdělit do tří segmentů:

- kosmická část,
- řídicí část,
- uživatelská část.

3.1 Kosmická část

Kosmická část je navržena na 24 družic rozmístěných ve třech orbitálních rovinách, vzájemně posunutých o 120° . Družice jsou na každé oběžné dráze rozmístěny rovnoměrně o 45° . Pro dosažení lepšího pokrytí jsou družice v jednotlivých rovinách posunuty o 15° , resp. 30° . Družice obíhají po kruhových oběžných drahách se sklonem $64,8^\circ$ ve výšce 19 130 km a s oběžnou dobou 11:15:44. Takovéto uspořádání družic zajišťuje viditelnost minimálně šesti a maximálně jedenácti družic kdykoliv a kdekoli na zemském povrchu [5],[6],[10]. Družice jsou číslovány následovně:

- dráha 1: družice 1-8,
- dráha 2: družice 9-16,
- dráha 3: družice 17-24.

Družice systému GLONASS jsou označovány jako Uragan s příslušným indexem podle daného bloku. Vynášeny jsou z kosmodromu Bajkonur v sestavách a zásadním problémem družic byla jejich krátká životnost. Oproti družicím GPS jsou více poruchové, což způsobuje zvýšené odstávky dlouhé až několik měsíců. Družice obsahuje atomové hodiny s cesiovým oscilátorem s přesností 10^{-13} s, 12 antén pro vysílání radiových kódů v pásmu 1-2 GHz (pásmo L), laserové odražeče pro měření polohy družice, antény a komunikační jednotky s podzemní částí systému a solární

panely s akumulátory jako zdroj energie [6],[10].

Pro popis stavu kosmického segmentu jsou definovány dva stavy, plná operační schopnost FOC, kdy je nejméně 24 družic plně funkčních a částečná operační schopnost IOC, kdy je nejméně 12 družic plně funkčních. Aktuální stav kosmického segmentu je možné zjistit na oficiálních stránkách ruského informačního a analytického centra [5].

3.2 Pozemní část

Pozemní řídicí segment je kompletně situován na území bývalých států SSSR, z čehož vyplývá časové omezení, kdy může být monitorován kosmický segment. Hlavní řídicí centrum SCC se nachází v KrasnoznamenSKU nedaleko Moskvy, ostatní řídicí a monitorovací stanice jsou rozmístěny v Ternopolu, Petrohradu, Jenisejku, Komsomolsku na Amuru, Balkaši, Šelkovu, MurmanskU, Jakutsku atd. (viz [5]).

Tyto řídicí a kontrolní stanice nepřetržitě monitorují signály ze všech družic, provádějí laserová měření vzdálenosti mezi stanicemi a družicemi a tato data posílají do hlavního řídicího centra. Zde se tyto informace zpracují, vyhodnotí se přesné parametry oběžných drah družic a korekce atomových hodin. Výsledky se přenášejí na stanici pro komunikaci s družicemi a aktualizují se navigační zprávy, které obsahují pozice, rychlost či zrychlení družic, korekce atomových hodin, přibližné pozice ostatních družic, používané frekvence a jejich zdravotní stav [10],[12].

Řídicí a kontrolní segment komunikuje s uživateli také prostřednictvím zpráv NAGU [5], které zveřejňují plánované odstávky družic, jejich stažení a uvedení do provozu nebo i zpětně informace o nezdravé družici.

3.3 Uživatelská část

Podobně jako u systému GPS uživatelé pomocí přijímače přijímají signály z jednotlivých družic, které jsou v danou chvíli nad obzorem. Na základě přijatých dat, znalosti polohy družic přijímač vypočítá polohu přijímače, nadmořskou výšku a zobrazí přesné datum a čas. Komunikace probíhá pouze od družic k uživateli, přijímač je tedy pasivní. Uživatelé využívající systém GLONASS lze rozdělit do dvou skupin:

- autorizovaní uživatelé,
- ostatní uživatelé.

Autorizovaní uživatelé jakými jsou např. vojenský sektor Ruské federace a vybrané vládní instituce využívají službu High Positioning (HP). Tito uživatelé mají zaručenu vyšší přesnost systému. Ostatní uživatelé, především civilní, mohou využívat službu Standard Positioning (SP). Přijímače systému GLONASS nejsou komerčně zdaleka tak rozšířené jako přijímače GPS. Avšak v současnosti jsou na trhu běžně dostupné přijímače umožňující detekovat spolu s GPS i systém GLONASS a využívat oba systémy současně. Tím se výrazně zpřesňuje poloha přijímače a zkrátí se doba zaměření navigace [10],[12].

3.4 Kanály systému GLONASS

V systému GLONASS je přenos dat z družic k jednotlivým uživatelům řešen frekvenční modulací FDMA, na rozdíl od ostatních systémů GNSS, které používají přístup CDMA. Přenášení každého signálu z družice na jiné nosné frekvenci přináší problémy s interferencemi mezi kanály, a proto je vyžadováno širší vysílací pásmo pro daný kanál. Frekvence signálů jsou zvoleny v pásmech s minimálními meteorologickými vlivy. Podobně jako v systému GPS jsou kanály označovány jako L1, L2.

- L1 (1598,0625 - 1605,3750 MHz),
- L2 (1242,9375 - 1248,6250 MHz).

Na kanálu L1 je vysílán HP kód a SP kód s vysílacím výkonem 64 W, na kanálu L2 (platí $L2 = L1 \times 7/9$) je vysílán pouze HP kód a s novými družicemi Uragan-M také SP kód s vysílacím výkonem 40 W. Pro každou družici se frekvence mírně liší a platí zde následující vztahy:

$$\begin{aligned} L1(n) &= 1602,0 + n \times 0,5625 \text{ MHz} \\ L2(n) &= 1246,0 + n \times 0,4375 \text{ MHz} \end{aligned} \quad (3.1)$$

kde $-7 \leq n \leq 6$ je číslo kanálu. Původně systém GLONASS používal plný rozsah kmitočtových kanálů ($1 \leq n \leq 24$), tedy každá družice měla svou vlastní nosnou frekvenci, avšak vzhledem k problémům s interferencí s blízkým okénkem vyhrazeným pro radioastronomická pozorování bylo rozhodnuto, že bude počet používaných kmitočtových kanálů snížen (vynecháním kanálů 15 až 20) a družice nacházející se na opačných stranách oběžné dráhy (tedy družice, které nemohou být za žádných okolností viditelné současně z jednoho bodu) sdílejí stejný kmitočtový kanál.

S novými družicemi Uragan-K, Uragan-MK atd. jsou zaváděny nové kanály L3, L5 a L1CR. Kanál L3 (1197-1217 MHz) je plánován jako třetí frekvence s HP a SP kódem. Pro kanál L5 (1176,45 MHz) je plánovaný signál typu Safety of Life (SoL) založený na přístupu CDMA pro vzájemnou součinnost s ostatními systémy GNSS (GPS, Galileo). Kanál L1CR (1575,42 MHz) je plánován jako další civilní signál založený na přístupu CDMA pro vzájemnou součinnost s ostatními systémy GNSS [10],[12].

3.5 Signály systému GLONASS

Družice tohoto systému vysílají dva typy navigačních signálů a současně se signálem standardní přesnosti vysílá navigační zprávu. Frekvence a časování signálů je odvozeno od cesiových atomových hodin umístěných na družici. Hodiny pracují s frekvencí 5 MHz. Intenzita signálů na povrchu Země je srovnatelná se systémem GPS. Jako referenční čas je používán v systému GLONASS UTC(SU), který je synchronizován s UTC. Na rozdíl od systému GPS používá systém GLONASS jako referenční vztaznou soustavu PZ 90 a od roku 2007 jeho modifikaci PZ 90.02.

3.5.1 Navigační signál standardní přesnosti SP

Signál SP je přenášen pouze na nosné frekvenci L1 a je obdobou C/A kódu systému

GPS. Jedná se o pseudonáhodnou posloupnost 511 nul a jedniček s frekvencí 0,511 MHz. Tato sekvence se tedy opakuje každou milisekundu a všechny družice vysílají stejnou sekvenci.

3.5.2 Navigační signál vysoké přesnosti HP

Signál HP je přenášen na obou nosných frekvencích L1 a L2 a je obdobou P-kódu systému GPS. Jedná se o pseudonáhodnou posloupnost nul a jedniček s frekvencí 5,11 MHz, jejíž původní délka 33 554 432 bitů (2^{25}) je zkrácena na $5,11 \cdot 10^6$ bitů tak, aby se sekvence opakovala každou sekundu. Všechny družice opět vysílají stejnou sekvenci.

3.5.3 Navigační zpráva

Každá družice vysílá současně se signálem standardní přesnosti navigační zprávu, která podobně jako u systému GPS obsahuje:

- číslo družice v systému,
- příznak stavu družice,
- kalendářní číslo dne v rámci čtyřleté periody, s počátkem v přestupném roce,
- korekce družicového času na čas GLONASS,
- posun hodin družice vzhledem k systémovému času GLONASS,
- efemeridy dané družice,
- almanach GLONASS.

Navigační zpráva má délku 7500 bitů. Je modulována rychlostí 50 bitů/s a její odvysílání tedy trvá 2,5 minuty. Je rozdělena do 5 rámců a každý rámeček je rozdělen na 15 podrámečků. Jeden podrámeček má délku 100 bitů. Každý rámeček obsahuje efemeridy družice a posun hodin družice. Tyto údaje se opakují každých 30s. Tyto informace se aktualizují po 30 minutách s tím, že platí pro časový interval ± 15 minut od aktualizace.

Součástí přesných efemerid a almanachu jsou i dva příznaky stavu družice, které jsou nastavovány jednak na základě automatické diagnostiky družice a na základě příkazu z pozemního řídicího komplexu. Almanach obsahuje informace o všech družicích systému GLONASS včetně kepleriánských parametrů oběžných drah, hrubých korekcí všech družicových hodin vzhledem k systémovému času GLONASS a příznak stavu pro každou družici v konstelaci. Almanach je platný po dobu 24 hodin [10],[12].

4 GALILEO

Systém Galileo je evropský program pro nejmodernější globální družicový navigační systém poskytující velmi přesné služby globálního pozičního systému pro civilní využití. Projekt byl pojmenován podle italského vědce Galilea Galileiho a jeho výstavbu zajišťují státy Evropské unie prostřednictvím Evropské kosmické agentury ESA a dalších institucí. První počátky systému Galileo se datují k roku 1999, kdy různé koncepty evropských států byly sjednoceny v jeden celek a oficiálně v roce 2003 byla zahájena první fáze vývoje systému. Podnětem pro vývoj nového systému bylo především to, že současné systémy GPS a GLONASS jsou provozovány vojenskými složkami USA resp. Ruska a jejich dostupnost může být v krizových situacích omezena, či zcela vypnuta. Systém Galileo je určený především pro civilní využití [6],[8].

Systém Galileo se nebude příliš lišit od ostatních částí systému GNSS, bude poskytovat samostatné navigační a lokalizační služby, ale zároveň bude kompatibilní s ostatními dvěma globálními družicovými navigačními systémy. Standard o využití ostatních systémů umožní určit polohu v reálném čase s přesností až na jednotky metru. Umožní to také výrazně lepší dostupnost služeb i v extrémních podmínkách a bude informovat uživatele i o výpadku jakékoliv družice během několika sekund. Díky tomu bude systém vhodný zejména pro aplikace, kde je na prvním místě bezpečnost, jako např. řízení vlaků, aut či přistání letadel [2].

Původní plány počítaly s plným provozem systému v roce 2008. Systém měl být původně financován soukromým sektorem, ale pro příliš vysoký rozpočet od něj investoři ustoupili a celého projektu se ujala Evropská unie. Plná dostupnost a kvalita poskytovaných služeb se předpokládá až s finálním rozvinutím kompletního kosmického a pozemního segmentu, tzn. zprovozněním systému v konstelaci 30 družic. Dosažení tohoto mezníku je plánováno na období 2019/2020 [2],[13]. Podobně jako GPS a GLONASS lze systém Galileo rozdělit do tří segmentů:

- kosmický segment,
- řídicí a kontrolní segment,
- uživatelský segment.

4.1 Kosmický segment

Kosmická část systému Galileo se skládá z 30 operačních družic, kde 27 družic je aktivních a 3 družice záložní. Družice budou obíhat na středních oběžných drahách ve výšce 23 616 km nad povrchem Země se sklonem 56° k zemskému rovníku rozmístěných ve třech oběžných rovinách vůči sobě posunutých o 120° . Sklon oběžných drah spolu s oběžnou výškou zajistí dobré pokrytí signály i v severních oblastech Evropy. Na každé dráze bude umístěno vždy devět aktivních družic a jedna záložní připravená nahradit v případě poruchy nefunkční družici. Družice Galileo budou vybaveny velmi stabilními hodinami dvojího typu. Rubínové hodiny jsou tvořeny atomovým rezonátorem s řídicí elektronikou a jejich přesnost je tak vysoká, že se zpozdí o jen 3 vteřiny za milion let. Vodíkové maserové hodiny jsou také tvořeny

rezonátorem s řídicí elektronikou. Jejich přesnost bude ještě vyšší, zpozdí se o 1 vteřinu za milion let.

První testovací družice byla na oběžnou dráhu vyslána v roce 2005 pojmenovaná Giove-A, druhá družice Giove-B byla vynesena na oběžnou dráhu v roce 2008. První dvě operační družice byly vyslány z kosmodromu ve Francouzské Guyaně 21. října 2011. Umístěním na oběžné dráhy a zprovozněním čtyř družic dojde k završení prostřední fáze programu Galileo, tzv. fáze IOV (In Orbit Validation), která má za cíl ověřit technické charakteristiky navrhované architektury a signálů systému v reálných podmínkách kosmického prostoru. Poté bude následovat fáze FOC (Full Operational Capability), jejímž cílem je vypustit zbylé družice tak, aby byl systém Galileo plně funkční v časovém horizontu 2019/2020 [2],[13].

4.2 Řídicí a kontrolní segment

Pozemní řídicí část systému Galileo se podobně jako u systémů GPS a GLONASS bude starat o řízení družic, kontrolu správné konstelace, určení přesné oběžné dráhy družice, synchronizaci hodin, sledování funkčnosti a integrity celého systému a vysílání pohotovostních a poplašných signálů. Součástí celého komplexu budou centra pro řízení systému, síť pozemních monitorovacích stanic rozmístěných po celém světě. Celá pozemní řídicí část je teprve ve výstavbě a lze ji rozdělit na tři části.

4.2.1 Globální část

Jádro pozemního řídicího segmentu tvoří dvě řídicí centra. První řídicí centrum GCS (Ground Control Segment) se nachází v německém Oberpfaffenhofenu. GCS bude přijímat data ze snímacích stanic (Sensor stations) rozmístěných po celém světě. Snímací stanice shromažďují data o oběžných drahách družic, přesnosti satelitních hodin a síle signálu přijatých z družic. Dále bude GCS přijímat telemetrická data družic přijatá v TTC stanicích (Telemetry, Tracking and Command Stations). Z těchto dat GCS vyhodnotí stav všech družic a vytvoří potřebné povely pro správnou konstelaci kosmického segmentu. Tyto povely předá TTC stanicím, které je následně předají jednotlivým družicím. Pozemní stanice TTC se budou nacházet ve městech Kiruna (Švédsko), Korou (Francouzská Guyana), New Norcia (Austrálie), na ostrově Reunion (Indický oceán) a městě Papeete (Francouzská Polynésie).

Druhé řídicí centrum GMS (Ground Mission Segment) se nachází v italském městě Fucino. Hlavním úkolem centra GMS bude sestavovat navigační zprávy a ty předávat pěti vysílacím stanicím (Uplink stations). Tyto stanice budou rozmístěny po celém světě a odtud budou vysílat data jednotlivým družicím. Dále bude GMS přijímat data ze všech snímacích stanic a z těchto dat vytvoří korekci satelitních hodin a oběžných drah družic, které obsahuje navigační zpráva. V budoucnu budou obě řídicí centra navzájem sesynchronizována a každé řídicí centrum bude umět vykonávat funkci toho druhého tak, aby v případě poruchy centra mohlo druhé jednoduše vykonávat funkci GCS a GMS současně. Globální část systému bude také obsahovat systém monitorovacích stanic, tři vysílacích stanic o integritě systému a jedné stanice pro výpočet integrity systému. Administrativní centrum celého systému sídlí v Praze [2],[13].

4.2.2 Regionální a lokální část

Tato podsložka řídicího pozemního segmentu se bude skládat z několika externích regionálních integrovaných systémů (External Region Integrity Systems, ERIS). ERIS budou vytvořeny, spravovány a provozovány soukromými společnostmi, případně státy a skupinami států mimo EU. Úkolem ERIS systémů bude zajišťovat hlášení o integritě systému nezávisle na hlášení systému Galileo [13].

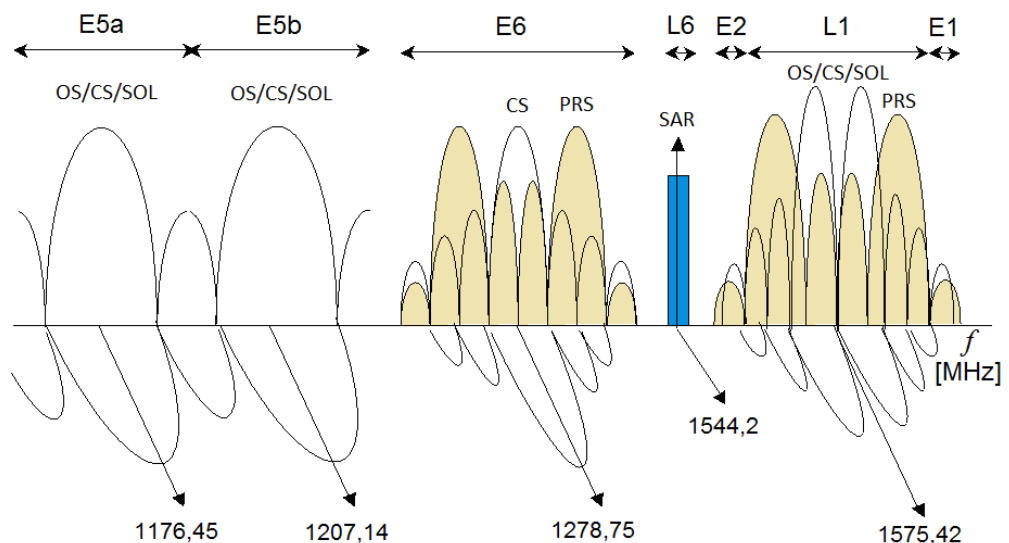
Lokální složky slouží pro zkvalitnění lokálního příjmu signálu Galileo. Typickým příkladem jsou místa a oblasti, kde je příjem signálu z družic z různých důvodů problematický. Umožní další zvýšení přesnosti a integrity v okolí letišť, přístavů, velkých nádraží nebo dokonce i uvnitř budov či podzemních garáží. K šíření informací budou využívat především (existující) pozemní komunikační systémy [13].

4.3 Signály systému Galileo

Signály vysílané družicemi Galileo budou v přijímačích zpracovávány pro následný výpočet polohy. Během tohoto procesu přijímače určují vzdálenost uživatele od družice. Přijímače také dekódují navigační data, která obsahují nezbytné informace pro výpočet polohy uživatele. Příkladem těchto informací může být poloha družice nebo chyby chodu družicových hodin přesně určené pozemním segmentem.

Díky tomu, že každá družice bude vysílat 10 různých navigačních signálů, bude moci systém Galileo nabídnout pět různých druhů služeb:

- základní službu OS (Open Service),
- komerční službu CS (Commercial Service),
- službu "kritickou" z hlediska bezpečnosti SoL (Safety of Life service),
- vyhledávací a záchrannou službu SAR (Search And Rescue service),
- veřejně regulovanou službu PRS (Public Regulated Service).



Obr. 4.1: Frekvenční pásmo systému Galileo.

Signály obsahují navigační data a signály, které nenesou žádná data, tzv. pilotní signály. Na Obr. 4.1 je tento fakt zvýrazněn tím, že datové kanály a pilotní kanály jsou nakresleny ve dvou navzájem kolmých rovinách. Je to vyjádření skutečnosti, že datové a pilotní kanály jsou fázově vůči sobě posunuty o 90° , což umožňuje přijímat je navzájem odděleně [2],[6],[13].

Družice využívají frekvence v rozmezí od 1,1 do 1,6 GHz. Jedná se o frekvenční pásmo obzvláště vhodné pro mobilní navigaci a komunikační služby. Základní frekvence v systému Galileo je 10,23 MHz. Ostatní frekvence jsou odvozeny od této základní frekvence podobně jako u ostatních systémů. Frekvenční pásmo v systému Galileo bude rozděleno do několika kanálů

- E5a (1164 – 1191,795 MHz, s pilotním kmitočtem na 1176,45 MHz),
- E5b (1191,795 – 1215 MHz, s pilotním kmitočtem na 1207,14 MHz),
- E6 (1260 – 1300 MHz, s pilotním kmitočtem na 1278,75 MHz),
- L6 (1544 – 1545 MHz, s pilotním kmitočtem na 1544,2 MHz),
- E2 (1559 – 1563 MHz),
- L1 (1563 – 1587 MHz, s pilotním kmitočtem na 1575,42 MHz),
- E1 (1587 – 1591 MHz).

Systém Galileo bude vysílat navigační signály s pravotočivou kruhovou polarizací (RHCP). Kruhová polarizace je výhodná především proto, že při odrazu od předmětu či překážky změni svoji polarizaci na lineární a v přijímači může být tato skutečnost potlačena. Všechny družice systému Galileo budou vysílat na stejné jmenovité frekvenci s využitím kódového přístupu CDMA. Systém Galileo bude používat jiné modulace pro své signály, binární posun nosné BOC a fázové klíčování BPSK.

Specifická podoba spektra signálů systému Galileo je důsledkem použité modulace. Modulace byla zvolena tak, aby se vyhnulo interferencím s ostatními družicovými navigačními systémy ve stejném pásmu, což je případ kanálu L1 (frekvenční pásmo GPS). Modulace má název BOC(1,1), což znamená binární posun nosné s poměrem (1,1). Tento druh modulace umožňuje signálům systému Galileo využívat stejné frekvence bez vzájemné interference se signály GPS [2],[6],[13].

