

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA RADIOELEKTRONIKY



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Software pro analýzu měření GPS přijímače

Autor: Bc. František Jakš

Vedoucí práce: Doc. Dr. Ing. Pavel Kovář

Praha, 2014

Poděkování

Rád bych poděkoval Doc. Dr. Ing. Pavlu Kovářovi za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích během přípravy diplomové práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne 8. prosince 2014

František Jakš

Název práce: Software pro analýzu měření GPS přijímače

Autor: Bc. František Jakš

Katedra (ústav): Katedra radioelektroniky

Vedoucí diplomové práce: Doc. Dr. Ing. Pavel Kovář

E-mail vedoucího práce: kovar@fel.cvut.cz

Abstrakt Diplomová práce popisuje základní charakteristiky amerického družicového navigačního systému GPS. Obsahem se detailněji zaměřuje na vyhledávání a kanálové zpracování signálu. Praktická část je věnována popisu vnitřních stavů výukového GPS přijímače a implementaci software pro zpracování výstupních dat.

Klíčová slova: gps, doppler, bin, chip, pseudovzdálenost, matlab, java

Title: Software for GPS receiver measurement analysis

Author: Bc. František Jakš

Department: Department of Radio Engineering

Supervisor: Doc. Dr. Ing. Pavel Kovář

Supervisor's e-mail address: kovar@fel.cvut.cz

Abstract This thesis describes the basic characteristics of the American GPS satellite navigation system. The content focuses in detail on the signal search and signal channel processing. The practical part contains the internal state description of the educational GPS receiver and processing software implementation of output data.

Keywords: gps, doppler, bin, chip, pseudorange, matlab, java

Obsah

Abstrakt	iv
Zadání práce	v
1. GPS družicová navigace	1
1.1. Struktura systému GPS	2
1.1.1. Kosmický segment	2
1.1.2. Uživatelský segment	5
1.1.3. Řídicí segment	7
1.1.4. Družicové bloky	8
1.2. Signál GPS	8
1.2.1. C/A kód	10
1.2.2. P kód	11
1.2.3. C kód	11
1.2.4. M kód	12
1.2.5. Doplnkové signály	12
1.3. Navigační zpráva	13
1.3.1. Efemeridy	14
1.3.2. Almanach	14
1.3.3. Platnost almanachu	15
1.3.4. Korekce času	16
1.4. Vyhledávání signálu	16
1.4.1. Pseudovzdálenost	17
1.4.2. Dopplerův posun	17
1.4.3. Odhad parametrů kanálu	17
1.5. Výpočet polohy	19
1.5.1. Kódové měření	19
1.5.2. Fázové měření	23
1.5.3. Dopplerovské měření	24
1.6. Přesnost měření GPS a vlivy	24
1.6.1. Vícecestné šíření	25
1.6.2. Ionosférické zpoždění	26
1.6.3. Konstelace družic	26
1.6.4. Chyba dráhy družice	27
1.7. NMEA zprávy	28
1.8. Asistované polohové služby	29

1.8.1.	A-GPS	29
1.8.2.	Wi-Fi Positioning System	30
1.8.3.	DGPS	31
1.9.	Další navigační systémy	32
1.9.1.	Galileo	32
1.9.2.	Glonass	35
1.9.3.	Beidou/Compass	36
2.	GPS přijímač	37
2.1.	Popis hardware	37
2.1.1.	Odhad parametrů kanálu	38
2.1.2.	Synchronizace	39
2.1.3.	Zachycení	40
2.1.4.	Sledování	41
2.1.5.	Výpočet polohy	41
2.2.	Struktura dat	42
2.2.1.	Typy zpráv	43
2.2.2.	Struktura zpráv	45
2.3.	Implementace software	46
2.3.1.	Základní třídy	47
2.4.	Analýza vnitřních stavů GPS přijímače	49
2.4.1.	Výstup korelační E-L smyčky	49
2.4.2.	Měření odhadu parametrů kanálu	50
2.4.3.	Analýza pseudovzdálenosti	52
2.5.	Závěr	56
3.	Seznam zkratk	58
	Literatura	61
	Přílohy	I
	A. Obsah přiloženého CD	II
	B. Další proměnné	III