4.4 Kódy systému Galileo

Všechny družice vysílají na stejných frekvencích, to znamená, že např. signál v pásmu L1 (1575,42 MHz) je vysílán z každé družice systému Galileo. Proto se pomocí modulace k signálu přidává kód, díky němuž přijímače pak rozpoznají, od které družice signály přicházejí, podobně jako u systému GPS. Z tohoto kódu se také měří doba, za kterou signál urazil vzdálenost mezi danou družicí a přijímačem. Kód je originální pro každou družici a při identifikaci družicového signálu přijímačem se porovnává (koreluje) přijatý kód signálu s přesnou kopií signálu uloženého v přijímači. Přijaté kódy a kódy uložené v přijímači jsou do určité míry podobné. To znamená, že čím složitější (delší) kódy, tím je těžší záměna kódů a tím i záměna signálů z družic. Hledá se tedy kompromis mezi jistotou identifikace signálu a dobou identifikace.

Jednotná délka kódů by nemohla uspokojit všechny uživatele. Nepohybujícímu se uživateli v budově by vyhovovaly dlouhé kódy, zatímco rychle se pohybující uživatel mimo budovu by preferoval krátké kódy. Tento problém je v systému Galileo řešen vytvořením více různých kódů s rozdílnými vlastnostmi na více frekvencích. Systém Galileo bude využívat tolik signálů také z důvodu pro odhad ionosférické chyby. Při kombinování měření na dvou různých frekvencích od jedné družice lze vliv ionosféry potlačit. Proto jsou Galileo služby realizovány minimálně pomocí dvou signálů [2],[13].

V systému GPS se kód skládá z pseudonáhodné posloupnosti nul a jedniček, tzv. PRN kódu. Z takovéto posloupnosti jsou vybrány nejméně korelované tzv. Goldovy posloupnosti. V systému Galileo jsou kódy generovány také z Goldových posloupností, dále jsou však vybrané signály ještě modulovány tzv. sekundárním kódem. Primární kód je vygenerován pomocí posuvného registru LFSR, sekundární kód je speciální posloupnost uložená v paměti vysílače, resp. přijímače.

4.4.1 Kódy v pásmu E1

V pásmu E1, jak už bylo zmíněno, jsou přenášeny signály pro tzv. základní službu OS a službu PRS. V tomto pásmu je použita modulace MBOC (Multiplexed BOC). Díky modulaci BOC mohou být na těchto kmitočtech přenášeny i signály systému GPS, konkrétně C/A kód, P(Y) kód, budoucí M kód a L1C kód. V kanálu E1 jsou přenášeny tři složky:

- datový signál veřejné regulované služby PRS označovaný E1-A,
- datový signál základní služby OS označovaný E1-B,
- pilotní signál základní služby OS označovaný E1-C.

MBOC (6,1,1/11) je výsledkem multiplexování širokopásmového signálu BOC (6,1) s úzkopásmovým signálem BOC (1,1) tak, že je v průměru přidělena 1/11 výkonu vysokofrekvenční složce. Tento signál lze popsat následujícím vztahem:

$$G_{\text{MBOC}(6,1,1/11)}(f) = \frac{10}{11} G_{\text{BOC}(1,1)}(f) + \frac{1}{11} G_{\text{BOC}(6,1)}(f). \quad (4.1)$$

Parametry signálů systému Galileo jsou shrnuty přehledně v Tab. 4.1.

4.4.2 Kódy v pásmu E6

Pásmo označené jako E6 v systému Galileo se skládá z následujících složek:

- datový signál veřejné regulované služby PRS označovaný E6-A,
- datový signál komerční služby CS označovaný E6-B,
- pilotní signál komerční služby CS označovaný E6-C.

4.4.3 Kódy v pásmu E5

V pásmu označeném jako E5 budou přenášeny jednak signály systému Galileo, tak i signály L5 systému GPS.

Pásmo E5 bude obsahovat následující signály:

- datový signál označovaný E5a-I,
- pilotní signál označovaný E5a-Q,
- datový signál označovaný E5b-I,
- pilotní signál označovaný E5b-Q.

Pomocí signálu pásma E5 budou realizovány služby OS, CS a SoL. Všechny signály budou modulovány pomocí tzv. AltBOC modulace. AltBOC modulace je modifikovaná verze BOC modulace s frekvencí kódu 10,23 MHz a je velmi podobná tomu, jako by byly použity dvě modulace BPSK(10) s posunutím nosné frekvence o 15 MHz směrem k nižším, resp. vyšším kmitočtům.

Tab. 4.1: Přehled parametrů kódů v systému Galileo a GPS [14].

Označení	Typ modulace	Frekvence nosné	Frekvence kódu	Délka prim. kódu	Délka sek. kódu	Perioda kódu
		[MHz]	[MHz]	[poč. bitů]	[poč. bitů]	[ms]
E1-A	MBOC(15,2,5)	1575,42	2,5575	N/A	N/A	N/A
E1-B	MBOC(6,1, 1/11)	1575,42	1,023	4092	-	4
E1-C	MBOC(6,1, 1/11)	1575,42	1,023	4092	25	100
E5a-I	BPSK(10)	1176,45	10,23	10230	20	20
E5a-Q	BPSK(10)	1176,45	10,23	10230	100	100
E5b-I	BPSK(10)	1207,14	10,23	10230	4	4
E5b-Q	BPSK(10)	1207,14	10,23	10230	100	100
E6-A	BOC _{cos} (10,5)	1278,75	5,115	N/A	N/A	N/A
E6-B	BPSK(5)	1278,75	5,115	5115	-	1
E6-C	BPSK(5)	1278,75	5,115	5115	100	100

Frekvenční pásma pro družicovou navigaci jsou už velmi obsazená různými službami a očekává se tedy přechod nových služeb na nové volné kmitočty. Pro systém Galileo bylo v roce 2000 uděleno oprávnění používat frekvenční pásmo 5010 - 5030 MHz tzv. pásmo C [14],[15].

4.4.4 Navigační zpráva v systému Galileo

Družice systému Galileo budou vysílat 4 druhy navigačních zpráv:

- volně přístupná navigační zpráva F/NAV,
- navigační zpráva integrity systému I/NAV,
- komerční navigační zpráva C/NAV,
- vládní navigační G/NAV.

Navigační zpráva F/NAV bude vysílána se základní službou OS. Bude přenášena rychlostí 25 b/s a bude přenášena s datovými signály E5a-I. Navigační zpráva F/NAV bude obsahovat potřebná data pro navigaci a určení pozice. Těmito daty jsou efemeridy

družice podobné kepleriánským v systému GPS. Efemeridy budou aktualizovány každé 3 hodiny a budou platné po 4 hodiny. Zvětšení intervalu o jednu hodinu je zvoleno z důvodu možného výpadku nebo zpoždění. Almanach navigační zprávy je podobný těm užitých v systému GPS a GLONASS.

Navigační zpráva I/NAV bude obsahovat parametry pro určení integrity systému. Navigační zpráva I/NAV umožní uživatele během několika vteřin varovat, pokud z nějakého důvodu dojde k nedodržení garantovaných limitů systému. Zpráva bude přenášena se signály základní služby OS tedy E5b-I, E1-B s rychlostí 125 b/s. Tato navigační zpráva bude součástí služby kritické z hlediska bezpečnosti SoL. Navigační zpráva bude obsahovat také informace pro vyhledávací a záchranou službu SAR.

Navigační zpráva C/NAV bude obsahovat doplňující informace pro různé plánované komerční služby. Těmito informacemi budou např. různé korekce pro vysoce přesné určení pozice, informace o počasí a provozu celého systému. Zpráva bude přenášena se signálem E6-B s rychlostí 500 b/s. Data budou šifrována tak, aby k nim měli přístup jenom autorizovaní uživatelé.

Navigační zpráva G/NAV bude obsahovat šifrovaná data pro veřejně regulovanou službu PRS. Navigační zpráva bude přenášena v kanálech E1-A a E6-A s datovou rychlostí 50 b/s. Tato zpráva bude obsahovat informace nezbytné pro navigační služby, data pro určení integrity systému a další data veřejným uživatelům nedostupná.

Každá navigační zpráva je v patřičném kanálu přenášena jako soubor několika rámců. Každý rámec se skládá z několika dílčích podrámců a podrámců se dále skládají z několika stránek. Toto uspořádání umožňuje přenášet data třemi různými rychlostmi. Pokud je třeba přenést data k uživateli velmi rychle, jako např. informace o integritě systému, tak jsou aktualizována na úrovni stránek. Pro pomalý případ jsou data aktualizována na úrovni rámců a pro prostřední případ jsou data aktualizována na úrovni podrámců. Každá stránka začíná synchronizačním slovem SW, za nímž následují data, CRC slovo a každá stránka je ukončena ukončovacími bity (Tail bits). V navigačních zprávách systému Galileo jsou použity 3 typy kódování proti chybám. CRC slovo obsahuje redundantní bity pro následnou cyklickou detekci chyb z přijatých dat. Poslední slovo s ukončovacími bity umožní detekovat chyby pomocí tzv. Viterbiho dekódování. Třetím způsobem zabezpečení proti chybám při přenosu je prokládání rámců [2],[15]. Parametry všech typů navigačních zpráv jsou přehledně uvedeny v následující tabulce (Tab. 4.2).

Tab. 4.2: Tabulka parametrů navigační zprávy v systému Galileo [15].

Typ navigační zprávy	kanál	Datová rychlost	Doba trvání stránky	Počet stránek v subrámcích	Počet subrámců v rámci
		[b/s]	[s]	[-]	[-]
F/NAV	E5a-I	25	10	5	12
I/NAV	E1-B, E5b-I	125	1	30	18
C/NAV	E6-B	500	1	15	8
G/NAV	E1-A, E6-A	50	N/A		

5 URČOVÁNÍ POLOHY

Pro určování polohy musí družicový segment skládající se z jednotlivých družic SV (Space Vehicle) zajistit potřebné pokrytí všech míst na Zemi s dostatečnou kvalitou signálu. Pro určení polohy ze zpracovávaných signálů družic lze použít následující metody:

- úhломěrná,
- dopplerovská,
- interferometrická,
- dálkoměrná.

Přestože se jednotlivé metody od sebe velmi liší, pro všechny je společné to, že pro určení polohy je nutné znát přesnou polohu družic [10],[16].

5.1 Úhломěrná metoda

Tato metoda patří k nejstarší, ale také nejméně přesné. Z místa určování polohy zaměřujeme družici a měříme její elevační úhel. Geometrickým místem bodu s konstantním elevačním úhlem k satelitu je kužel s vrcholem v místě družice. Pokud bude toto měření po určité době opakováno nebo provedeno k jiným družicím, bude tím určen další kužel. Průsečnice kuželů s povrchem Země se protínají v měřeném bodě. Řešením je hledání průsečíků kuželových ploch. Pro přesné určení elevačního úhlu je nutné použít směrové antény s úzkým svazkem ve směru maxima vyzařovací charakteristiky.

5.2 Metoda dopplerovská

Družice, které neobíhají na geostacionární dráze, vysílají signál se stabilním kmitočtem f_{vysl} . Signál z družice vhodným způsobem přenáší časové značky vysílané v časových okamžicích t_i, t_{i+1}, t_{i+2} s konstantním časovým intervalem $\Delta T = t_{i+1} - t_i$. Dopplerův jev způsobí, že frekvence přijatého signálu f_{prij} je jiná než frekvence signálu vyslaného družicí f_{vysl} . Z přesného oscilátoru v přijímači se vypočte rozdílová složka mezi frekvencí oscilátoru a frekvencí přijatého signálu $F = f_0 - f_{\text{prij}}$. Periode výstupního signálu čítá čítač, který je spouštěn a blokován časovými značkami t_i .

Vzdálenost mezi družicí a přijímačem d_i je v době přijetí každé značky jiná. Časová značka přijde do přijímače se zpožděním Δ_i , pro které platí $\Delta_i = d_i/c$. Čítač měřící rozdílový kmitočet mezi dvěma signály měří v podstatě rozdíl fází těchto dvou signálů. Dopplerův jev se projevuje také v časové oblasti, proto je počet period mezi dvěma značkami u signálu odeslaného družicí a signálu přijatého stejný. Pro určení polohy potom stačí provést měření nejméně ve třech periodách mezi čtyřmi časovými značkami a vyřešit následující soustavu rovnic

$$N_i = \frac{f_0}{c} \cdot \left(\sqrt{(x_{i+1} - x)^2 + (y_{i+1} - y)^2 + (z_{i+1} - z)^2} - \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \right) + \Delta T \cdot F, \quad (5.1)$$

kde c je rychlost světla, x_i, y_i, z_i jsou souřadnice družice v čase t_i , $x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}$ jsou souřadnice družice v čase t_{i+1} a x, y, z hledané souřadnice.

Při měření nejméně ve třech periodách mezi čtyřmi časovými značkami je získána trojice načítaných period rozdílového signálu za směšovačem N_i, N_{i+1}, N_{i+2} a bude-li známa souřadnice družice v okamžicích t_i, t_{i+1}, t_{i+2} , lze řešit soustavu tří rovnic o třech neznámých, kterými jsou souřadnice uživatele v místě zjišťování polohy x, y, z . Poloha družice se určí z aktuálních kepleriánských parametrů její dráhy, které družice vysílají ve formě navigační zprávy tak, aby chyba při určení polohy v jednotlivých časových okamžicích byla co nejmenší [10], [16].

5.3 Metoda interferometrická

Systemy využívající pro výpočet polohy tuto metodu se označují jako diferenciální. Přijímač musí mít dvě antény umístěné na společné základně se vzájemnou vzdáleností d . Interferometrické měření lze provádět způsobem, kdy se měří každou anténou zdánlivá vzdálenost k družici. Úhel, který svírá základna se spojnicí přijímač družice je určen rovnicí

$$\vartheta_i = \arccos \frac{|D_{2i} - D_{1i}|}{d}, \quad (5.2)$$

kde D_{1i} a D_{2i} je zdánlivá vzdálenost k i -té družici měřenou pro první, resp. druhou anténu. Znalost elevačního úhlu ke třem družicím vede na metodu úhloměrnou [16].

5.4 Dálkoměrná metoda

Tato metoda je nejčastěji používaná pro měření polohy pomocí družic. Základním principem kódových měření je určování vzdáleností mezi přijímačem a družicemi. Běžně se k tomuto účelu využívají tzv. dálkoměrné kódy vysílané jednotlivými družicemi. Dálkoměrné kódy jsou přesné časové značky umožňující přijímači určit čas, kdy byla odvysílána kterákoliv část signálu vysílaného družicí. Pro určení vzdálenosti se využije časového zpoždění signálu τ_i mezi družicí a přijímačem

$$d_i = \tau_i \cdot c, \quad (5.3)$$

kde d_i jsou vzdálenosti mezi přijímačem a i -tou družicí a c je rychlost šíření elektromagnetické vlny v prostoru. Různé odrazy od překážek či zpomalení signálu na přenosové trase zatíží výpočet chybou, protože je prodloužena trasa mezi družicí a přijímačem [10].

Jsou-li známy kartézské souřadnice družic (x_i, y_i, z_i) a určeny vzdálenosti mezi

družicí a přijímačem z časových zpoždění signálu, lze určit polohu přijímače (x_u, y_u, z_u) v kartézském souřadném systému. Souřadnice přijímače jsou vypočítány ze soustavy tří rovnic pro tři neznámé a souřadnice družic jsou určeny z efemerid přenášených v navigační zprávě

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} . \quad (5.4)$$

Zajistit přesnou časovou synchronizaci družice a navigačního přijímače nelze splnit levně dostupnými prostředky. V okamžiku měření časová základna uživatele vůči družici vykazuje jistý neznámý posuv Δt , který lze přepočítat na vzdálenost a k neznámým souřadnicím přibude další neznámý parametr. Pro výpočet polohy ve třírozměrném prostoru je nutno zpracovat signál alespoň ze čtyř družic

$$D_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} + c \cdot \Delta t , \quad (5.5)$$

kde D_i je vypočítaná pseudovzdálenost mezi družicí a navigačním přijímačem, Δt je časová diference mezi časovou základnou přijímače a synchronní základnou družic. Neznámými v rovnici je hledaná poloha přijímače x_u, y_u, z_u [16].

6 GEODETICKÉ SOUŘADNÉ SOUSTAVY

Při hledání polohy uživatele, je nutné veškeré výpočty provádět v kartézském souřadném systému. Pro popis tvaru Země se v navigačních systémech užívá geoid. Je to matematický model Země vycházející z elipsoidu v daném referenčním systému. Rovník a nultý poledník jsou základními referencemi pro určování zeměpisných souřadnic, které jednoznačně určují polohu jakéhokoliv bodu kdekoliv na zemském povrchu.

Tab. 6.1: Parametry referenčních elipsoidů používaných v GNSS.

Ref. Elipsoid	WGS-84	PZ-90
Velká poloosa a [m]	6 378 137	6 378 136
Malá poloosa b [m]	6 356 752,314 25	6 356 751,361 75
Reciproká hodnota zploštění $1/f$	298,257 223 563	298,257 839 303

6.1 Převod z geodetických do kartézských souřadnic

Mezi kartézskými pravoúhlými a zeměpisnými (geodetickými) souřadnicemi pro polohu bodu \mathbf{P} platí transformační vztahy [17]

$$X_p = (N_p + H_p) \cos \varphi_p \cdot \cos \lambda_p, \quad (6.1)$$

$$Y_p = (N_p + H_p) \cos \varphi_p \cdot \sin \lambda_p, \quad (6.2)$$

$$Z_p = [(1 - e^2)N_p + H_p] \cdot \sin \varphi_p, \quad (6.3)$$

kde e je výstřednost (excentricita) referenčního elipsoidu

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} = \sqrt{1 - (1 - f)^2} \quad (6.4)$$

a N_p je tzv. příčný poloměr křivosti elipsoidu závisující na zeměpisné šířce dané polohy bodu

$$N_p = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi_p}}. \quad (6.5)$$

Parametr a určuje hlavní poloosu a parametr b vedlejší poloosu elipsoidu. Excentricita se dá vyjádřit pomocí tzv. reciprokého zploštění f . Hodnoty pro referenční elipsoidy WGS-84 a PZ-90 používané v systémech GNSS jsou uvedeny v Tab. 6.1.

Kompletní zdrojový kód m-souboru pro převod z geodetických do kartézských souřadnic je uložen ve funkci `Geo2Cart.m`.

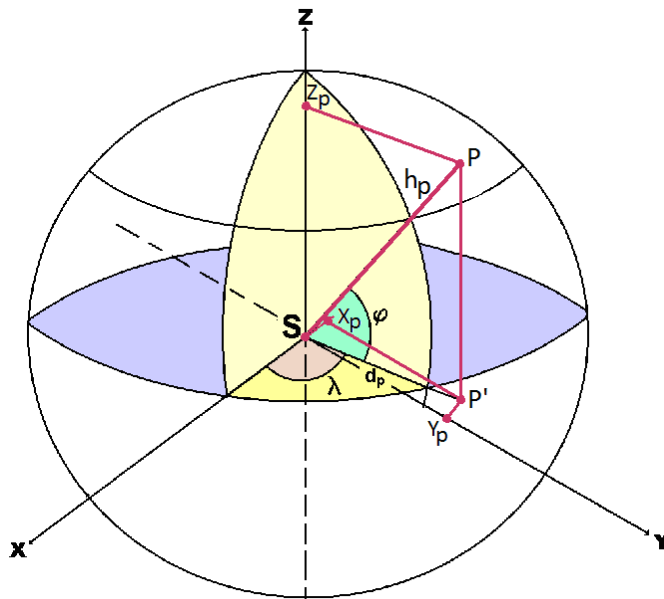
6.2 Převod z kartézských do geodetických souřadnic

V této kapitole bude popsán inverzní postup pro získání geodetických souřadnic z kartézských souřadnic. Pokud je definována poloha \mathbf{P} v kartézských souřadnicích, tak kolmým průmětem z bodu \mathbf{P} do roviny geodetického rovníku je získán bod \mathbf{P}' . Vzdálenost od počátku souřadnicového systému k bodu \mathbf{P}' (viz Obr. 6.1) bude dána [17]

$$d_p = \sqrt{X_p^2 + Y_p^2} . \quad (6.6)$$

Z rovnice (6.20) lze jednoznačně určit geodetickou délku v celém jejím intervalu

$$\lambda_p = 2 \cdot \arctg\left(\frac{Y_p}{X_p + d_p}\right) . \quad (6.7)$$



Obr. 6.1 Parametry elipsoidu pro definovaný bod \mathbf{P} .

Výpočet geometrické šířky a výšky vede na soustavu transcendentních rovnic. Odvození soustavy rovnic je uvedeno v literatuře [16],[17]. Pro výpočet bude použita metoda prosté iterace, kde počet kroků je dán požadovanou přesností řešení. Pro geodetickou šířku platí

$$\varphi_p = \arctg(t_N) \quad (6.8)$$

a elipsoidickou výšku

$$h_p = \sqrt{1+t_N^2} \left(d_p - \frac{a}{\sqrt{1+(1-e^2)\cdot t_N^2}} \right), \quad (6.9)$$

kde N je počet iterací. Pro parametr t platí

$$t_n = \frac{Z_p}{d_p - \frac{e^2 a}{\sqrt{1+(1-e^2)\cdot t_{n-1}^2}}}. \quad (6.10)$$

Pro počáteční hodnotu t_0 platí

$$t_0 = \frac{Z_p}{(1-e^2)\cdot d_p}. \quad (6.11)$$

Výpočet parametru t je umístěn ve smyčce `while`, kde je t postupně zpřesňováno, dokud není splněna požadovaná přesnost pro geodetickou šířku λ a elipsoidickou výšku h . Kompletní zdrojový kód m-souboru pro převod z kartézských do geodetických souřadnic je uložen ve funkci `Cart2Geo.m`.

7 PREDIKCE POLOHY DRUŽIC

V této kapitole bude popsán princip k určení přesných pozic všech družic. Pro určení polohy uživatele tzv. dálkoměrnou metodou popsanou v kap. 5, je nezbytně nutné znát přesnou polohu detekovaných družic. Družice v systémech GPS, GLONASS a Galileo jsou umístěny na střední oběžné dráze MEO a vzhledem k pozemskému uživateli jsou v neustálém pohybu. Stanovení poloh družic je navíc komplikováno pohybem referenční soustavy Země.

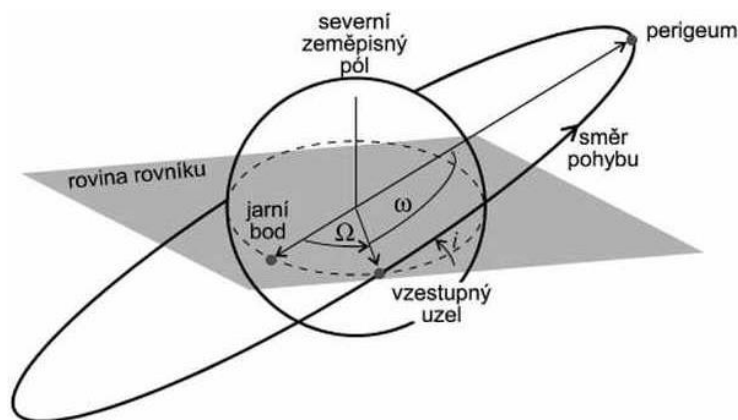
Pohyb tělesa (družice) po oběžné dráze kolem Země je popsán třemi Keplerovými zákony. První zákon říká, že oběžná tělesa se pohybují okolo Země po eliptických drahách, přičemž v jednom ohnisku elipsy je střed Země. Pro eliptickou oběžnou dráhu jsou důležité dva body. Prvním je bod perigeum, kdy se družice nachází nejbliže k Zemi a druhým bodem je apogeum, kdy se družice nachází nejdále od zemského povrchu. Spojením těchto bodů vzniká přímka apsid, na které leží hlavní poloosa dráhy [18].

Druhý Keplerův zákon popisuje závislost rychlosti na délce průvodiče. Obsahy ploch opsaných průvodičem družice a středu Země za stejný čas jsou stejné. Z čehož vyplývá, že v perigeu se družice pohybuje nejrychleji a v apogeu se pohybuje nejpomaleji.

Třetí Keplerův zákon vysvětluje závislost mezi oběžnou dobou družice na její vzdálenosti od Země, tedy velikostí hlavní poloosy a

$$a^3 = \mu \cdot \left(\frac{P}{2\pi} \right)^2, \quad (7.1)$$

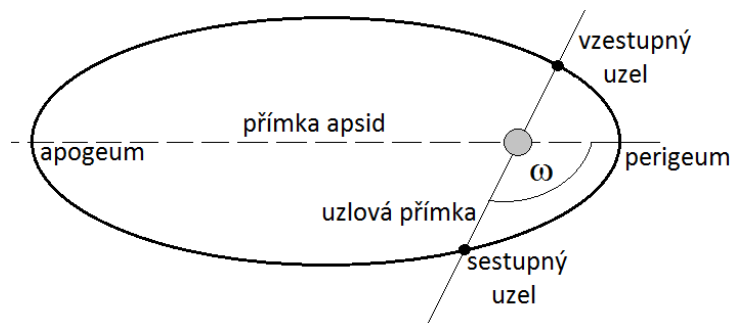
kde P je oběžná perioda, parametr μ je gravitační konstanta Země ($398\,600,3 \text{ km}^3\text{s}^{-2}$). Z Keplerových zákonů vyplývá, že obecně jsou oběžné dráhy elipsy a pro kruhové dráhy lze použít stejný postup [16]. Tvar elipsy je dán její hlavní poloosou a , vedlejší poloosou b a z rovnice (6.4) lze určit tzv. excentricitu e . Pro kruhovou dráhu je velikost hlavní a vedlejší poloosy stejná a excentricita je tedy nulová.



Obr. 7.1: Rovina dráhy družice.

Pro přesné určení polohy družice je potřeba definovat rovinu dráhy. Rovina dráhy je definována pomocí dvou úhlů. Prvním úhlem je inklinace i vyjadřující úhel roviny dráhy s rovinou rovníku (viz Obr. 7.1). Oběžná dráha družice protíná rovinu rovníku ve dvou uzlových bodech. První bod je dán průsečíkem, kdy družice přechází ze severního poloprostoru do jižního, tzv. sestupný úhel. Druhý bod je dán průsečíkem, kdy družice přechází z jižního do severního poloprostoru. Spojnice těchto dvou bodů je nazývána jako tzv. uzlová přímka. Druhým úhlem pro popis roviny je tzv. délka vzestupného uzlu Ω (rektascenze). Rektascenze je úhel mezi uzlovou přímkou a směrem k jarnímu bodu. Jarní bod je směr ke Slunci v přesném okamžiku jarní rovnodennosti [18].

Posledním parametrem pro určení roviny dráhy družice je tzv. argument perigea ω . Argument perigea udává úhel, který svírá průvodič perigea s průvodičem vzestupného uzlu (viz Obr. 7.2).



Obr. 7.2: Určení argumentu perigea.

Těchto pět výše uvedených veličin (Kepleriánské efemeridy) popisuje přesnou dráhu družice spolu s časovým údajem vztaženým k určité pozici družici na dráze (např. průchodem perigeem).

Pro pohyb tělesa (družice) po uzavřené dráze platí, že za jednotku času opíše průvodič průměrně úhel

$$n = \frac{2\pi}{P}, \quad (7.2)$$

kde n je střední pohyb tělesa (družice) a P je oběžná perioda. Vynásobením středního pohybu dobou, která uplynula od průchodu družicí perigeem, je získána tzv. střední anomálie.

$$M = n \cdot t. \quad (7.3)$$

Hodnota střední anomálie M se pohybuje v intervalu od 0 do 2π , kde nulová hodnota odpovídá pozici družice v perigeu a hodnota π odpovídá pozici v apogeum. Pro nekruhové oběžné dráhy je nutné definovat vzhledem k nerovnoměrnosti pohybu tzv. pravou anomálii

$$f = 2 \cdot \arctan \left(\sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \cdot \tan \frac{E}{2} \right), \quad (7.4)$$

kde E je tzv. excentrická anomálie a e je excentricita. Výpočet excentrické anomálie je získán řešením Keplerovy rovnice

$$E_n = M + e \cdot \sin E_{n-1}. \quad (7.5)$$

Řešení této transcendentní rovnice je možné např. iteračním postupem. V prvním kroku se dosadí za E_0 střední anomálie M a vypočte se odhad E_1 . Výpočet je opakován do té doby, než je splněna zadaná přesnost. Keplerova rovnice konverguje poměrně rychle v několika málo krocích.

Po výpočtu pravé anomálie f je možné určit okamžitou vzdálenost mezi družicí a těžištěm referenční soustavy, tzv. délku průvodiče

$$r = \frac{a \cdot (1 - e^2)}{1 + e \cdot \cos f}. \quad (7.6)$$

Spolu s pravou anomálií f , délkou průvodiče r , inklinací i , délkou vzestupného uzlu Ω a argumentem perigea ω lze vypočítat v kartézském souřadném systému přesnou polohu všech družic. K referenční soustavě je nutné podotknout, že počátek je ve středu Země, osa x směřuje do jarního bodu a osa z je kolmá k rovině rovníku.

$$\begin{aligned} x &= r \cdot [\cos(f + \omega) \cdot \cos(\Omega) - \sin(f + \omega) \cdot \sin(\Omega) \cdot \cos(i)] \\ y &= r \cdot [\cos(f + \omega) \cdot \cos(\Omega) + \sin(f + \omega) \cdot \sin(\Omega) \cdot \cos(i)] \\ z &= r \cdot [\sin(f + \omega) \cdot \sin(i)] \end{aligned} \quad (7.7)$$

Tyto souřadnice jsou definovány k jarnímu bodu. Pro získání geodetických kartézských souřadnic je nutné provést pootočení podle osy z tak, aby osa x směřovala do průsečíku rovníku a nultého poledníku [16]. Po aplikaci transformace souřadnic jsou získány geodetické souřadnice družice

$$\begin{aligned} x_G &= r \cdot [\cos(f + \omega) \cdot \cos(\Omega - \Theta) - \sin(f + \omega) \cdot \sin(\Omega - \Theta) \cdot \cos(i)] \\ y_G &= r \cdot [\cos(f + \omega) \cdot \cos(\Omega - \Theta) + \sin(f + \omega) \cdot \sin(\Omega - \Theta) \cdot \cos(i)], \\ z_G &= r \cdot [\sin(f + \omega) \cdot \sin(i)] \end{aligned} \quad (7.8)$$

kde Θ je úhel mezi osou směřující do jarního bodu a osou směřující do průsečíku rovníku a nultého poledníku. V rovnici (7.8) lze výraz $(\Omega - \Theta)$ nahradit tzv. okamžitou hodnotou zeměpisné délky vzestupného uzlu

$$\Lambda = \Lambda_0 - \Lambda_1 \cdot (t - t_0), \quad (7.9)$$

kde Λ_0 je planetografická délka v čase t_0 a Λ_1 je úhlová rychlost rotace Země

(360° za 23,93 447 h). Pro Λ_0 platí

$$\Lambda_0 = \Omega - S_0, \quad (7.10)$$

kde veličina S_0 je tzv. hvězdný čas vyjádřený v úhlové míře v okamžiku t_0 .

7.1 Funkce pro výpočet polohy družic

Pro predikci polohy GPS a GLONASS družic je použit soubor kepleriánských prvků publikovaných na webové stránce www.celestrak.com [19]. Efemeridy jsou uvedeny ve dvouřádkovém formátu 2-LINE i s klíčem pro dekódování. Příklad pro GPS družici SVN 32 je uveden na Obr. 7.3.

```
GPS BIIA-10 (PRN 32)
1 20959U 90103A 13111.77969892 -.00000024 00000-0 00000+0 0 9448
2 20959 54.4012 226.1424 0116449 337.6491 159.7258 2.00559109164078
```

Obr. 7.3: Soubor prvků pro GPS družici SVN 32.

Zdrojové kódy pro výpočet pozic družic GPS a GLONASS jsou uvedeny v následujících funkcích a funkce `ShowSats.m` je skript pro 3D vykreslení

- `GPSSatPos.m`,
- `GLOSatPos.m`,
- `ShowSats.m`.

V Tab. 7.1 jsou uvedeny dekódované efemeridy a doplňkové informace pro GPS družici uvedenou na Obr. 7.3. Soubor dat pro jednu družici obsahuje 168 znaků a udává 11 parametrů, které jsou uloženy v matici `SatData`.

Tab. 7.1: Příklad prvků 2-LINE elementů pro družici GPS SVN 32.

znaky v 2-LINE	parametr	hodnota	jednotka
18-19	SVN	32	[-]
29-33	Číslo katalogu	20959	[-]
45-58	Časový údaj ke střední anomálii	13111,77969892	[-]
60-69	Zrychlení středního pohybu	-0,00000024	poč. obletů /den ²
106-113	Inklinace	54,4012	[°]
115-122	Délka vzestupného uzlu	226,1424	[°]
124-130	Excentricita (desetinná část)	0,116449	[-]
132-139	Argument perigea	337,6491	[°]
141-149	Střední anomálie	159,7258	[°]
151-160	Střední pohyb	2,00559109	poč. obletů/den
161-165	Číslo obletu v epoše	16407	[-]

Vstupní hodnotou funkcí GPSSatPos resp. GLOSatPPos je pouze čas, pro který se má poloha družic vypočítat a výstupní hodnotou je matice s pozicí družic v kartézském souřadném systému. V první části jsou nejprve načtené veličiny (i, Ω, ω, e) převedeny ze stupňů na radiány. Dále je střední pohyb přepočítán na aktuální hodnotu podle vztahu

$$n = n_0 + DECAF \cdot N, \quad (7.11)$$

kde n_0 je střední pohyb udávaný v efemeridách, parametr *DECAF* vyjadřuje zrychlení středního pohybu a N je čas ve dnech uplynulý od okamžiku publikovaných efemerid. Střední pohyb n udává počet obletů družice za jeden den a dosazením do vztahu (7.1) je získána velikost hlavní poloosy a oběžné dráhy satelitu.

Střední anomálii lze vypočítat z rovnice (7.3) a připočítat k ní původní hodnotu M_0 uvedenou v efemeridách vztáženou k danému časovému okamžiku. Výsledný vztah vypadá následovně

$$M = M_0 + n \cdot t. \quad (7.12)$$

Dále následuje výpočet tzv. excentrické anomálie E , jejíž hodnota je získána řešením Keplerovy rovnice (7.5). Transcendentní rovnice je řešena iterační metodou. V prvním kroku je za E_0 dosazena hodnota střední anomálie a celý výpočet je umístěn v cyklu `while` dokud není splněna zadaná přesnost.

```
% Výpočet excentrické anomálie - řešení Keplerovy rovnice
E = M;
Eold = 1e9;

while ((abs(Eold - E)) > 1e-10)
    Eold = E;
    E = M + SatData(j,7)*sin(E);
end
```

Následuje výpočet pravé anomálie f (7.4) a délky průvodiče r (7.6). Pro výpočet výsledných geodetických kartézských souřadnic (7.8) zbývá určit hodnotu výrazu $(\Omega - \Theta)$. Pro řešení rovnice (7.10) následně (7.9) je nutné vypočítat hvězdný čas S_0 . V prvním kroku je vypočítáno Juliánské datum pro nejbližší předcházející půlnoc. Juliánské datum je časová škála používaná v astronomii pro sledování dlouhých periodických časových úseků. Je definováno jako počet dní dlouhých 86 400 sekund, které uplynuly od 1. ledna roku 4713 př.n.l. Dne 1.1. 2006 v 0:00:00 UTC bylo Juliánské datum 2 453 736,5. Ve vektoru UTC je světový koordinovaný světový čas, pro který chceme predikovat polohu družic. Zjištěním počtu dní uplynulých od zmíněného okamžiku známého Juliánského data, je zjištěno aktuální Juliánské datum pro nejbližší předcházející půlnoc uloženou v proměnné JD0.

```
% Juliánské datum
JD2006 = 2453736.5;
UTC0 = [UTC(1) UTC(2) UTC(3) 0 0 0];
Delta = datenum(UTC0) - datenum(2006,1,1,0,0,0);
JD0 = JD2006 + Delta;
MJD = JD0 - 2400000.5;
```

Pro výpočet hvězdného času se využije číselné aproximace, která vychází z dříve naměřených hodnot [20]. Nejprve je vyjádřeno aktuální datum v juliánských stoletích

$$T = (JD0 - 2451545,0) / 36525. \quad (7.13)$$

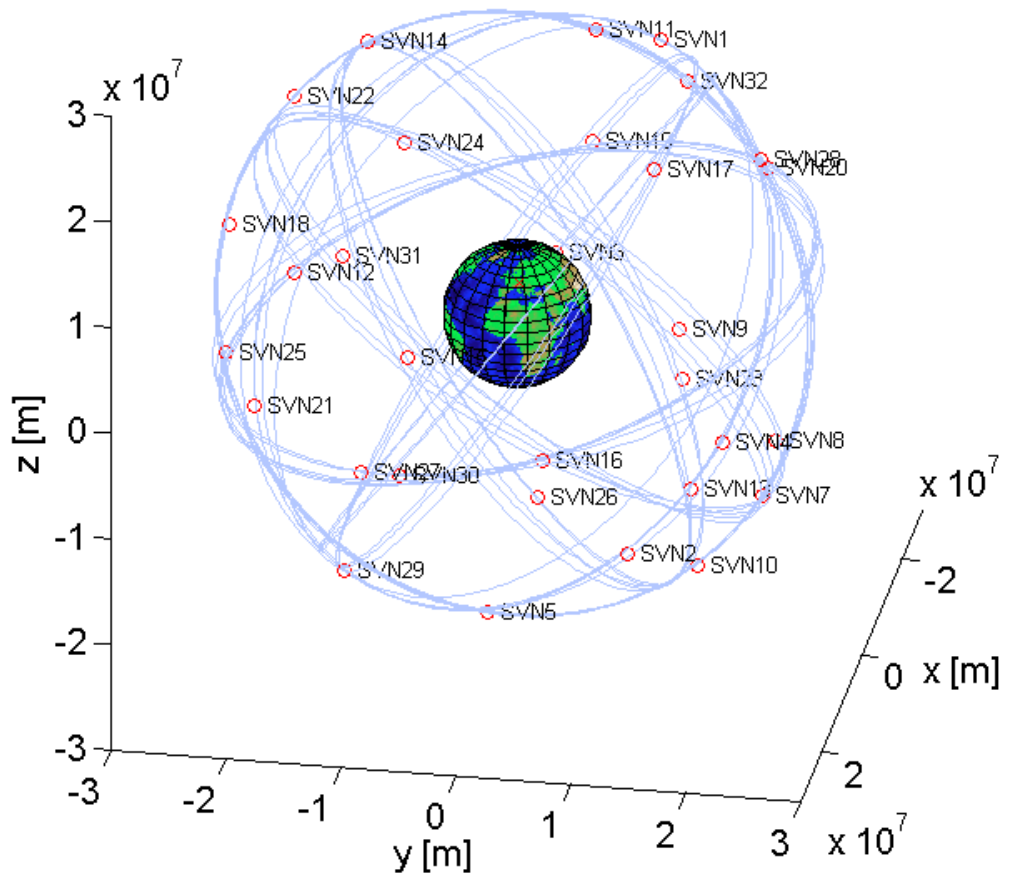
K téže půlnoci je podle následující rovnice vypočítán hvězdný čas v Greenwichi podle aproximace třetího řádu

$$S_0 = 6,697374558 + 2400,05133691T + 25862 \cdot 10^{-9}T^2 - 1,7 \cdot 10^{-9}T^3. \quad (7.14)$$

Přesný hvězdný čas v okamžiku kdy má být predikována poloha družic je vypočítán následovně

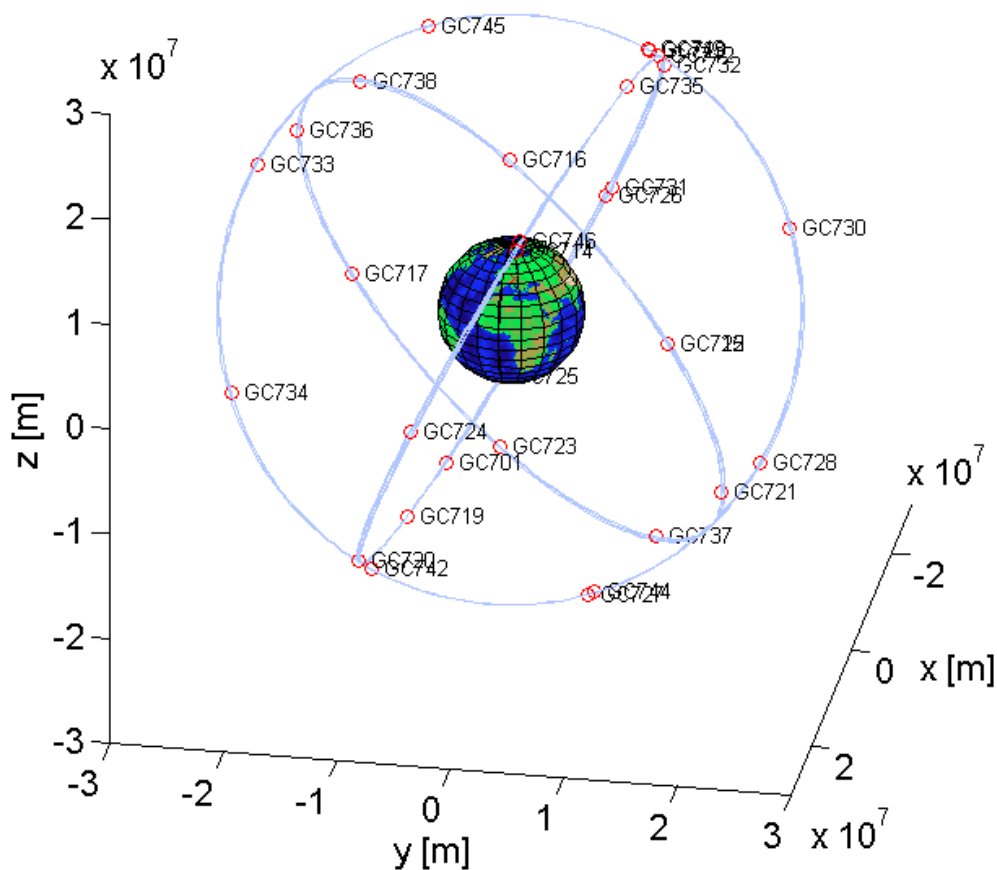
$$S = S_0 + 1,0027379093 \cdot t, \quad (7.15)$$

kde t je doba, která uplynula v hodinách od zmíněné nejbližší předcházející půlnoci [20]. Dosazením do vztahu (7.9) a následným výpočtem kartézských geodetických souřadnic ze vztahu (7.8) je určena poloha všech družic. Na Obr. 7.4 a Obr. 7.5 je vykreslena poloha všech GPS resp. GLONASS družic a její příslušné oběžné dráhy.



Obr. 7.4: Zobrazení poloh všech GPS družic a jejich oběžných drah.

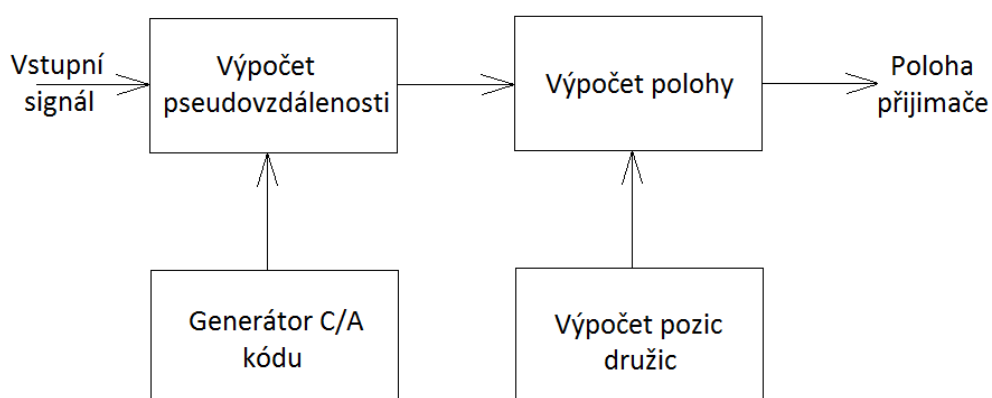
U konstelace kosmického segmentu systému GPS je patrné, že družice jsou rozmístěny na šesti oběžných drahách. U systému GLONASS je patrné, že družice jsou rozmístěny na třech oběžných drahách se sklonem 65° . Správná pozice družic byla ověřena v profesionálním programu WXtrack [28].