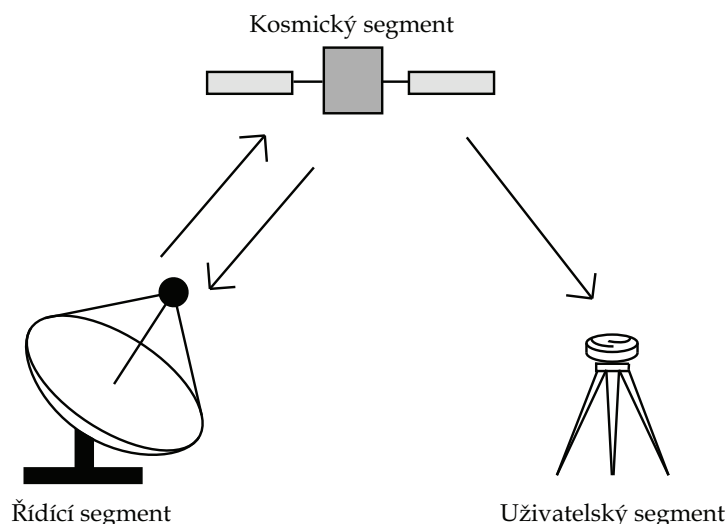
1. GPS družicová navigace

Nejznámějším a nejvyžívanějším navigačním systémem je v současné době bezesporu GPS (zkr. Global Positioning System). GPS (dříve také označován jako NAVSTAR GPS) je zařazen do kategorie družicových navigačních systémů GNSS (Global Navigation Satellite System), které ke své činnosti využívají soustavy družic na oběžných drahách kolem Země. Lze v podstatě říci, že se jedná o soustavu majáků s vhodnou konstelací pokrývající celou Zemi. Systémy družicové mají oproti pozemním tu výhodu, že při správné funkci jsou schopny zajistit určení polohy a přesného času na jakémkoli místě na Zemi. Systém byl vyvinut Ministerstvem obrany USA.

Primární funkce systému GPS tkví v měření vzdáleností mezi přijímací stanicí nacházející se zpravidla na zemském povrchu a množinou družic na oběžné dráze. Při výpočtu vzdálenosti se vychází ze znalosti zpoždění signálu, a také ze znalosti poloh družic na nebeské báni. Polohy vysílají samy družice ve formě datové navigační zprávy. Jednotlivé družice vysílají navigační signály, které se multiplexují metodikou rozprostřeného signálu tak, aby byl přijímač schopen rozeznat zdroj dat. Jedná se o přístup CDMA (Code Division Multiple Access), v němž si celistvý fungující systém vystačí s jedinou frekvencí.

Systém GPS se začal vyvíjet v 60. letech a zprvu byl zamýšlen pro vojenské účely. První satelit byl vypuštěn v roce 1978. Na svoje první válečné nasazení systém čekal až do roku 1990, kdy byl využit ve vojenských operacích v Perském zálivu. V průběhu let však našel uplatnění také v civilním sektoru, obzvláště po roce 2000, kdy byla z polohového signálu odebrána účelová chyba. GPS jako veřejná i komerční služba nabízí celou řadu výhod. Přístupovat k ní lze kdekoli na Zemi včetně přilehlého kosmického prostoru. Data potřebná pro výpočet polohy lze získat bezplatně a kdykoli během dne za jakéhokoli počasí. Na většině míst planety je vidět aspoň 8 družic, což výrazně zpřesňuje určení polohy (vyžadovány minimálně 4 družice).

Plná operační schopnost (FOC, Full Operational Capability) globálního polohového systému GPS byla vyhlášena 17. července 1995 po dosažení počtu 24 družic bloku II a IIA na oběžné dráze.



Obrázek 1.1.: Struktura systému GPS

1.1. Struktura systému GPS

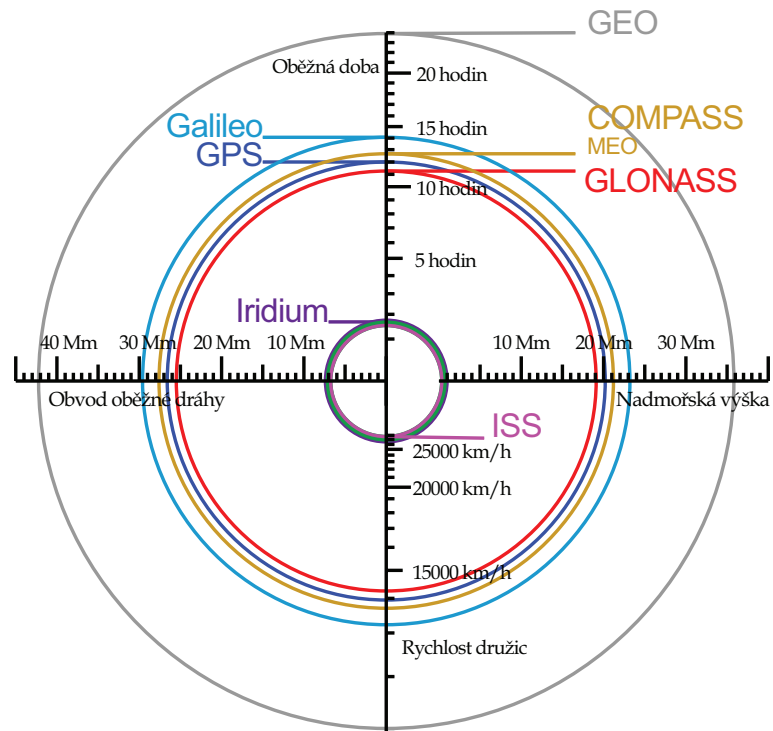
Každý GNSS systém je strukturalizován do třech částí: kosmický segment, řídicí segment a uživatelský segment.