Obr. 7.5: Zobrazení poloh všech GLONASS družic a jejich oběžných drah.

8 VÝPOČET POLOHY Z GPS SIGNÁLU

V této kapitole budou popsány metody pro výpočet polohy, algoritmy budou navrženy v interaktivním programovém prostředí MATLAB verze 7.8.0. Blokové schéma pro část výpočtu polohy uživatele s přijímačem GPS signálu je uvedeno na Obr. 8.1. Vstupním souborem jsou naměřená data z GPS družic v pásmu L1 ($f = 1575,42$ MHz). V dalším bloku je z korelace mezi replikou C/A kódu a vstupního signálu zjištěno zpoždění signálu na trase mezi družicí a přijímačem. Pokud jsou určeny alespoň čtyři pseudovzdálenosti, může být dálkoměrnou metodou vypočítána poloha přijímače ve formě zeměpisné šířky, délky a nadmořské výšky.



Obr. 8.1: Blokové schéma výpočtu polohy uživatele z naměřeného signálu.

Celkový algoritmus výpočtu polohy se skládá z několika dílčích funkcí (m-souborů) popsanych v jednotlivých podkapitolách:

- generování repliky pseudonáhodné sekvence (funkce `CACodeGen.m`),
- převod z geodetických souřadnic do kartézských (funkce `Geo2Cart.m`),
- převod z kartézských do geodetických souřadnic (funkce `Cart2Geo.m`),
- výpočet pořadí PN sekvence v datovém bitu (funkce `GPSNumPNseq.m`),
- demodulace vstupního signálu (funkce `GPSPDemod.m`),
- synchronizace na kmitočet nosné (funkce `GPSPpll.m`),
- výpočet pseudozpoždění ze signálu z družice (funkce `GPSPRCalc.m`),
- výpočet polohy přijímače (funkce `GPSPosCalc.m`),
- výpočet činitele DOP (funkce `GPSDop.m`),
- výběr čtyř družic s nejnižším činitelem DOP (funkce `GPSBestSats.m`).

Pro následný výpočet polohy se využívá důležitého zjednodušujícího předpokladu. Zpoždění signálu mezi družicí a povrchem Země se pohybuje v rozsahu od 67,333 ms pro elevační úhel 90° do 86,005 ms pro elevační úhel 0° . Tento rozsah platí za předpokladu, že Země má tvar koule s poloměrem 6378 km a družice se pohybují

po kruhové dráze s nadmořskou výškou 20 200 km. Rozdíl mezi minimální a maximální dobou zpoždění je menší než 20 ms, což je doba trvání jednoho bitu navigační zprávy. Při logické změně datového bitu je určen časový rozdíl mezi příchozími signály, který nesmí přesáhnout 20 ms. Z tohoto zjednodušujícího předpokladu vyplývá, že výpočet polohy je omezen pro výpočet v blízkosti povrchu Země. Toto řešení bylo zvoleno z důvodu omezené velikosti paměti při zpracování v softwarovém programu MATLAB.

8.1 Generátor repliky C/A kódu

Jak bylo uvedeno v kapitole 2.4, C/A kód je pseudonáhodná posloupnost 1023 nul a jedniček vysílána rychlostí 1,023 Mbit/s. Takže se celá posloupnost opakuje každou milisekundu. C/A kód může mít 2^{1023} kombinací, ale matematicky bylo vybráno 37 tzv. Goldových sekvencí, které jsou mezi sebou nejméně korelovány. Každý satelit používá pro vysílání C/A signálu jednu z 32 vybraných C/A sekvencí, přičemž každé této sekvenci je přiděleno specifické PRN (Pseudo Random Noise) číslo. Goldovy posloupnosti v C/A kódech jsou generovány jako binární součet dvou nezávislých, stejně dlouhých, pseudonáhodných kódů G1 a G2, přičemž kód G2 je pro daný C/A kód zpožděn o jistou hodnotu k bitů. Každý dílčí kód sestává z posuvného registru s R buňkami [16]. Generující polynom pseudonáhodného kódu G1 má tvar

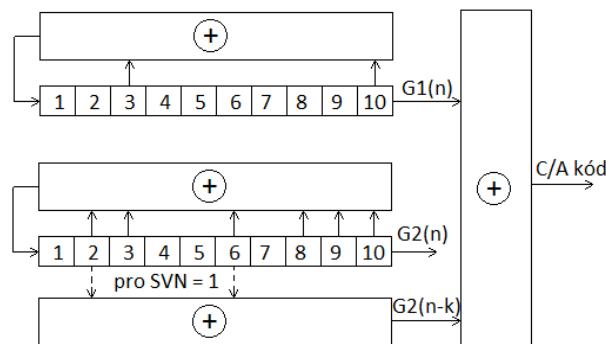
$$G1 = 1 + X^3 + X^{10}. \quad (8.1)$$

Pro G2 má generující polynom tvar

$$G2 = 1 + X^2 + X^3 + X^6 + X^8 + X^9 + X^{10}. \quad (8.2)$$

Zpoždění posloupnosti G2 o k bitů je zjednodušeno binárním součtem vhodných buněk posuvného registru generující polynom G2. Schéma generátoru C/A kódu je uvedeno na Obr. 8.2. Jedná se o dva kruhové registry, jež jsou v počátku inicializovány samými jedničkami.

Jednotlivé družice jsou definované svým identifikačním číslem SVN (Space Vehicle Number) resp. pseudonáhodnou posloupností. Příslušné buňky pro modulo součet z posuvného registru G2 jsou uvedeny v Tab. 8.1.



Obr. 8.2: Generátor C/A kódu pro GPS družice.

Tab. 8.1: Příslušné buňky binárního modulu součtu pro generování C/A kódu.

PRN (SVN)	Buňky G2	Prvních deset bitů C/A kódu	PRN (SVN)	Buňky G2	Prvních deset bitů C/A kódu
1	2 & 6	1100100000	20	4 & 7	1111001101
2	3 & 7	1110010000	21	5 & 8	1111100110
3	4 & 8	1111001000	22	6 & 9	1111110011
4	5 & 9	1111100100	23	1 & 3	1000110011
5	1 & 9	1001011011	24	4 & 6	1111000110
6	2 & 10	1100101101	25	5 & 7	1111100011
7	1 & 8	1001011001	26	6 & 8	1111110001
8	2 & 9	1100101100	27	7 & 9	1111111000
9	3 & 10	1110010110	28	8 & 10	1111111100
10	2 & 3	1101000100	29	1 & 6	1001010111
11	3 & 4	1110100010	30	2 & 7	1100101011
12	5 & 6	1111101000	31	3 & 8	1110010101
13	6 & 7	1111110100	32	4 & 9	1111001010
14	7 & 8	1111111010	R - 33	5 & 10	1111100101
15	8 & 9	1111111101	R - 34	4 & 10	1111001011
16	9 & 10	1111111110	R - 35	1 & 7	1001011100
17	1 & 4	1001101110	R - 36	2 & 8	1100101110
18	2 & 5	1100110111	R - 37	4 & 10	1111001011
19	3 & 6	1110011011			

Na Obr. 8.2 je uveden příklad pro SVN1, kde jsou vyvedeny bity z buněk 2 a 6. Stejný princip platí pro všech 32 družic. V Tab. 8.1 jsou uvedeny i rezervní kódy, kdy číslo SVN začíná písmenem R.

Funkce pro generování pseudonáhodné sekvence je uložena v m-souboru označeném `CACodeGen.m`.

```
function CACode=CACodeGen(SVN)
```

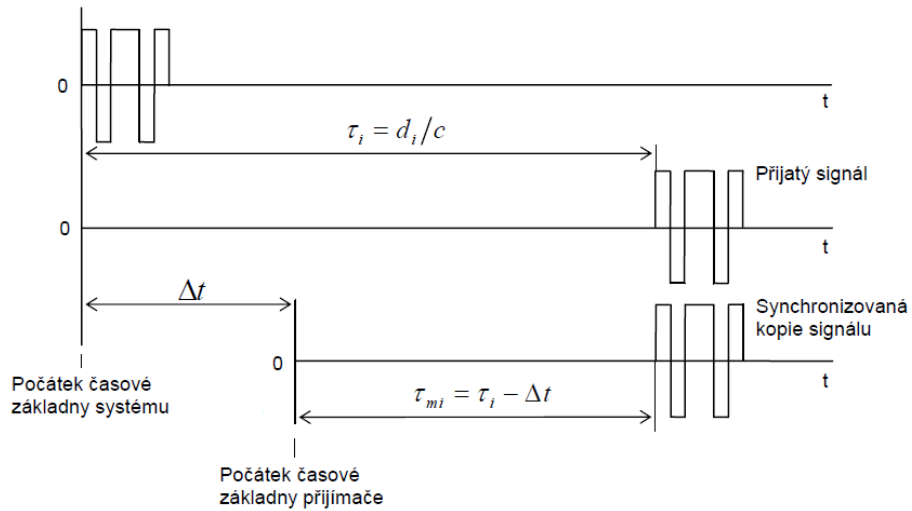
Vstupním parametrem je SVN příslušné družice (1-37), pro kterou má být vygenerována příslušná posloupnost. Výstupním parametrem funkce je vektor `CACode` délky 1023 bitů.

8.2 Měření pseudovzdálenosti ze vstupního signálu

Pro zjištění vzdálenosti mezi družicí a přijímačem se využije dálkoměrná metoda a samotná vzdálenost se určí ze vztahu (5.3). Navigační přijímač generuje kopii C/A kódu příslušné družice, ke které se měří vzdálenost.

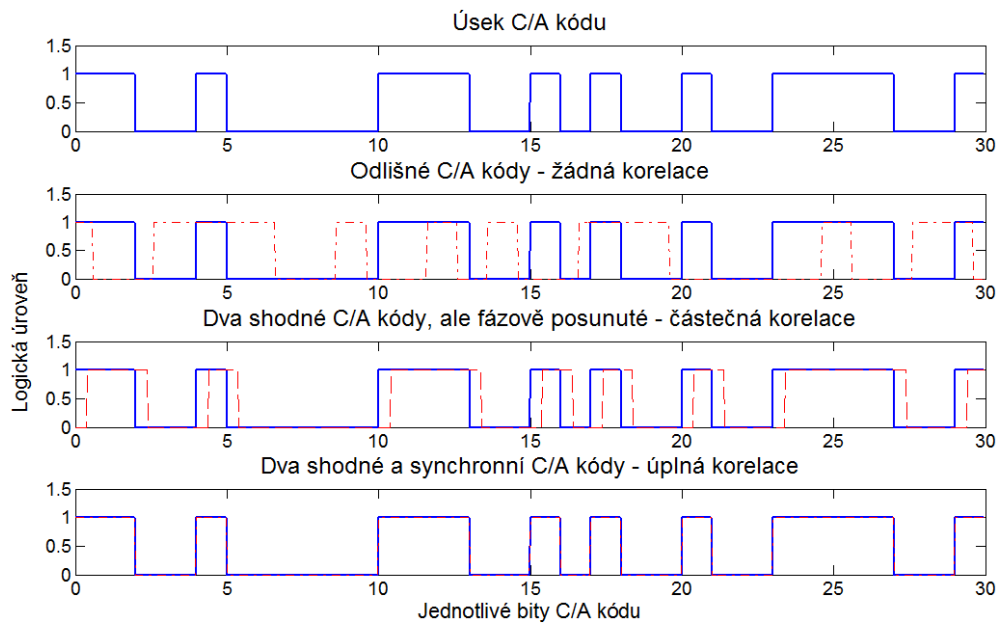
V přijímači se kopie C/A kódu synchronizuje s přijímaným signálem a tím se získá časové zpoždění τ_{mi} . Rozdíl mezi zpožděními τ_i a τ_{mi} je naznačen na Obr. 8.3. V přijímači generovaný C/A kód není synchronní s časem GPS a tedy s C/A kódem generovaným družicí, protože hodiny v přijímači jsou řízeny pouze křemíkovým

krystalem a mají tedy výrazně nižší stabilitu.



Obr. 8.3: Synchronizace dálkoměrného signálu v přijímači.

Synchronizací kopie signálu s přijímaným signálem je získáno tzv. pseudozpoždění, resp. pseudovzdálenost. Synchronizace je v přijímači zajištěna korelací kopie signálu s přijímaným signálem. Přijímač nejprve pro neznámou družici vygeneruje odpovídající dálkoměrný kód a pak musí postupným posouváním přijímačem generované sekvence dosáhnout plné shody obou signálů. Hledání shody je znázorněno na Obr. 8.4, kdy je nejprve zobrazen úsek (30 bitů) C/A kódu a pod ním korelace dvou odlišných C/A kódů, kdy mezi nimi není žádná shoda. Dále je uveden příklad částečné a úplné korelace repliky a původního signálu GPS.



Obr. 8.4: Princip hledání shody mezi signálem GPS a kopií signálu.

8.2.1 Funkce pro výpočet pseudozpoždění

V této části jsou popsány funkce pro výpočet pseudozpoždění mezi družicí a přijímačem. Funkce pro výpočet jsou uloženy v m-souborech

- GPSNumPNSeq.m
- GPSPRCalc.m

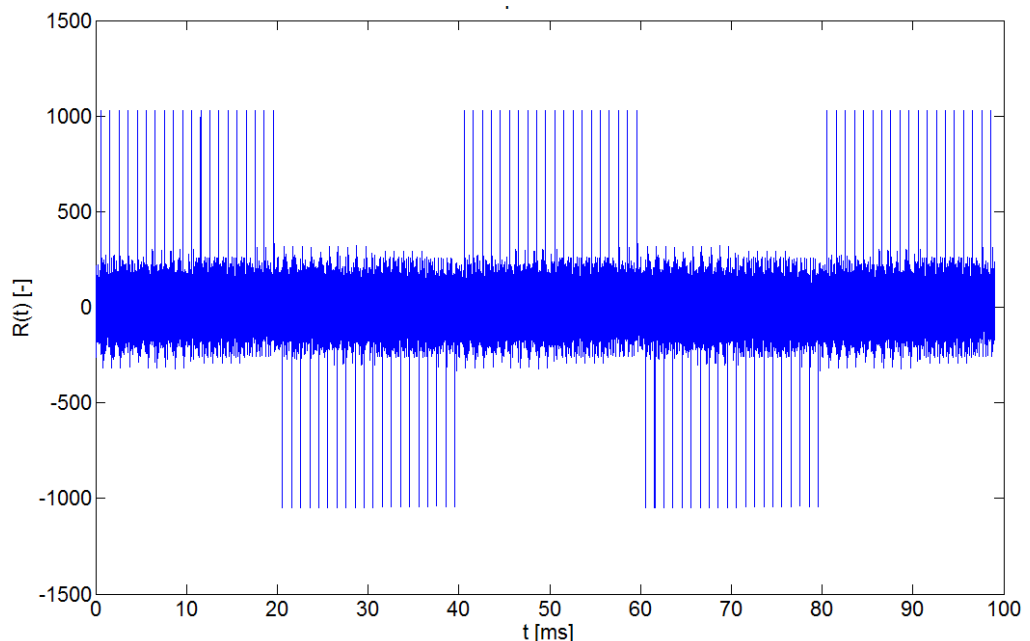
Výpočet pseudozpoždění je rozdělen na dvě části, kdy v první části (GPSNumPNSeq.m) se provede tzv. hrubá korelace a je zjištěno, o kolik PN sekvencí je zpožděn signál. V druhé části (GPSPRCalc.m) je vypočítána tzv. jemná korelace, čímž se vypočte pseudozpoždění v jednom C/A kódu. Výsledné pseudozpoždění je dáno

$$\tau_{m(SVN3)} = 67 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 10^{-3} + 780,352 \cdot 10^{-6} = 70,780352 \text{ ms}, \quad (8.3)$$

kde hodnota $3 \cdot 10^{-3}$ odpovídá zpoždění o tři PN sekvence (o 3 špičky od nejbližší dostupné družice) a hodnota $780,352 \cdot 10^{-6}$ udává zpoždění v jednom C/A kódu. K těmto hodnotám je ještě přičtena konstanta 67 ms, která udává nejmenší možné zpoždění mezi družicí a uživatelem na povrchu Země. Toto výsledné pseudozpoždění pak zahrnuje chybu nesynchronních časových základů a výsledná pozice je počítána dle rov. (5.5).

Vstupními hodnotami funkce GPSNumPNSeq je vektor s navzorkovanými BPSK signály, vzorkovací frekvence a počet bitů navigační zprávy, ve kterém bude hledána změna datového bitu.

```
function [NoPN SigGPS] = GPSNumPNSeq(SigGPS, fvz, lenNavData)
```



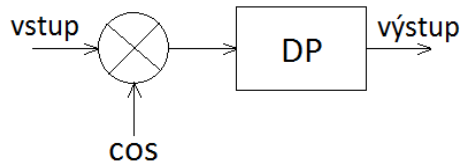
Obr. 8.5: Průběh korelace pro pět bitů navigační zprávy v systému GPS.

Výstupními hodnotami je matice NoPN s odpovídajícími zpožděními PN sekvence pro jednotlivé detekované družice. Druhým parametrem je vektor SigGPS délky jedné

sekvence C/A kódu pro následnou jemnou korelaci (GPSPRCalc.m). Za deklarací konstant a parametrů následuje číslíkový demodulátor. Ten je řešen Butterworthovou dolní propustí druhého řádu

```
paramfilt = 0.5;
[lp_num,lp_denom] = butter(2,paramfilt);
```

Parametr paramfilt definuje mezní kmitočet a musí pro něj platit podmínka $0 < \text{paramfilt} < 1$, kde hodnota 1 odpovídá polovině vzorkovacího kmitočtu [21]. Principiální schéma demodulátoru je uvedeno na Obr. 8.6 (GPSPDemod.m).



Obr. 8.6: Principiální schéma demodulátoru BPSK.

Synchronizace na nosnou je provedena tak, že je demodulována a následně korelována 1 ms signálu a je hledána optimální hodnota fáze nosné (GPSpll.m).

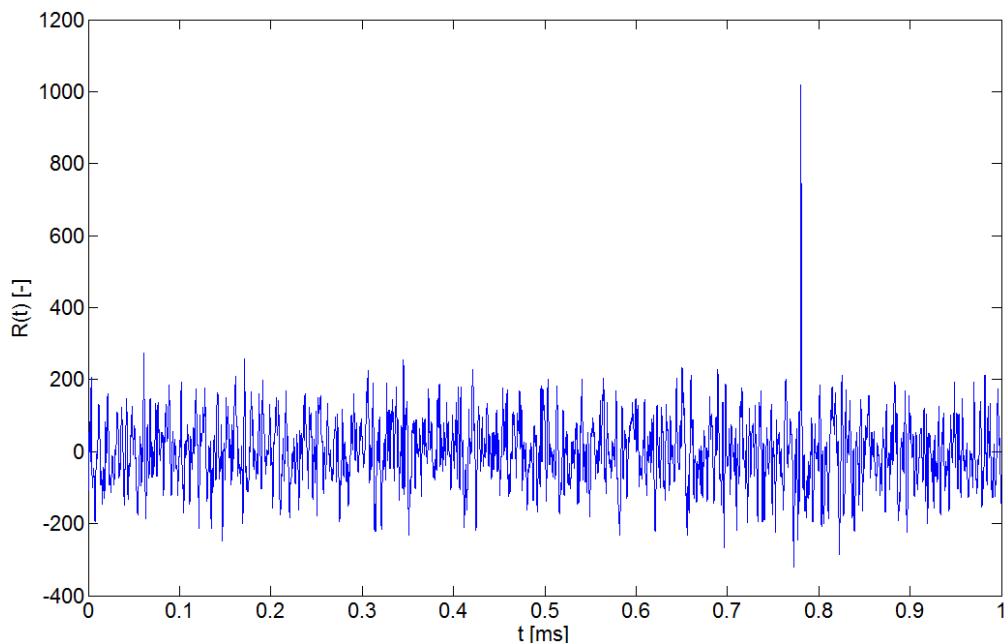
Po demodulaci následuje výpočet korelace a určení zpoždění PN sekvence v datovém bitu. Průběh korelace pro 5 bitů navigační zprávy je zobrazen na Obr. 8.5. Jeden datový bit navigační zprávy obsahuje 20 korelačních maxim.

Jednotlivé korelace jsou počítány v cyklu for s počtem iterací odpovídající počtu SVN družic, tedy 37 včetně pěti rezervních PRN posloupností.

```
for SVN=1:37,
```

V každém cyklu je z generátoru popsaného v kap. 8.1 vygenerována replika C/A kódu pro odpovídající družici. Posloupnost nul a jedniček je převedena do formátu ± 1 . Další částí cyklu je interpolace repliky C/A kódu. C/A kód má bitovou rychlost rovnu 1,023 Mb/s, takže doba trvání jednoho bitu je 0,9775 μ s. Pokud by při korelaci byla replika posouvána o jeden bit C/A kódu, tedy v časové oblasti o 0,9775 μ s, tak by jednak nemusela být nalezena korelace mezi naměřeným signálem a replikou C/A kódu, ale také vypočtené pseudozpoždění by mělo přesnost v řádech μ s a výpočet polohy by byl zatížen větší chybou. Interpolace se nastavuje parametrem InterFact, který odpovídá použité vzorkovací frekvenci, přesněji řečeno použitému násobku vzorkovací frekvence od základní bitové rychlosti C/A kódu. Zvýšení vzorkovací frekvence vede ke zvětšení počtu vzorků signálu, čímž se značně zvýší výpočetní náročnost algoritmu.

Na podobné principu funguje i funkce GPSPRCalc.m. Průběh korelace mezi naměřeným signálem a vytvořenou příslušnou replikou C/A kódu pro družici s označením SVN3 je uveden na Obr. 8.7, při použité vzorkovací frekvenci $f_{vz} = 10,23$ MHz. Z průběhu je patrné, že v časovém intervalu 1 ms obsahuje jenom jedno korelační maximum v čase 780,352 μ s.



Obr. 8.7: Časový průběh korelace mezi GPS signálem a vytvořenou replikou pro družici SVN3.

8.3 Určení polohy z vypočtených pseudozpoždění

Výpočet polohy přijímače z naměřených pseudovzdáleností je řešen pomocí nelineární soustavy rovnic, viz. rovnice (5.5). Jak bylo zmíněno v kap. 5.4, z důvodu velmi obtížné realizace synchronizace časové základny družicového systému a časové základny přijímače je pro výpočet polohy uživatele nutné vyřešit soustavu čtyř rovnic o čtyřech neznámých. Pro řešení této nelineární soustavy je zvolena přímá metoda výpočtu polohy pro aproximaci s rozvojem do Taylorovy řady pro vhodně zvolený (přibližný) odhad řešení, např. určitá poloha hlavního města v daném státě. Soustava rovnic vypadá následovně:

$$\begin{aligned}
 \hat{D}_1 &= \sqrt{(x_1 - \hat{x}_u)^2 + (y_1 - \hat{y}_u)^2 + (z_1 - \hat{z}_u)^2} + c \cdot \hat{t}_u \\
 \hat{D}_2 &= \sqrt{(x_2 - \hat{x}_u)^2 + (y_2 - \hat{y}_u)^2 + (z_2 - \hat{z}_u)^2} + c \cdot \hat{t}_u \\
 \hat{D}_3 &= \sqrt{(x_3 - \hat{x}_u)^2 + (y_3 - \hat{y}_u)^2 + (z_3 - \hat{z}_u)^2} + c \cdot \hat{t}_u \\
 \hat{D}_4 &= \sqrt{(x_4 - \hat{x}_u)^2 + (y_4 - \hat{y}_u)^2 + (z_4 - \hat{z}_u)^2} + c \cdot \hat{t}_u
 \end{aligned} \tag{7.4}$$

kde $(\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u)$ je zvolená přibližná poloha, \hat{t}_u je odhad časové difference mezi časovou základnou přijímače a synchronní základnou družic. Vektory (x_i, y_i, z_i) jsou polohy jednotlivých družic v kartézské souřadné soustavě. Pseudovzdálenosti \hat{D}_i lze vypočítat ze známých poloh družic, vhodně zvoleného odhadu polohy přijímače a časové difference. Zvolené parametry vykazují jistou odchylku od skutečných hodnot:

$$\begin{aligned}
x_u &= \hat{x}_u + \Delta x_u \\
y_u &= \hat{y}_u + \Delta y_u \\
z_u &= \hat{z}_u + \Delta z_u \\
t_u &= \hat{t}_u + \Delta t_u
\end{aligned} \tag{7.5}$$

Pro dobře konvergující řešení postačují první řády parciální derivace [16] a lze je vyjádřit následovně:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f(\circ)}{\partial \hat{x}_u} &= \frac{x_i - \hat{x}_u}{\hat{r}_i} = A_{xi} \\
\frac{\partial f(\circ)}{\partial \hat{y}_u} &= \frac{y_i - \hat{y}_u}{\hat{r}_i} = A_{yi} \\
\frac{\partial f(\circ)}{\partial \hat{z}_u} &= \frac{z_i - \hat{z}_u}{\hat{r}_i} = A_{zi} \\
\frac{\partial f(\circ)}{\partial \hat{t}_u} &= \frac{t_i - \hat{t}_u}{\hat{r}_i} = c
\end{aligned} \tag{7.6}$$

kde r_i je vzdálenost mezi družicí a polohou přijímače. Vyjádřena je následujícím vztahem

$$r_i = \sqrt{(x_i - \hat{x}_u)^2 + (y_i - \hat{y}_u)^2 + (z_i - \hat{z}_u)^2} \tag{7.7}$$

Řešení soustavy pak lze zapsat v maticovém tvaru

$$\Delta \mathbf{D} = \mathbf{H} \cdot \Delta \mathbf{V} \tag{7.8}$$

kde $\Delta \mathbf{D}$ je matice reprezentující vektor odchylek pseudovzdáleností pro čtyři uvažované družice

$$\Delta \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \Delta D_1 \\ \Delta D_2 \\ \Delta D_3 \\ \Delta D_4 \end{bmatrix} \tag{7.9}$$

Jednotlivé odchylky pro odhadnuté pseudovzdálenosti lze vypočítat jako rozdíl mezi pseudovzdáleností z odhadnuté polohy a změřenou pseudovzdáleností

$$\Delta D_i = \hat{D}_i - D_i \tag{7.10}$$

Matice \mathbf{H} podle (7.8) obsahuje příslušné parciální derivace prvního řádu uvedené v rovnici (7.7).

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} A_{x1} & A_{y1} & A_{z1} & -1 \\ A_{x2} & A_{y2} & A_{z2} & -1 \\ A_{x3} & A_{y3} & A_{z3} & -1 \\ A_{x4} & A_{y4} & A_{z4} & -1 \end{bmatrix}. \quad (7.11)$$

Hledaným vektorem neznámých je $\Delta\mathbf{V}$ z rovnice (7.9). Je to sloupcový vektor ve tvaru

$$\Delta\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \Delta x_u \\ \Delta y_u \\ \Delta z_u \\ c \cdot \Delta t_u \end{bmatrix}. \quad (7.12)$$

Po úpravě rovnice (7.8) je řešením maticová rovnice s neznámým vektorem na levé straně [16]

$$\Delta\mathbf{V} = \mathbf{H}^{-1}\Delta\mathbf{D}. \quad (7.13)$$

8.3.1 Funkce pro výpočet polohy uživatele

V této části bude popsán výpočet polohy přijímače z naměřených pseudovzdáleností. Pro výpočet je zapotřebí minimálně čtyř naměřených pseudozpoždění. Funkce pro výpočet je uložena v m-souboru nazvaném `GPSPosCalc.m`.

```
function Pos = GPSPosCalc(NoPN, SatMeas, SatPos, InitPos)
```

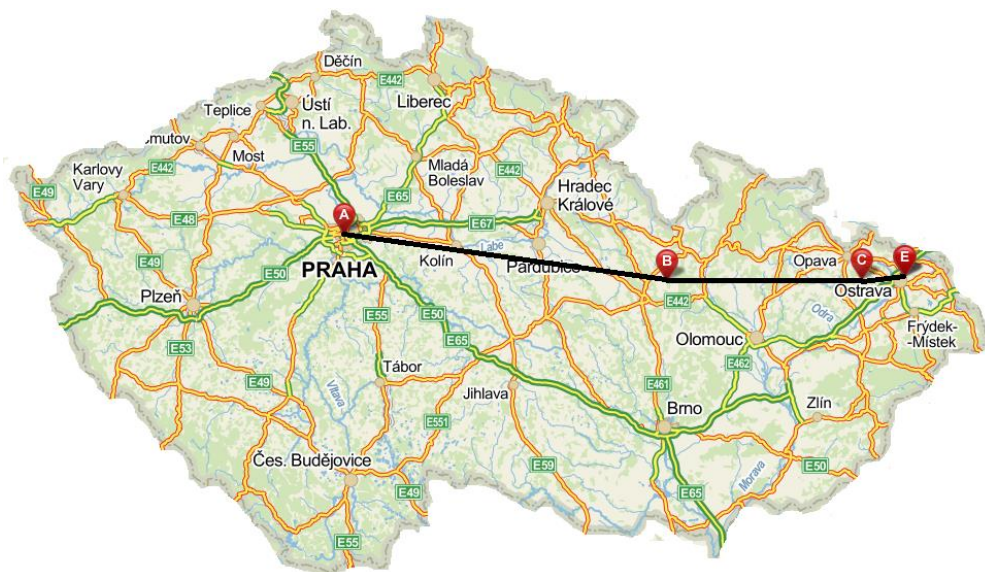
Vstupními hodnotami funkce jsou naměřené pseudozpoždění `NoPN` resp. `SVNPD` z funkce `GPSNumPNSeq.m` resp. `GPSPRCalc.m`. Dále matice s pozicemi družic v kartézských souřadnicích a odhad výchozí pozice.

V první části funkce je vypočtena matice `Sats`, kde jsou uloženy informace pouze o detekovaných družicích. Matice obsahuje příslušné SVN naměřené družice, dále pozici družice v kartézských souřadnicích a vypočtené příslušné pseudozpoždění. Po naplnění matice `Sats` následuje deklarace konstant a parametrů pro další výpočet.

Metoda popsaná v kap. 8.3 umožňuje vypočítat polohu pouze ze čtyř naměřených pseudozpoždění. Při detekování více družic je vytvořena matice `NoComb`, která obsahuje jednotlivé kombinace ze všech detekovaných družic a na konci funkce jsou vypočítané pozice ze všech kombinací zprůměrovány. V proměnné `PrecM` je uložena hodnota v [m], která slouží jako kritérium přerušení iteračního procesu při výpočtu výsledné polohy přijímače. Výpočet polohy je proveden pro všechny kombinace ze všech detekovaných družic. Výpočet je umístěn v cyklu `for` a počet opakování cyklu je dán počtem kombinací. Po výpočtu polohy následuje cyklus `while`, kde je proces výpočtu opakován, dokud není splněna výsledná přesnost.

Průběh iteračního výpočtu polohy je uveden na Obr. 8.8, kdy jsou zadány jako výchozí (inicializační) souřadnice Prahy (50,0823767° N; 14,4260900° E). Postupným zpřesňováním pozice se souřadnice přibližují hledané pozici v Ostravě

(49,8453419° N; 18,2993019° E), zadané přesnosti jednoho metru je dosaženo po 4 iteracích.



Obr. 8.8: Iterační proces pro určení polohy přijímače.

9 VÝPOČET POZICE Z GLONASS SIGNÁLU

V této kapitole je popsán princip určení pozice z GLONASS signálu. Princip určení pozice je v mnoha ohledech podobný jako u systému GPS, liší se jen v některých specifikacích popsaných v kap. 3. Celkový algoritmus výpočtu polohy je rozdělen do několika funkcí (m-souborů):

- generování repliky pseudonáhodné sekvence (funkce `SPCodeGen.m`),
- převod z geodetických souřadnic do kartézských (funkce `Geo2Cart.m`),
- převod z kartézských do geodetických souřadnic (funkce `Cart2Geo.m`),
- výpočet pořadí PN sekvence v datovém bitu (funkce `GLONumPNseq.m`),
- synchronizace na nosný kmitočet (funkce `GLOCostas.m`),
- výpočet pseudozpoždění ze signálu z družice (funkce `GLOPRCalc.m`),
- výpočet polohy přijímače (funkce `GLOPosCalc.m`),
- funkce pro seřazení naměřených dat (funkce `GLOformat.m`),
- výpočet činitele DOP (funkce `GLODop.m`),
- výběr čtyř družic s nejnižším činitelem DOP (funkce `GLOBestSats.m`).

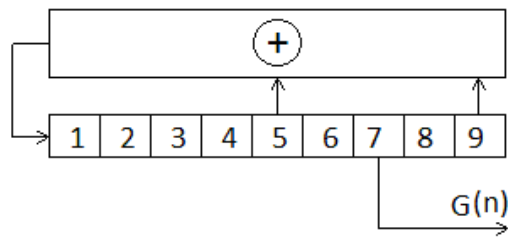
Tak jako v systému GPS i určení polohy v systému GLONASS je omezeno pro povrch Země. Družice v systému GLONASS jsou umístěny na orbitě v nadmořské výšce 19 130 km. Rozsah zpoždění se pohybuje v rozsahu od 63, 767 ms pro elevační úhel 90° do 82,326 ms pro elevační úhel 0°. Rozdíl mezi zpožděními od jednotlivých družic je menší než 20 ms, což je doba trvání jednoho datového bitu navigační zprávy.

9.1 Generátor repliky kódu SP

V kapitole 3.5 je popsána struktura dálkoměrného kódu SP. Jedná se o pseudonáhodnou posloupnost 511 nul a jedniček vysílaných s rychlostí 511 kbit/s a celá posloupnost se opakuje každou milisekundu. Signál standardní přesnosti SP je obdobou C/A kódu v systému GPS, rozdíl mezi systémy je ten, že zatímco v GPS má každá družice svou vlastní PRN posloupnost, v systému GLONASS je pro všechny družice stejná, protože vysílají na různých kanálech. PRN sekvence je vytvořena s posuvného registru, kde generující polynom kódu má tvar

$$G = 1 + X^5 + X^9. \quad (9.1)$$

Schéma posuvného registru generující dálkoměrný kód SP je uvedeno na Obr. 9.1. Na počátku je posuvný registr inicializován samými jedničkami.



Obr. 9.1: Generátor PRN sekvence dálkoměrného kódu SP

9.2 Výpočet pseudozpoždění

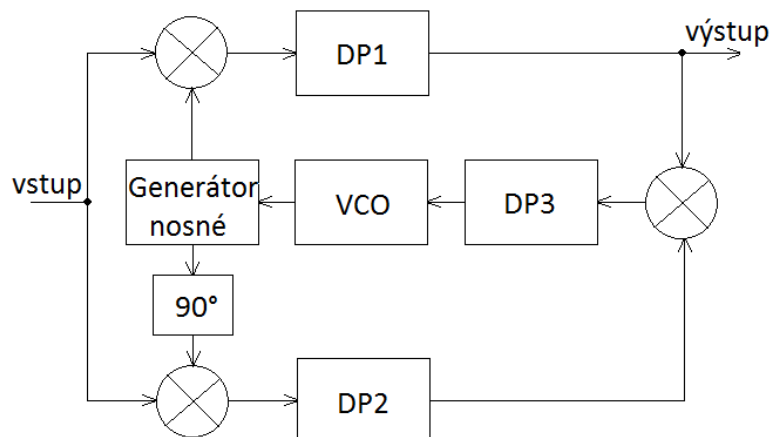
Princip funkce pro výpočet pseudozpoždění v systému GLONASS je velmi podobný jako u systému GPS. Oproti systému GPS je zajištěn přenos signálu z každé družice na jinou nosnou frekvenci (rov. 3.1) a družice tak mohou mít stejný dálkoměrný kód. Z důvodu interferencí do jiných kanálů byl počet kanálů omezen a protilehlé družice na stejné orbitě používají stejný kanál.

Podobně jako u systému GPS, tak v GLONASS je výpočet pseudozpoždění rozdělen do dvou funkcí

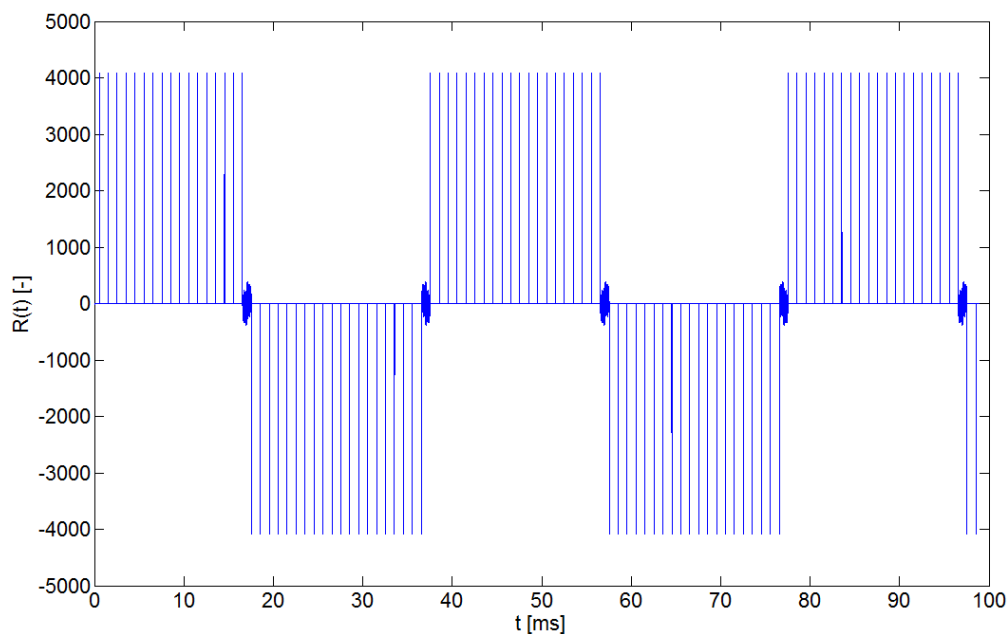
- GLONumPNSeq.m
- GLOPRCalc.m

Určení pseudozpoždění je rozděleno na dvě části. V první funkci GLONumPNSeq.m je vypočtena tzv. hrubá korelace a je určeno o kolik PN sekvencí je zpožděn signál (viz. Obr. 9.3). V druhé části GLOPRCalc.m je vypočítána tzv. jemná korelace, čímž je určeno pseudozpoždění v jednom SP kódu (viz. Obr. 9.4).

Pro demodulaci BPSK signálu byla použita Costasova smyčka. Principiální schéma zapojení je uvedeno na Obr. 9.2. Costasova smyčka generuje nosnou v přesné fázové schodě s nosnou použitou ve vysílači. Přijatý signál je násoben v jedné větvi funkcí cosinus, v druhé funkci sinus a následně filtrován dolní propustí, čímž je zajištěna demodulace. Vynásobením složek obou větví, následné filtraci DP3 je doladěna fáze generované nosné řízeným oscilátorem (VCO) [21].



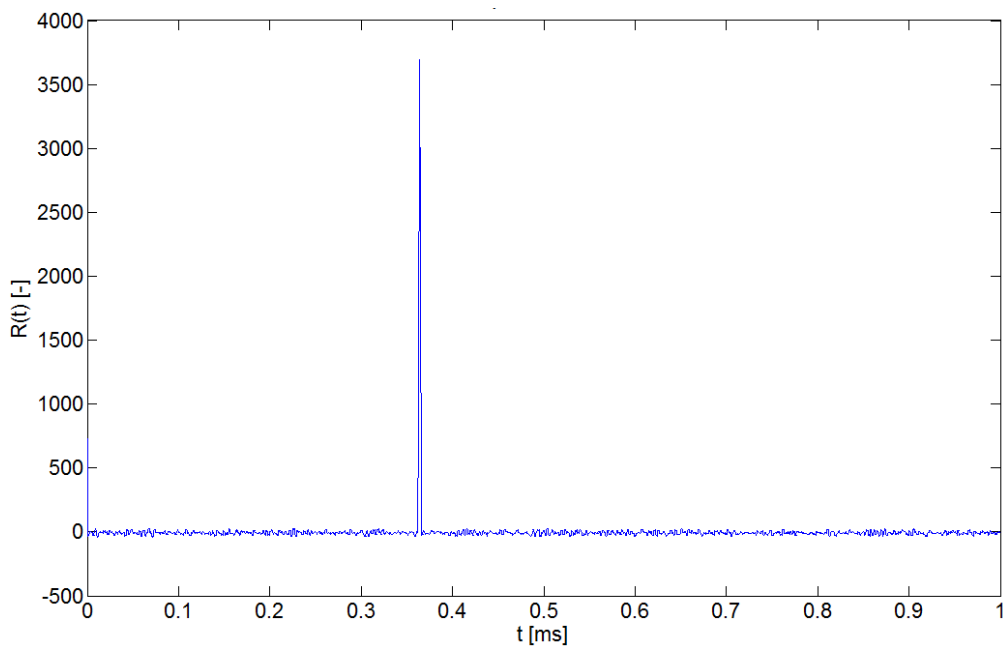
Obr. 9.2: Princip Costasovy smyčky.



Obr. 9.3: Průběh korelace pro pět bitů navigační zprávy v systému GLONASS pro družici SVN 731

Na Obr. 9.4 je časový průběh korelace mezi signálem přijatým a replikou dálkoměrného kódu při použité vzorkovací frekvenci $f_{vz} = 5,11$ MHz. V intervalu 1 ms je jedno korelační maximum v čase $363,992 \mu s$ a celkové pseudozpoždění mezi hledanou polohou a družicí SVN 731 je dáno součtem podle následující rovnice

$$\tau_{m(SVN731)} = 63 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-3} + 363,992 \cdot 10^{-6} = 68,363992 \text{ ms} . \quad (9.2)$$



Obr. 9.4: Časový průběh korelace mezi přijatým signálem a vytvořenou replikou pro družici SVN 731.

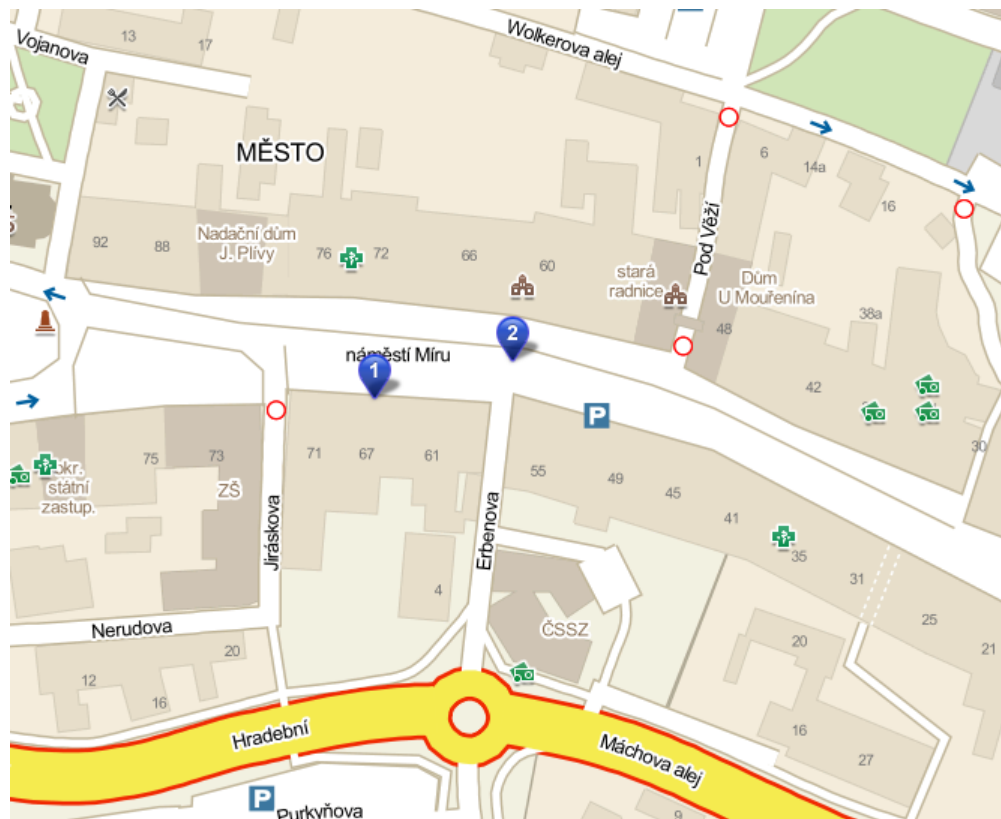
9.3 Výpočet polohy uživatele

Princip určení polohy je velmi podobný jako u systému GPS popsaném v kap. 8.3. Pro výpočet je zapotřebí minimálně čtyř naměřených pseudozpoždění.

```
function Pos = GLOPosCalc(NoPN, SatMeas, SatPos, InitPos)
```

Vstupními parametry funkce `GLOPosCalc.m` jsou naměřené pseudozpoždění `NoPN` resp. `SVNPD` z funkce `GPSNumPNSeq.m` resp. `GPSPRCalc.m`. Dále matice s pozicemi družic v kartézských souřadnicích a odhad výchozí pozice. Princip určení pozice se shoduje s výpočtem popsaným v kap. 8.3.1. Výstupní hodnotou funkce je určená pozice uložená v proměnné `Pos`. Pro převod mezi geodetickými a kartézskými souřadnicemi slouží funkce `Geo2Cart.m` resp. `Cart2Geo.m` pro referenční elipsoid PZ-90 používaný v systému GLONASS.

Na Obr. 9.5 je uvedena vypočtená a skutečná pozice. Bod 2 představuje skutečnou polohu a bod 1 představuje vypočtenou pozici ze signálu z družic. Detekováno bylo 11 družic a použit byl vzorkovací kmitočt $f_{vz} = 10,22$ MHz.



Obr. 9.5: Zobrazení výchozí a vypočtené pozice (www.mapy.cz, Svitavy – náměstí Míru).

10 GENERÁTORY GNSS SIGNÁLŮ

10.1 Generátor GPS signálu

Pro ověření funkčnosti algoritmů pro výpočet polohy uživatele je v této kapitole popsán postup návrhu generátoru GPS signálu, resp. C/A kódu s čipovou rychlostí 1,023 Mb/s namodulovanou na nosnou frekvenci pomocí modulace BPSK. Pro generaci GPS signálu z viditelných pozic s daným zpožděním v místě příjmu je vytvořena funkce v MATLABu GPSSigGen.m.

```
function [SigCodeData, fvz, lenNavData]=GPSSigGen( SatPos)
```

Vstupní hodnotou je matice s pozicemi družic SatPos, výstupem generátoru je navzorkovaný signál SigCodeData, vzorkovací kmitočet fvz a počet bitů navigační zprávy lenNavData. Generátor vytvoří jednotlivé pseudonáhodné sekvence s daným zpožděním odpovídající pozici příjmu GPS signálu. Signál obsahuje pouze data z viditelných družic ze zadané pozice.

V první části funkce GPSSigGen následuje zadání výchozí pozice, pro kterou se má počítat zpoždění od viditelných družic.

```
% Výběr výchozí pozice (někde v ČR - Svitavy, náměstí Míru)
InitLat  = [49 45 22.010];    % Zeměpisná šířka
InitLon  = [16 28 10.017];    % Zeměpisná délka
InitAlt  = [434];            % Nadmořská výška [m]
```

Po zadání výchozí pozice následuje deklarace vzorkovacího kmitočtu fvz, kmitočtu nosné vlny fc a data navigační zprávy NavData.

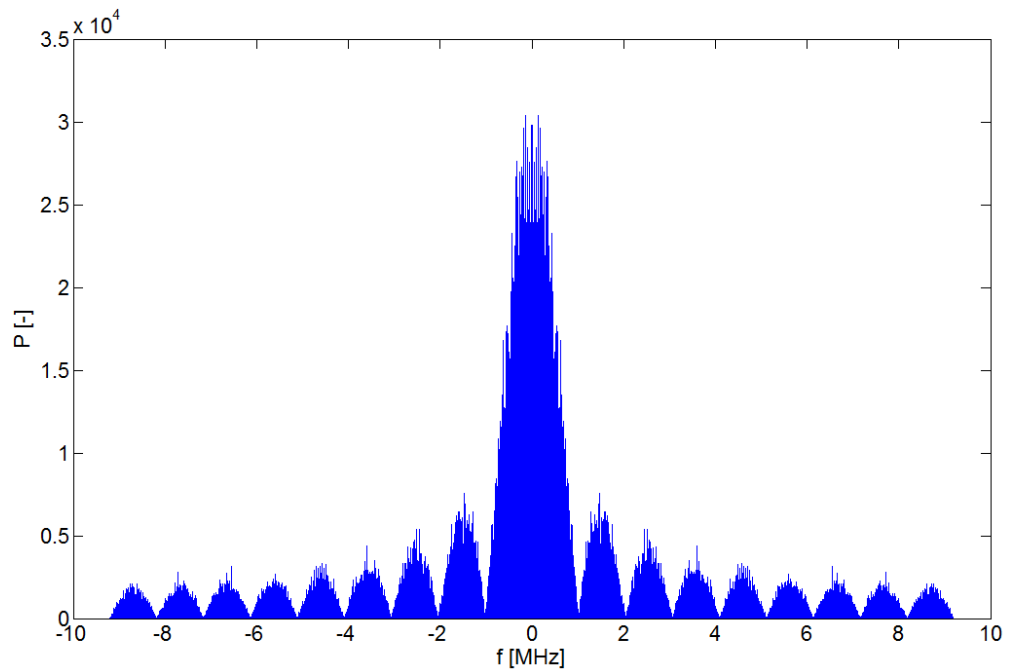
```
% Inicializace
fvz      = 10*1.023e6;        % vzorkovací frekvence
BitFreq  = 1.023e6;          % bitová rychlost PN sekvence
fc       = 2*1.023e6;        % kmitočet nosné
InterpFact= fvz / BitFreq;    % interpolační faktor
NoBits   = 1023;             % počet bitů PN sekvence
NavData  = [-1 1 -1 1 -1 1]; % data navigační zprávy
```

Zadaná souřadnice v geodetickém souřadném systému je následně převedena do kartézských souřadnic pomocí funkce Geo2Cart. Následuje výpočet zpoždění mezi zadanou pozicí a jednotlivými družicemi. Pro další výpočty jsou vybrány pouze družice, které mohou být viditelné z dané pozice. V cyklu for je vytvořena příslušná PN sekvence odpovídající dané družici s patřičným zpožděním a namodulována na nosnou s kmitočtem fc. Výsledné časové průběhy jsou sečteny (CDMA) a uloženy do vektoru SigCodeData. Pomocí funkce awgn může být k užitečnému signálu přidán Gaussovský bílý šum podle zadané hodnoty poměru SNR.

```
% Přenos kanálem s AWGN
SNR = 10;
SigCodeData = awgn(SigCodeData, SNR, 'measured', 'dB');
```

Na Obr. 10.1 je zobrazeno spektrum GPS signálu rozprostřeného C/A kódem. Spektrum má tvar funkce sinc s minimy v násobcích 1,023 MHz. Použit byl vzorkovací

kmitočet $f_{vz} = 30,69 \text{ MS/s}$.



Obr. 10.1: Spektrum GPS signálu.

10.2 Generátor GLONASS signálu

Na podobném principu jako generátor GPS signálu funguje generátor GLONASS signálu GLOSigGen.m.

```
function [SigCodeData, SVN, fvz, lenNavData]=GLOSigGen( SatPos)
```

Vstupní a výstupní hodnoty funkce GLOSigGen.m jsou téměř totožné jako u systému GPS. Dálkoměrný kód SP má bitovou rychlost 511 kbit/s a výstupem generátoru je navzorkovaný signál BPSK. Generátor vytváří jednotlivé sekvence a namoduluje je na příslušnou nosnou frekvenci se zpožděním pro každou viditelnou družici ze zadané polohy.

```
% Inicializace
fvz      = 10*511e3;           % vzorkovací frekvence
BitFreq  = 511e3;             % bitová rychlost PN sekvence
fc       = 2*511e3;           % kmitočet nosné
InterpFact= fvz / BitFreq;    % interpolační faktor
NoBits   = 511;               % počet bitů PN sekvence
NavData  = [-1 1 -1 1 -1 1]; % data navigační zprávy
```

Oproti generátoru GPS signálu nejsou jednotlivé signály z družic jednoduše sečteny, ale každý signál je zpracováván zvlášť, což odpovídá frekvenčnímu dělení FDMA. Výsledné signály jsou uloženy do matice SigCodeData, kde na každém řádku jsou jednotlivé zpožděné signály od příslušných družic. Označení družic je uloženo v proměnné SVN.

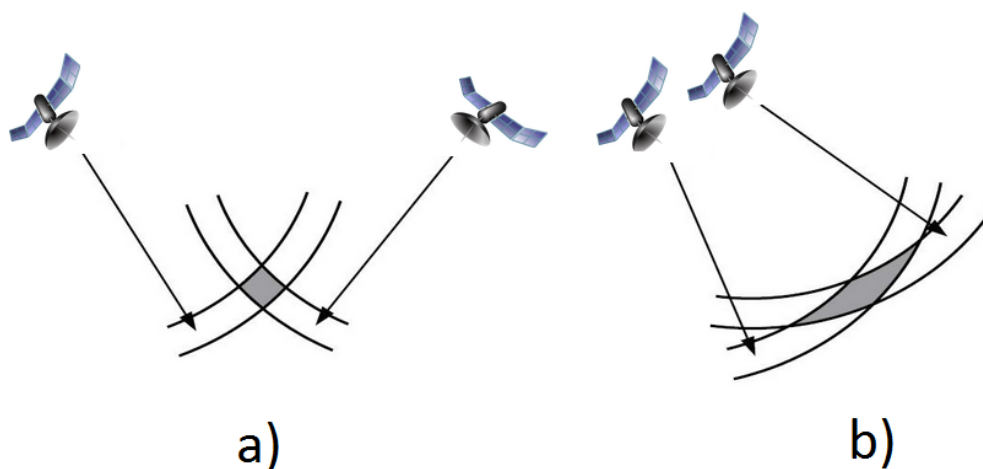
11 VÝPOČET ČINITELE DOP

Chyba při určení polohy je dána mnoha různými faktory, které působí na signál při šíření mezi družicí a přijímačem. Těmito vlivy jsou

- vícecestné šíření,
- ionosférické zpoždění,
- troposférické zpoždění.

Dalšími faktory, které ovlivňují přesné určení polohy, jsou např. nepřesně definované systémové hodiny družic, tj. všechny družice nevysílají v přesně definovaný okamžik, ale je mezi nimi určitý offset. Dále nepřesně definovaná poloha družic, zaokrouhlovací chyby při výpočtech, chyba použité numerické metody, nízký poměr S/N při příjmu signálu a v neposlední řadě chyba použitého referenčního elipsoidu. Kvalitní GNSS přijímač by měl všechny tyto možné vlivy uvažovat, určit výslednou chybu a vybrat pro výpočet pouze družice s nejmenší chybou určení polohy.

Geometrické uspořádání družic nejvíce ovlivňuje přesnost určování polohy. Pro zjednodušení je znázorněna situace (Obr. 11.1) pro dvě družice ve 2D prostoru. Cílem je vybrat takové družice, které mají plochu mezikruží co nejmenší. Ve 3D prostoru se pak nejedná o mezikruží ale o mezikouli.



Obr. 11.1: Vliv použitých družic na vznik chyby při určování polohy.

Na Obr. 11.1a je znázorněna situace s nízkým rozptylem určení vzdálenosti a na Obr. 11.1b je naopak znázorněna situace s vysokým rozptylem určení vzdálenosti. Ideální konstelace by se měla sestávat z jedné družice s elevačním úhlem 90° (zenit) a tří rovnoměrně rozmístěných družic na horizontu [16].

Kvalitu geometrického uspořádání lze matematicky vyjádřit. Používá se k tomu parametr DOP (Dilution of precision). DOP je jednoznačným identifikátorem kvality určení polohy v daném čase a zahrnuje relativní polohu každé družice vzhledem k ostatním. Nižší hodnota DOP vypovídá o vyšší přesnosti určení polohy, naopak vyšší hodnota činitele DOP vypovídá o nižší přesnosti určení polohy.

Celková efektivní hodnota chyby je dána

$$E = \sigma_d \cdot DOP, \quad (11.1)$$

kde σ_d je směrodatná odchylka chyby při měření vzdálenosti. Parametr DOP lze rozdělit na několik dílčích činitelů, které indikují ovlivnění přesnosti různých parametrů

- relativní chyba polohy RDOP,
- horizontální a vertikální chyba určení PDOP,
- horizontální chyba určení HDOP,
- vertikální chyba určení VDOP,
- časový posun hodin TDOP.

Při výpočtu činitele DOP jsou v první řadě určeny jednotkové vektory

$$\mathbf{c}_i = \left(\frac{x_i - x}{r_i}, \frac{y_i - y}{r_i}, \frac{z_i - z}{r_i} \right), \quad (11.2)$$

kde souřadnice x, y, z jsou kartézské geocentrické souřadnice přijímače, souřadnice x_i, y_i, z_i jsou kartézské geocentrické souřadnice družice a r_i je dáno vztahem

$$r_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}. \quad (11.3)$$

Výsledná matice \mathbf{A} pro čtyři družice je definována následovně [22]

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{x_1 - x}{r_1} & \frac{y_1 - y}{r_1} & \frac{z_1 - z}{r_1} & -1 \\ \frac{x_2 - x}{r_2} & \frac{y_2 - y}{r_2} & \frac{z_2 - z}{r_2} & -1 \\ \frac{x_3 - x}{r_3} & \frac{y_3 - y}{r_3} & \frac{z_3 - z}{r_3} & -1 \\ \frac{x_4 - x}{r_4} & \frac{y_4 - y}{r_4} & \frac{z_4 - z}{r_4} & -1 \end{bmatrix}. \quad (11.4)$$

První tři prvky na každém řádku jsou jednotkové vektory mezi přijímačem a detekovanou družicí. Činitel DOP se pak vypočítá z diagonálních prvků matice \mathbf{Q} , která je určena vynásobením matic

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}, \quad (11.5)$$

kde prvky matice \mathbf{Q} jsou

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} d_x^2 & d_{xy}^2 & d_{xz}^2 & d_{xt}^2 \\ d_{xy}^2 & d_y^2 & d_{yz}^2 & d_{yt}^2 \\ d_{xz}^2 & d_{yz}^2 & d_z^2 & d_{zt}^2 \\ d_{xt}^2 & d_{yt}^2 & d_{zt}^2 & d_t^2 \end{bmatrix}. \quad (11.6)$$

Diagonálními prvky matice \mathbf{Q} jsou rozptyly chyb času a polohových souřadnic v geocentrické kartézské soustavě. Činitel DOP je dán rovnicí [22]

$$DOP = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2}. \quad (11.7)$$

Pro výpočet parametrů PDOP, HDOP, VDOP je nutné provést transformaci souřadnic a to tak, že do matice \mathbf{A} je dosazována zeměpisná šířka, délka a nadmořský výška. Časový posun hodin lze určit rovnicí

$$TDOP = \sqrt{d_t^2}. \quad (11.8)$$

Činitel DOP je vypočítán ve funkcích GPSDop.m a GLODop.m.

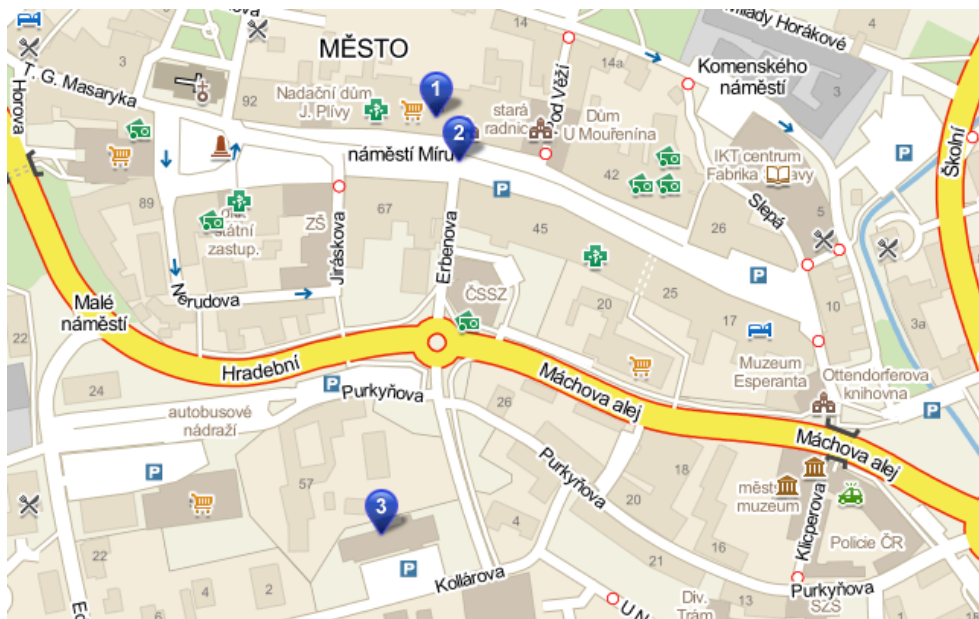
```
function [DOP, BestSats] = GPSDop( SatPos, UserPos, SatMeas)
```

Vstupní hodnotou funkce je matice `SatPos`, která obsahuje pozice všech družic, matice `UserPos` obsahuje pozici přijímače, která byla vypočítána z průměru ze všech detekovaných družic uložených v proměnné `SatMeas`. Výstupem funkce jsou pak čtyři družice s nejnižším činitelem DOP.

Tab. 11.1: Hodnocení vypočteného činitele DOP.

Hodnota DOP	Hodnocení (anglicky)	Hodnocení (česky)	Barva
< 1	Ideal	Ideální	
1 - 2	Excelent	Vynikající	
2 - 5	Good	Výborné	
5 - 10	Moderate	Dobré	
10 - 20	Fair	Uspokojivé	
> 20	Poor	Neuspokojivé	

Na Obr. 11.2 je uveden příklad vlivu výběru družic na určení výsledné polohy. Bod 2 představuje skutečnou hledanou polohu, bod 3 představuje pozici vypočtenou ze všech detekovaných družic a bod 1 je vypočtená pozice s nejnižším činitelem DOP.

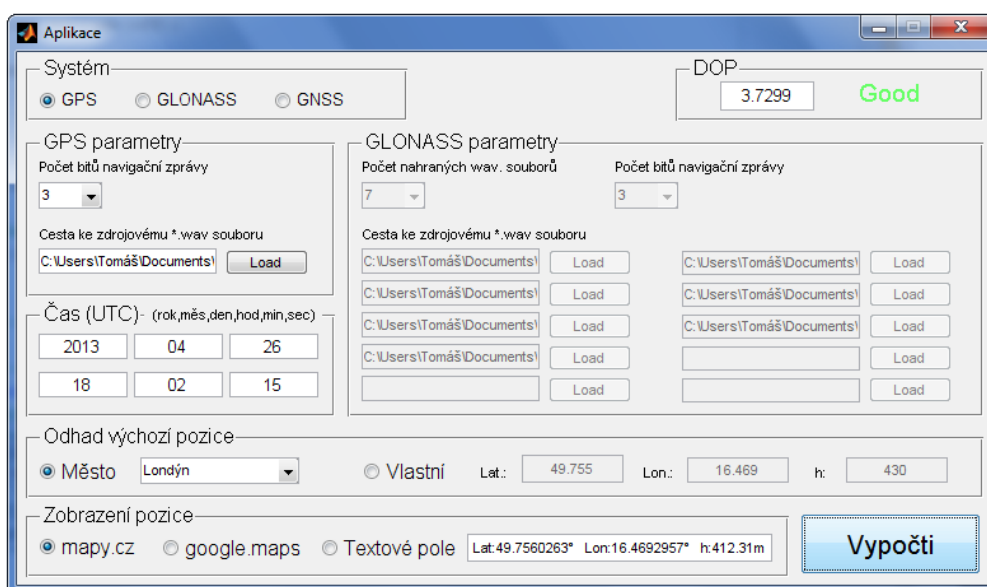


Obr. 11.2: Vliv výběru vhodných družic na určení výsledné polohy.

12 GRAFICKÉ UŽIVATELSKÉ ROZHRAŇÍ

Grafické uživatelské rozhraní bylo vytvořeno v programovém prostředí MATLAB verze R2009a. Pro tvorbu GUI (Graphical User Interface) bylo využito nástroje GUIDE (Graphical User Intererface Development Environment), který je v systému MATLAB přímo integrován. GUIDE obsahuje všechny grafické objekty typu uicontrol, kterými je možno ovládat běh aplikace [23]. Generuje automaticky základní zdrojový kód pro ovládání, kde vzhled aplikace GUI je uložen do souboru s příponou *.fig a jeho zdrojový kód do souboru *.m. GUI vytvořené v této práci je uloženo do souboru

- Aplikace.m
- Aplikace.fig



Obr. 12.1: Výsledné grafické uživatelské rozhraní GUI.

Aplikace se skládá z několika bloků oddělených obdélníkovými rámy (FRAME), pro sdružení určitých skupin objektů uicontrol. Těmito skupinami jsou

- systém,
- GPS parametry,
- GLONASS parametry,
- čas (UTC),
- odhad výchozí pozice,
- vypočti,
- zobrazení pozice,
- DOP.

Všechny tyto skupiny lze rozdělit do tří skupin, kde první skupinou jsou vstupní

parametry, druhou výstupní parametry a poslední skupinou je samotné tlačítko vypočti. V dalších podkapitolách budou popsány jednotlivé skupiny tak, jak by měly být chronologicky za sebou zadávány před samotným výpočtem. Není nezbytně nutné držet se popsaného postupu, avšak musí být zadány všechny vstupní parametry v jednotlivých skupinách před stisknutím tlačítka vypočti. Při spuštění aplikace jsou nastaveny výchozí parametry pro přiložené vstupní soubory s naměřenými signály a v případě výpočtu z jiných naměřených dat by tyto vstupní výchozí hodnoty způsobily naprosto chybné určení polohy.

Zdrojový soubor `Aplikace.m` je rozdělen na výše popsané skupiny a je doplněn docela obsáhlou automaticky generovanou nápovědou v komentářích. Začátek souboru začíná deklarací samotného objektu `figure`, za kterou následuje blok s deklarací výchozího nastavení aplikace. Část bloku s nastavením výchozích hodnot je uvedena níže

```
% /// POČATEČNÍ HODNOTY ///
```

```
set(handles.sysGPSbutton,'Value',1);
```

```
set(findobj('Tag','GPSpopupmenu1'),'UserData',3);
```

```
set(findobj('Tag','GLONpopupmenu2'),'UserData',3);
```

```
set(findobj('Tag','GPSedit1'),'Enable','on');
```

```
.
```

```
.
```

12.1 Systém

Po spuštění aplikace je první řadě vhodné začít skupinou objektů sdružených do bloku systém. Skupina systém obsahuje tři tlačítka typu `radiobutton` označené „GPS“, „GLONASS“ a „GNSS“. Při spuštění aplikace je ve výchozím stavu zapnuto tlačítko „GPS“. Ve zdrojovém souboru `Aplikace.m` je skupina těchto tlačítek definována od řádku 130 do 209. Funkce pro vykonání příslušných událostí po zapnutí odpovídajícího tlačítka jsou

```
function sysGPSbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function sysGLONASSbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function sysGNSSbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

V daný okamžik může být zatrhnuo pouze jedno tlačítko, což zajišťuje funkce

```
function mutual_exclude(off)
```

```
    set(off, 'Value', 0);
```

```
end
```

kde při nastavení příslušného tlačítka do „log. 1“ je nastaven parametr `Value` na 1 a ostatní tlačítka jsou nastaveny do „log. 0“ tj. nastavení parametru `Value` do 0.

Při nastavení libovolného tlačítka se zpřístupní příslušná skupina objektů `uicontrol`. Při aktivaci tlačítka „GPS“ se zpřístupní skupina „GPS parametry“, při aktivaci tlačítka „GLONASS“ se zpřístupní skupina „GLONASS parametry“ a při aktivaci „GNSS“ tlačítka jsou přístupné obě skupiny. Situace, kdy je aktivováno tlačítko „GPS“ a je přístupná skupina objektů „GPS parametry“ je zobrazena na Obr. 12.1.

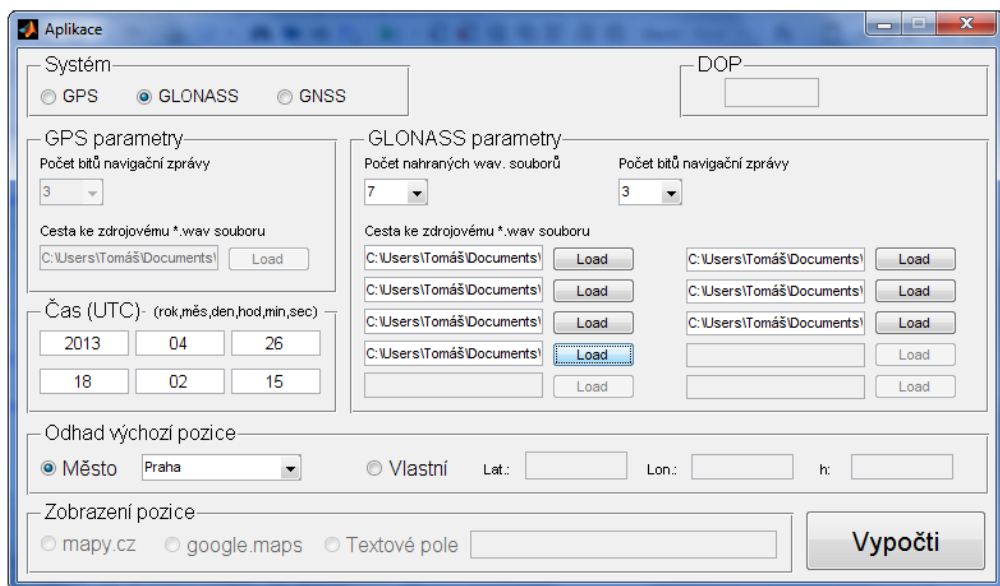
12.2 GPS a GLONASS parametry

Tyto dvě skupiny sdružují objekty uicontrol pro načtení příslušného *.wav souboru. Při kliknutí na tlačítko „load“ se otevře dialogové okno, ve kterém je možné vložit příslušný soubor typu wav s navzorkovanými daty. Vedle tlačítka „load“ se v objektu edit text zobrazí cesta ke zvolenému souboru. Po zadání cesty ke vstupnímu souboru je zpřístupněno stisknutí tlačítka „Vypočti“.

V systému GPS vysílají družice na jedné nosné frekvenci a jednotlivé signály jsou odlišeny vlastní pseudonáhodnou posloupností (CDMA). Pro výpočet polohy z GPS signálu postačí nahrát jeden jediný soubor. V systému GLONASS vysílají družice na jiné nosné frekvenci a pro výpočet polohy je nutné načíst alespoň čtyři soubory s navzorkovanými signály z družic. Počet družic (4-10) je možné nastavit v seznamu, který je vytvořen objektem „popup menu“. Funkce GLONpopupmenu1_Callback vykonává událost po stisku na seznam pro výběr počtu nahraných *.wav souboru.

```
function GLONpopupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

Ve funkci je vyhodnocena zadaná hodnota a podle této hodnoty je zpřístupněn příslušný počet řádků pro načtení souborů. Na Obr. 12.2 je uveden příklad pro 7 vstupních souborů.



Obr. 12.2: Možnost nastavení počtu vstupních souborů v bloku GLONASS parametry.

Poslední hodnotou, kterou je potřeba zadat před samotným výpočtem polohy, je počet bitů navigační zprávy. Výchozí a zároveň minimální počet bitů je tři a maximální je šest. Výběr počtu bitů je také vytvořen objektem typu „popup menu“ a funkce, které vykonávají událost po nastavení příslušné polohy jsou

```
function GPSpopupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function GLONpopupmenu2_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

Na zvoleném počtu bitů navigační zprávy závisí výpočetní náročnost určení polohy. Při minimálním počtu bitů nemusí dojít ke změně logické hodnoty, tj. následují

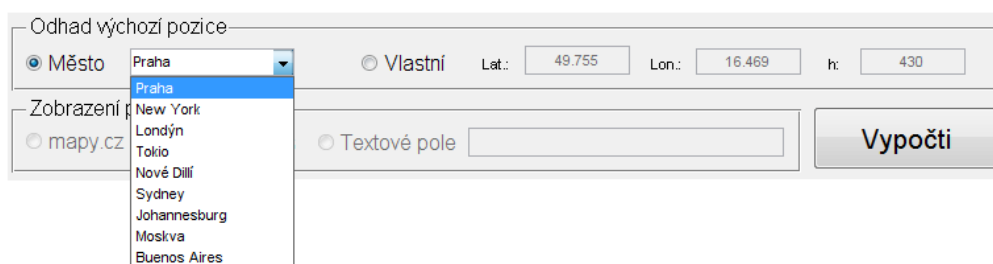
za sebou tři „log. 1“ resp. tři „log 0“. Pokud nedochází ke změně logické hodnoty, nemůže být určeno pseudozpoždění mezi jednotlivými družicemi. Tuto situaci lze řešit zvýšením počtu analyzovaných bitů navigační zprávy, což zvyšuje výpočetní náročnost nebo analýzou jiného úseku dat, kde ke změně logické hodnoty dochází.

12.3 Čas (UTC)

Tato skupina sdružuje šest objektů typu „edit text“, do kterých je nutné zadat rok, měsíc, datum, hodinu, minuty a vteřiny. V časovém okamžiku, ve kterém bylo uskutečněno měření, je následně vypočítána přesná poloha družic. Tento zadaný čas musí odpovídat časovému okamžiku v Greenwichi, tj. o hodinu méně od středoevropského časového pásma v případě zimního času a o dvě hodiny méně v případě letního času.

12.4 Odhad výchozí pozice

V kap. 8.3 byl popsán princip pro výpočet polohy družice tzv. dálkoměrnou metodou. Pro výpočet je nutné znát alespoň přibližnou polohu uživatele, tj. např. souřadnice hlavního města v daném státě. Na Obr. 12.3 je zobrazen seznam s předem nadefinovaných hlavních měst.



Obr. 12.3: Nastavení výchozí pozice v uživatelském rozhraní.

Další možností je definice vlastní výchozí polohy přepnutím na tlačítko „vlastní“, kde je poté zadána zeměpisná šířka, délka a nadmořská výška. Podobně jako ve skupině objektů „Systém“ může být aktivní jen jedno tlačítko typu radiobutton, tj. tlačítko „město“ nebo „vlastní“.

12.5 Vypočti

Při spuštění aplikace je ve výchozím stavu tlačítko „Vypočti“ nepřístupné. Po nastavení příslušných vstupních parametrů, tj. výběrem systému, načtení příslušných vstupních wav souborů, nastavení počtu bitů navigační zprávy a nastavení odhadu pozice je možné spustit výpočet pozice z naměřených signálů. Ve funkci

```
function runbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

se nejprve načte výchozí pozice a zadaný čas, které se uloží do proměnných `InitPos` a `UTC`. Dále se zdrojový kód funkce větví na tři části podle toho, jaký systém

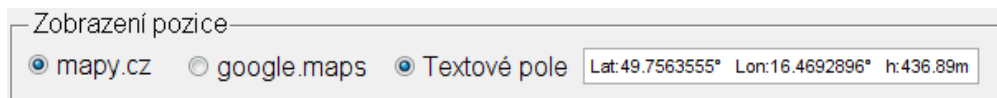
byl na počátku zvolen. Pro všechny je ale společné to, že je načtena do proměnné `file` cesta ke vstupnímu souboru s navzorkovanými daty a počet bitů navigační zprávy je uložen do proměnné `lenNavData`. Funkce pro výpočet výsledné polohy jsou uloženy v samostatných složkách GPS, GLONASS a GNSS. Podle zvoleného použitého systému je zvolen příslušný pracovní adresář a spuštěna funkce `main`

```
function [UserPos UserPosAvr DOP] = main(file, lenNavData,
                                         InitPos, UTC);
```

Vstupem funkce jsou výše zmíněné vstupní parametry a po výpočtu funkce vrací polohu `UserPos` vypočtenou ze čtyř družic s nejnižším DOP, polohu `UserPosAvr` vypočtenou ze všech detekovaných družic a hodnotu činitele DOP.

12.6 Zobrazení pozice

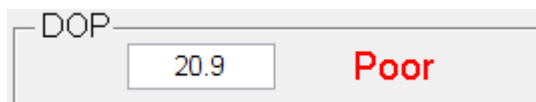
V grafickém uživatelském rozhraní je skupina objektů `uicontrol` sdružena do skupiny „Zobrazení pozice“. Při spuštění aplikace je tato skupina objektů nepřístupná a zpřístupněna je až po výpočtu pozice, tj. stisknutí tlačítka „Vypočti“. Zde je možné změnou logické hodnoty tlačítka „mapy.cz“ a „google.maps“ zobrazit pozici přímo na online mapovém podkladu (viz. Obr. 9.5). Webová adresa s vypočtenou pozicí je otevřena přímo ve výchozím internetovém prohlížečem pomocí příkazu `web`. Některé především starší verze MATLABu jej nepodporují. Zeměpisná šířka, délka a nadmořská výška pak mohou být zobrazeny v textovém poli.



Obr. 12.4: Zobrazení vypočtené pozice s nejnižším činitelem DOP.

12.7 DOP

V kap. 11 byl popsán princip výpočtu činitele DOP. V grafickém uživatelském rozhraní je skupina objektů `uicontrol` pro zobrazení činitele DOP umístěna v pravém horním rohu. Při spuštění aplikace je objekt typu „edit text“ prázdný a hodnota činitele DOP se zobrazí stisknutím tlačítka vypočti a následném výpočtu pozice přijímače. Na Obr. 12.5 je uveden příklad zobrazení činitele DOP, který je ještě doplněn objektem „static text“, který zobrazuje slovní hodnocení vypočtené hodnoty s vhodně zvolenou barvou textu podle Tab. 11.1 [22].



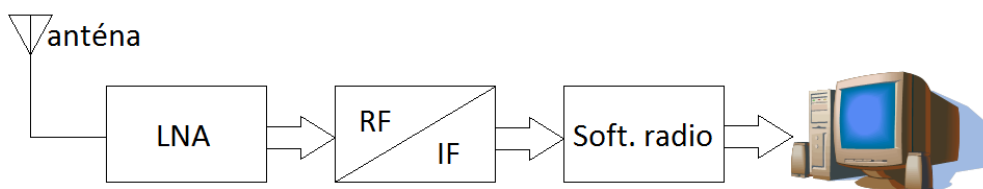
Obr. 12.5: Zobrazení činitele DOP se slovním popisem vypočtené hodnoty.

13 TEST PROGRAMU S REÁLNÝMI NAVZORKOVANÝMI SIGNÁLY

V této kapitole bude popsáno otestování aplikace s reálnými navzorkovanými signály. První část této kapitoly popisuje zachycení signálu vysílaných družicemi. V druhé části je pak popsáno zachycení signálu z generátoru Tabor WW1071. V příloze B jsou pak uvedeny použité měřicí přístroje.

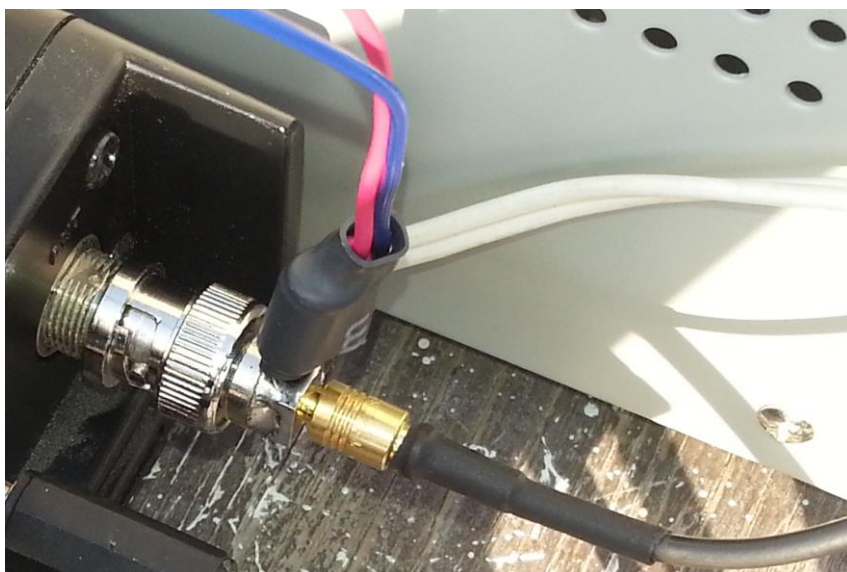
13.1 Měření reálných signálů vysílaných družicemi

Schéma zapojení měřicího pracoviště je znázorněno na Obr. 13.1.



Obr. 13.1: Schéma zapojení měřicího pracoviště.

Jako anténa byla použita Low-Voltage GPS Antenna SM-19 (RHCP) se středem na 1575,42 MHz +/- 1,023MHz. Anténa má v sobě integrován nízkošumový zesilovač (LNA) se zesílením 27 dB a napájením 2,5 ~ 3,3 V [23]. Před BNC konektor byla vložena stejnosměrná vazba pro napájení LNA zesilovače z externího zdroje. Vazba je zobrazena na následujícím obrázku.



Obr. 13.2: Napájení LNA zesilovače stejnosměrnou vazbou.

Anténa byla zapojena do downkonvertoru AOR AR8600MK2, který převede signál z nosné 1575,42 MHz na mezifrekvenci 10,7 MHz. AR8600 je širokopásmový univerzální radiový přijímač pracující na frekvencích 530 kHz – 3 GHz [24].

Downkonvertor je dále propojen se softwarovým radiem WR-G31DDC Excalibur přes BNC kabel. Softwarové radio má vstupní konektor SMA, a proto byla mezi BNC kabel a SMA konektor připojena přechodka. Softwarové radio pracuje do 50 MHz a s počítačem je propojeno pomocí USB kabelu. K softwarovému radiu je dodán i program WiNRADiO G31DDc pro zachycení a zpracování signálu, kde výsledné soubory jsou uloženy do souboru typu wav s koncovkou *.ddc. V programu je možné provést demodulaci výběrem ze základních typů demodulací. Výsledný soubor je pak uložen do souboru s koncovkou *.wav [26].

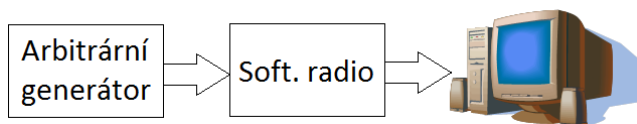
Pro zpracování dat byl použit notebook HP Pavillion dv6899ec s interaktivním softwarovým prostředím MATLAB verze 7.8.0 (R2009a) a pro napájení byl použit stejnosměrný zdroj MATRIX MPS-3005D. Fotografie zapojeného měřicího pracoviště je uvedena v příloze A.1.

Po zachycení signálu a následném zpracování ve vytvořeném programu bohužel korelace s vytvořenou replikou signálu dopadla neúspěšně. Důvodem je nízká citlivost přijímače AR8600 na kmitočtech nad 1,3 GHz [24].

Citlivost: (1,3 – 3 GHz) NFM: 2,5 μ V (12 dB SINAD)

13.2 Měření signálu z generátoru Tabor WW1071

Pro ověření funkčnosti programu byl použit arbitrární generátor Tabor WW1071. Schéma zapojení měřicího pracoviště je uvedeno na Obr. 13.3.



Obr. 13.3: Schéma zapojení měřicího pracoviště s arbitrárním generátorem Tabor.

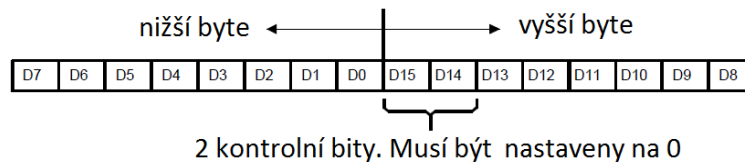
Arbitrární generátor Tabor lze použít ke generování standardních signálů, např. sinusovky, obdélníku atd. Další možností je v programu MATLAB si nadefinovat vlastní signál a ten nahrát do paměti generátoru o maximální velikosti 2 MB. Z funkcí GPSSigGen.m a GLOSigGen.m popsaných v kap. 10 jsou vygenerovány BPSK signály s patřičným zpožděním odpovídající hledané pozici. Tyto hodnoty lze nahrát přímo z programu MATLAB do generátoru přes USB kabel. Skript pro naprogramování vlastních hodnot do generátoru je pojmenován DriverTabor_ww1071.m.

V první části skriptu je vygenerován patřičný signál a komunikace s generátorem je zahájena následujícími příkazy

```
%% Komunikace s Taborem
s = serial('COM7','Terminator','LF')
set(s,'OutputEmptyFcn',@instrcallback)
fopen(s)
```

kde COM7 je označení příslušného sériového portu. Příkaz `serial` je ještě doplněn o atribut LF (Line Feed), který slouží jako znak pro ukončení každého příkazu [27]. Za každým příkazem je vložena časová prodleva `pause(0.3)`, aby došlo k příslušným nastavením než bude zaslán další příkaz.

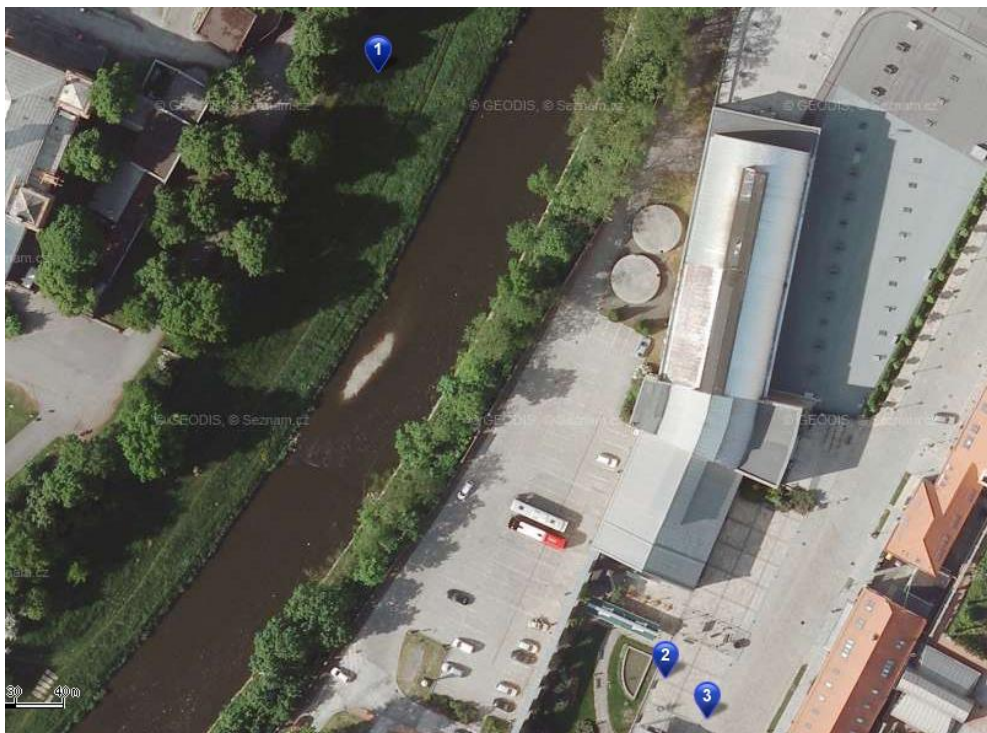
Pro posílání příkazů do generátoru slouží příkazy `fprintf()` a `fwrite()`. Nejprve je smazán obsah předešlé paměti příkazem `:TRACe:DELeTe:ALL`. Dále následuje definice velikosti zvoleného segmentu, tj. počtu vzorků příkazem `:TRACe:DEFine 1, 327360`. Počet vzorků musí být vždy sudé číslo v rozsahu od 16 do $1 \cdot 10^6$ [27]. Za definicí velikosti segmentu následuje výběr zvoleného segmentu příkazem `:TRACe:SELEct 1`. Následuje zaslání příslušných hodnot příkazem `:TRACe#6654720`, kde za znakem # první číslo znamená, kolik znaků bude následovat před zasíláním vlastních vzorků signálu. Za tímto znakem následuje hodnota, která odpovídá počtu bajtů, které budou následně zaslány. Za tímto příkazem jsou pomocí příkazu `fwrite` zaslány příslušné vzorky signálu s následující strukturou.



Obr. 13.4: Struktura jednoho vzorku (2 bajtů).

Jeden vzorek je vyjádřen dvěma bajty a jeho hodnota musí být od 0 do 16384 (2^{14}), nejvyšší dva bity jsou kontrolní a musí být nastaveny na „log 0“. Hodnota 0 odpovídá nejnižší hodnotě $-U_{MAX}$ a hodnota 16384 pak maximální amplitudě $+U_{MAX}$. Hodnota 0 V pak odpovídá dekadické hodnotě 8191. V závěru skriptu je pak nastaven příslušný vzorkovací kmitočet a zapnut výstup generátoru. V příloze A.3 je uveden snímek obrazovky z programu WinRADiO G31DDC dodávaného k softwarovému radiu. Ze snímku je patrné, že bpsk signál rozprotřený C/A kódem je umístěn na mezifrekvenci 4 MHz.

Na Obr. 13.5 je uveden výpočet výsledné polohy. Bod 3 představuje skutečnou hledanou pozici, bod 1 je poloha vypočtená v systému GLONASS a bod 2 je poloha vypočtená v systému GPS. Pro GPS byl použit vzorkovací kmitočet 8,184 MS/s a pro GLONASS byl použit vzorkovací kmitočet 8,176 MS/s. V Tab. 13.1 jsou uvedeny vypočtené pozice s odchylkou od skutečné polohy.



Obr. 13.5: Výpočet výsledné polohy přijímače systému GNSS.

Tab. 13.1: Vypočtené pozice s odchylkou od skutečné polohy z GNSS systémů.

	Skutečná pozice	GPS		GLONASS	
		průměr	s DOP	průměr	s DOP
Zeměpisná šířka [°]	49,7471	49,7475	49,7472	49,7488	49,7483
Zeměpisná délka [°]	13,3875	13,3887	13,3873	13,3778	13,3865
Nadmořská výška [m]	313,000	110,847	360,838	404,664	228,685
Chyba zem. šířky [“]	-	-2,28795	0,25927	5,81476	4,20680
Chyba zem. délky [“]	-	4,39079	-0,42980	-34,6263	-3,48331
Chyba nad. výšky [m]	-	-202,153	47,8376	91,6637	-84,3153

ZÁVĚR

Po spuštění systému GPS pro civilní uživatele došlo k rozsáhlému komerčnímu využití této technologie. Problematika družicové navigace je velice rozsáhlá a finančně nákladná. Po znovuoobnovení systému GLONASS jsou v současné době plně funkční dva systémy a postupně se připravuje nasazení systémů Galileo a Compass. Zásadním rozdílem mezi systémem Galileo a jeho předchůdci bude ten, že nebude provozován vojenským sektorem a bude určen především pro komerční využití.

V práci je rozebrán a popsán princip a specifikace globálních navigačních systémů GPS, GLONASS a Galileo. Dále jsou v práci popsány matematické metody pro určení polohy a v interaktivním programovém prostředí MATLAB je navržen program s grafickým uživatelským rozhraním pro určení hledané polohy přijímače pro systémy GPS a GLONASS. Pro výpočet polohy je použita tzv. dálkoměrná metoda, kdy z naměřených pseudozpoždění je hledán průsečík kulových ploch. Pro řešení rovnice (7.4) je použita přímá metoda výpočtu s aproximací do Taylorovy řady pro vhodně zvolený přibližný odhad. Výpočet je navržen pouze pro čtyři družice a v případě naměření více družic je opakován pro všechny možné kombinace. Z této polohy je pak určena kombinace s nejnižším činitelem DOP a výpočet polohy je opakován pro tuto nejvýhodnější konstelaci družic. Veškeré výpočty jsou prováděny v kartézském souřadném systému a v práci jsou navrženy skripty pro převod do geodetických souřadnic a zpět s ohledem na parametry referenčních elipsoidů používaných v systému GPS a GLONASS.

Pro určení polohy přijímače je nutné znát přesnou polohu družic. Výpočet souřadnic družic je prováděn z efemerid přenášených v navigační zprávě. Z důvodu velkého množství dat při příjmu navigační zprávy, jsou navrženy funkce pro výpočet přesné pozice družic z efemerid publikovaných na serveru www.celestrak.com. Výpočet polohy družic byl ověřen ve volně dostupném profesionálním programu WXtrack.

Pro ověření funkčnosti a přesnosti výpočtu bylo uskutečněno měření z reálných signálů vysílaných družicemi. Bohužel kvůli nízké citlivosti přijímače AOR AR8600 na kmitočtech nad 1,3 GHz korelace signálu s vytvořenou replikou dopadla neúspěšně. Funkčnost aplikace byla ověřena pomocí arbitrárního generátoru, do kterého lze nahrát vlastní signál. Výsledky z měření jsou uvedeny v kap. 13.

Oba zmiňované systémy mají řadu výhod a nevýhod. C/A kód v systému GPS má vyšší přesnost určení polohy oproti dálkoměrnému kódu SP v systému GLONASS, což je způsobeno především délkou použité PRN sekvence. Další výhodou GPS oproti systému GLONASS je, že signály ze všech družic jsou vysílány na jedné nosné frekvenci a nedochází tak k interferencím mezi jednotlivými kanály. Na druhou stranu, pokud má každá družice svůj vlastní frekvenční kanál, nedochází ke korelačnímu rušení a všechny družice mohou mít stejný dálkoměrný kód.

Výsledná aplikace zpracovává pouze malou část navigační zprávy (3-6 bitů), ze kterého je určeno pseudozpoždění. Výpočet polohy přijímače je omezen pro polohy v blízkosti zemského povrchu. Rozdíl zpoždění signálu mezi všemi dostupnými družicemi a uživatelem je menší než 20 ms a z analýzy jednoho datového bitu tak lze určit zpoždění signálu. V práci není uvažováno mnoho vlivů, které ovlivňují šíření

signálu prostředím. Příčinou chyby při určení polohy může být zbytkové ionosférické nebo troposférické zpoždění. Dále nepřesnost kepleriánských elementů, nepřesnost systémových hodin družic, které nevysílají v přesně stanovený okamžik a je mezi nimi určitý offset. V navigační zprávě jsou vysílány korekční prvky pro eliminaci výše zmíněných vlivů.

LITERATURA

- [1] HOFMANN-WELLENHOF, B., LICHTENEEGER, H., COLLINS, J. Global Positioning System: Theory and Practice, New York: Springer, 2001.
- [2] European Space Agency. ESA - Navigation [online]. Copyright 2000 – 2011. [11.11.2011]. Dostupné na webu European Space Agency: <http://www.esa.int/esaNA/index.html>
- [3] GIBBONS MEDIA & RESEARCH LLC. Inside GNSS: Engineering solutions from the Global Navigation Satellites System Community [online]. Eugene (Oregon): Gibbons Media and Research, LLC [cit. 2012-02-24]. Dostupné z: <http://www.insidegnss.com/>
- [4] U.S. DEPARTMENT OF HOMELAND SECURITY. Navigation Center: The Navigation Center of Excellence[online]. Alexandria: United States Coast Guard [cit. 2012-02-24]. Dostupné z: <http://www.navcen.uscg.gov/>
- [5] FEDERAL SPACE AGENCY. GLONASS: Information analytical center [online]. Korolev (Russia): Information-analytical centre, 2005-2012 [cit. 2012-02-24]. Dostupné z: <http://www.glonass-ianc.rsa.ru/en/>
- [6] OBAIDAT. Global Navigation Satellite System (GNSS) [online]. Princeton University, 9.6.2006 [cit. 2012-02-24]. Dostupné z: <http://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf>. Princeton. Vedoucí práce Alain L. Kornhauser.
- [7] LAMMERTSMA, P. F. Satellite Navigation. Institute of Information and Computing Sciences Utrecht University, February 2, 2005. Dostupné z: http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=satellite%20navigation%20p.%20f.%20lammertsma%20institute%20of%20information%20and%20computing%20sciences%20utrecht%20university&source=web&cd=1&ved=0CCMQFjAA&url=http%3A%2F%2Fpaul.luminos.nl%2Fdownload%2Fdocument%2Fsatellite_navigation.pdf&ei=uZBHT4WSDcaYOvDBiP8N&usg=AFQjCNEyf_ncbPxK_O7mhpgezM8IXPGfDw. Thesis. Utrecht University.
- [8] BRUYNINX, Carine a Pascale DEFRAIGNE. GNSS. ROYAL OBSERVATORY OF BELGIUM. GNSS Research Group [online]. Belgium: Royal Observatory of Belgium, 2008 [cit. 2012-02-28]. Dostupné z: http://gnss.be/gnss_tutorial.php
- [9] KÖHNE, Anja a Michael WÖßNER. GPS-System: History of NAVSTAR GPS. KOWOMA. Kowoma [online]. 19.4.2009 [cit. 2012-02-28]. Dostupné z: <http://www.kowoma.de/en/gps/history.htm>
- [10] RAPANT, Petr. VŠB-TU OSTRAVA. Družicové polohové systémy [online]. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2002 [cit. 2012-03-22]. ISBN 80-248-0124-8. Dostupné z: http://gis.vsb.cz/dokumenty/dnsgps/at_download/file
- [11] Ruský globální družicový navigační systém GLONASS. CZECH SPACE OFFICE. Galileo v České republice [online]. Praha [cit. 2012-03-26]. Dostupné z: <http://www.czechspace.cz/cs/galileo/aktuality-GPS-Glonass/GLONASS>
- [12] COORDINATION SCIENTIFIC INFORMATION CENTER. Inteface control document: GLONASS[online]. Moskva, 1998 [cit. 2012-04-10]. 4.0. Dostupné z: <http://gauss.gge.unb.ca/GLONASS.ICD.pdf>

- [13] Odbor kosmických technologií a družicových systémů: Galileo. MINISTERSTVO DOPRAVY. [online]. 2012 [cit. 2012-04-19]. Dostupné z: <http://www.spacedepartment.cz/3-sekce/galileo/>
- [14] Global navigation satellite systems (GNSS). GNNS poster. Novatel. Dostupné z: <http://www.naic.edu/~phil/rfi/NovAtelPosterGPSworld.pdf>
- [15] ESA. Navipedia [online]. 20.4.2012 [cit. 2012-04-24]. Dostupné z: <http://navipedia.net/>
- [16] ŠEBESTA, Jiří. *Globální navigační systémy*. První. Brno: VUT, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. ISBN 978-80-214-4500-0.
- [17] ŠEBESTA, Jiří. Radiolokační a radionavigační systémy: Přednášky. In: *Základy navigace: Geodetické souřadné systémy* [online]. Brno, 2011 [cit. 2012-11-30]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~sebestaj/MRAR/prednasky.htm>
- [18] KASAL, Miroslav. *ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY. Směrové a družicové spoje: Přednášky*. Brno: FEKT VUT, 2003. ISBN 80-214-2496-6.
- [19] CELESTRAK. Center for space standard and inovation [online]. 16.12.2000, 25.10.2012 [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: <http://www.celestrak.com/>
- [20] Hvězdný čas. Wipedia: otevřená encyklopedie [online]. [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Hv%C4%9Bzdn%C3%BD_%C4%8Das
- [21] MARŠÁLEK, Roman. *VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Teorie rádiové komunikace: Simulace v sw MATLAB*. první. Brno: Litera BRNO, 2012. ISBN 978-80-214-4504-8.
- [22] Dilution of precision (GPS). Wikipedia: The free encyklopedia [online]. 17.3.2013 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Dilution_of_precision_\(GPS\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Dilution_of_precision_(GPS))
- [23] ZAPLATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR. *MATLAB: tvorba uživatelských aplikací*. 1. vyd. Praha: BEN, 215 s. ISBN 80-730-0133-0.
- [24] SAN JOSE NAVIGATION, INC. Low-Voltage GPS Antenna: Model: SM-19 [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.sanav.com/download_document/SM-19.pdf
- [25] AOR. AOR A8600mk2: Mobile Wide Range All Mode Receiver [online]. Western Avenue, 06, 2000 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.aorja.com/support/manuals/ar8600mk2_manual_a.html
- [26] WINRADIO. WR-G31DDC Excalibur HF Receiver: User 's Manual. Oakleigh, Victoria 3166.
- [27] TABOR ELECTRONICS LTD. User Manual: Models 1071/1072 [online]. Tel Hanan Israel, May 26, 2005 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: http://www.taborelec.com/service_download_all.asp?model=WW1071&type=Manuals&operating=All_system&over=download
- [28] TAYLOR, David. *WXtrack: Satellite tracking* [online]. Edinburgh, Last modified: 2012 Nov 12 at 17:32 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.satsignal.eu/software/wxtrack.htm>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

Zkratka	Anglicky	Česky
AVL	Automatic Vehicle Location	Systém pro automatickou lokalizaci vozidla
A-S	Anti – Spoofing	Šifrování P - kódu u systému GPS
BOC	Binary Offset Carrier	BOC modulace
BPSK	Binary Phase Shift Keying	Binární fázové klíčování
C/A	Coarse/Acquisition Code	Kód v systému GPS
C code	Civilian Code	Kód v systému GPS
CDMA	Code Division Multiple Access	Kódový multiplex
COSPAS	International Satellite-Based Search and Rescue	Celosvětová družicová záchranná služba
CRC	Cyclic Redundancy Checks	Slovo obsahující redundantní bity
CS	Commercial Service	Komerční služba v systému Galileo
C-WAAS	Canadian Wide Area Augmentation System	Kanadský systém rozšiřující družicové navigační systémy
DOP	Dilution of precision	Zhoršení činitele přesnosti
E1,E2, E5,E6	Galileo frequency	Specifické kmitočty, na kterém vysílají signály družice Galileo
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service	Evropský systém rozšiřující družicové navigační systémy
ERIS	External Region Integrity Systems	Externí regionální integrovaný systém
f		Signál v časové oblasti
FDMA	Frequency Division Multiple Access	Frekvenční multiplex
FOC	Full Operational Capability	Plná operační schopnost
GAGAN	GPS and Geo-Augmented Navigation	Indický systém rozšiřující družicové navigační systémy
GCS	Ground Control Segment	Řídicí centrum v systému Galileo
GIOVE	Galileo In-Orbit Validation Element	Označení družic systému Galileo
GCC	Galileo Control Center	Pozemní kontrolní středisko
GMS	Ground Mission Segment	Řídicí centrum v systému Galileo
GNSS	Global Navigation Satellite System	Globální družicový polohový systém
GLONASS	Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistema	Globální navigační družicový systém
GPS	Global Positioning System	Globální poziční systém
GUI	Graphical User Intererface	Grafické uživatelské rozhraní
GUIDE	Graphical User Intererface Development Environment	Nástroj pro tvorbu grafického uživatelského rozhraní
HOW	Handover Word	Předávací slovo
HP	High Positioning	Vysoká přesnost
IIR		Označení družic GPS

IOC	Initial Operational Capability	Částečná provozní schopnost
IOV	In-Orbit Validation	Testovací fáze architektury
IRNSS	Indian Regional Navigational Satellite System	Indický regionální družicový navigační systém
L1,L2,L3 L4,L5	GPS frequency	Specifické kmitočty, na kterém vysílají signály družice GPS
LFSR	Linear Feedback Shift Register	Zpětný posuvný registr
LNA	Low noise amplifier	Nízkošumový zesilovač
MBOC	Multiplexed Binary Offset Carrier	BOC modulace
M code	Military Code	Kód v systému GPS
MSAS	Multi-Functional Satellite Augmentation System	Japonský systém rozšiřující družicové navigační systémy
N/A	Not available	Není k dispozici
NAGU	Notice Advisory to GLONASS Users	Zprávy o kosmickém segmentu v systému GLONASS
NAV	Navigation Message	Navigační zpráva v systému Galileo
OS	Open Service	Základní služba v systému Galileo
PRN	Pseudorandom Noise Sequence	Pseudonáhodné sekvence
PRS	Public Regulated Service	Veřejně regulovaná služba
P(Y)	Precision Code	Kód v systému GPS
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	Čtyřstavové fázové klíčování
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System	Japonský regionální družicový navigační systém
RHCP	Right Hand Circularly Polarized	Pravotočivá kruhová polarizace
SAR	Search and Rescue Service	Vyhledávací a záchranná služba
SARSAT	International Satellite-Based Search and Rescue	Celosvětová družicová záchranná služba
SBAS	Satellite-Based Augmentation System	Systémy rozšiřující globální družicové systémy
SNAS	Satellite Navigation Augmentation System	Čínský systém rozšiřující družicové navigační systémy
SoL	Safety of Life	Bezpečnostní služba v GNSS
SP	Standard Positioning	Standardní přesnost
SV	Space Vehicle	Jednotlivá družice
SVN	Space Vehicle Number	Označení jednotlivých družic
PZ 90		Geografický referenční systém
TLM	Telemetry Word	Telemetrické slovo
TTC	Telemetry, Tracking and Command Stations	Telemetrické stanice v systému Galileo
UTC	Coordinated Universal Time	Koordinovaný světový čas
Uragan		Označení družic GLONASS
WAAS	Wide Area Augmentation System	Americký systém rozšiřující družicové navigační systémy
WGS 84	World Geodetic System	Geografický referenční systém

SEZNAM PŘÍLOH

A	Zapojení měřicího pracoviště	71
A.1	Měření signálu z družic.....	71
A.2	Měření signálu z generátoru Tabor WW1071	71
A.3	Program WiNRADiO G31DDC softwarového radia	72
B	Použité měřicí přístroje	72

A ZAPOJENÍ MĚŘICÍHO PRACOVNÍHO MÍSTĚ

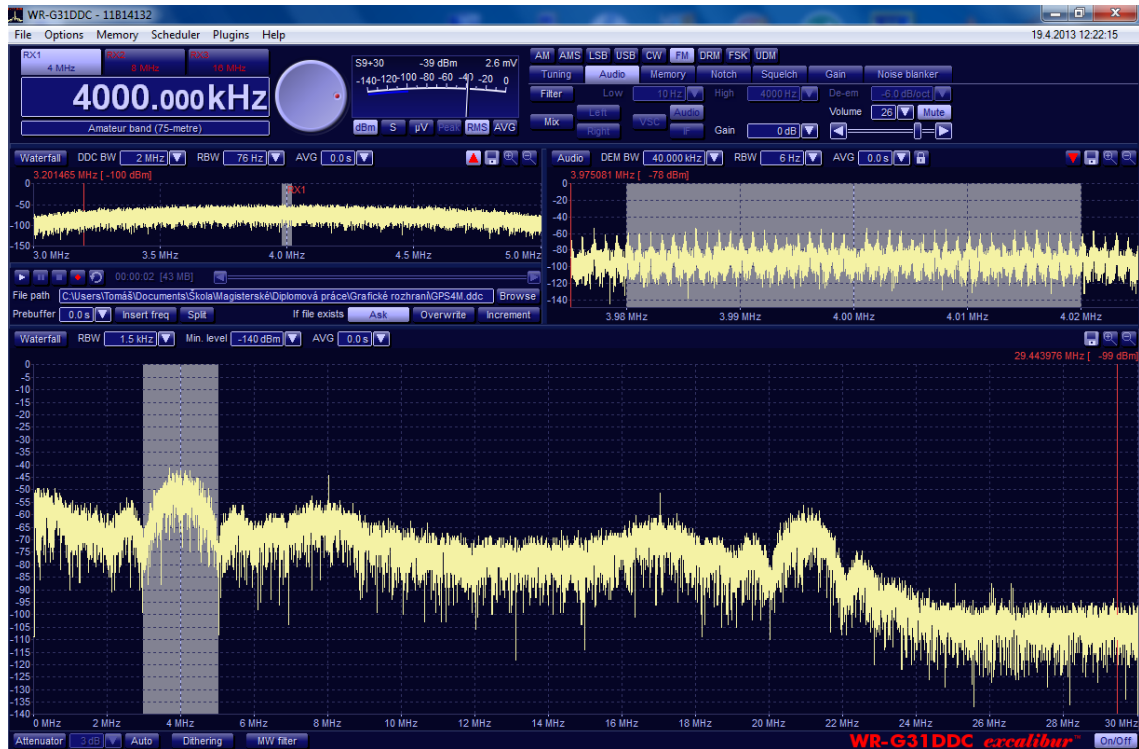
A.1 Měření signálu z družic



A.2 Měření signálu z generátoru Tabor WW1071



A.3 Program WiNRADiO G31DDC softwarového radia



B POUŽITÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE

- Low-Voltage GPS Antenna SM-19,
- Širokopásmový univerzální radiový přijímač AOR AR8600MK2,
- Softwarové radio WR-G31DDC Excalibur (SAP: 001000205778-0000),
- Arbitrární generátor Tabor WW1071 (SAP: 000000315455-0000),
- Stejnsměrný zdroj MATRIX MPS-3005D,
- 2x BNC kabel, 1x přechodka z BNC na SMA, 1x USB kabel.