1.1.1. Kosmický segment

V roce 2014 tvoří kosmický segment 32 družic, z toho 3 slouží jako záložní. Družice krouží na oběžné dráze MEO (Medium Earth Orbit) ve výšce zhruba 20 350 km. Vzhledem k tomu, že oběžné dráhy nejsou ryze kruhové, může se výška měnit až o sto kilometrů. Rychlost družic vychází ze zákonů mechaniky nebeských těles a udává se 3,8 km/s, což odpovídá době oběhu 11 h 58 minut (polovina siderického dne). Konstelace se sestává ze 6 oběžných drah skloněných vždy o 55 °. Pro zajištění správné činnosti v rámci kosmického segmentu každá družice přijímá a zpracovává data poslaná z pozemního řídicího centra. V některých případech je možné družici dočasně vyřadit z provozu, a s využitím datového kanálu provést korekci trajektorie setrvačného oběhu. Vnitřní stavy a zprávy o funkcionalitě se odesílají zpět na Zemi do řídicího centra.

Pro popis stavu kosmického segmentu jsou definovány dva stavy polohovací služby:

- Plná operační schopnost (FOC, Full Operational Capability) - nejméně 24 družic plně funkčních v rámci zaváděné technologie (poprvé 17. 6. 1995, Blok II a IIA)
- Částečná operační schopnost (IOC, Initial Operational Capability) - nejméně 18 družic plně funkčních v rámci zaváděné technologie (poprvé 8. 12. 1993, Blok I, II a IIA)

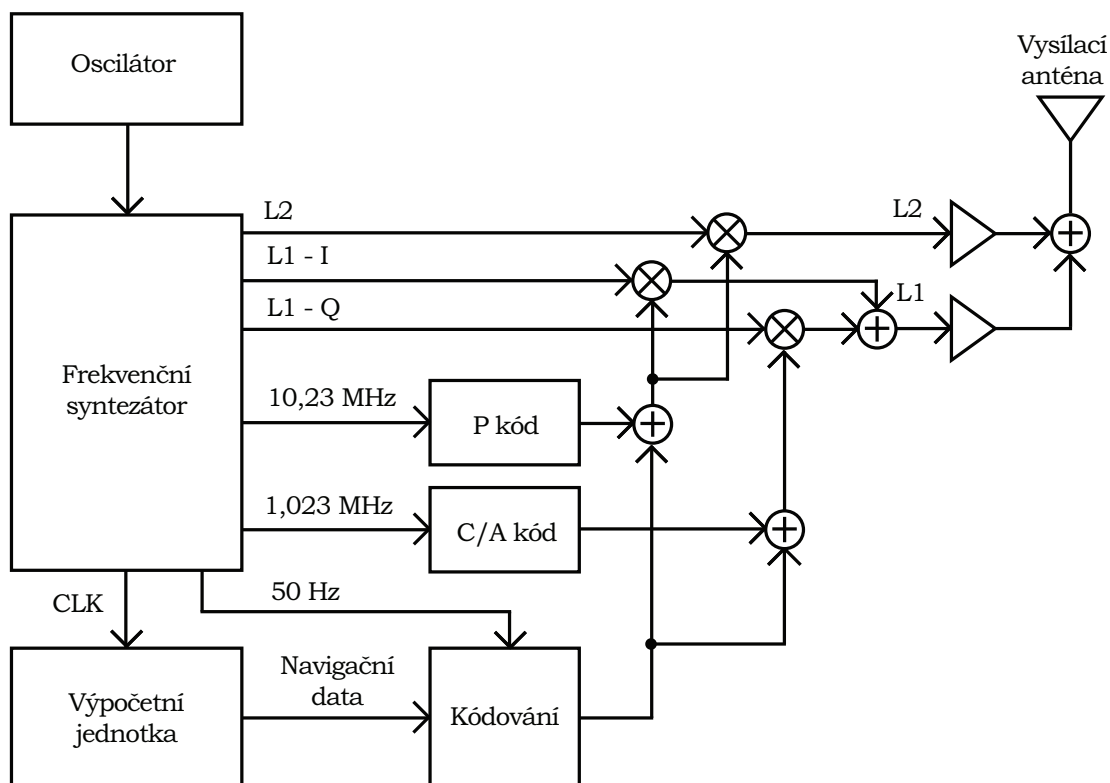


Obrázek 1.2.: Oběžné dráhy satelitů GNSS

Anatomie satelitu

Při návrhu technologií určených pro činnost v kosmu se kladou vysoké nároky na stabilitu, neboť jde o prostředí s mnoha proměnlivými faktory. Funkčnost systému ovlivňuje například velký rozsah teplot, dále kosmické záření aj. Deklarovaná životnost se pohybuje kolem 7,5 roku, skutečná však silně závisí na kvalitě technologického zpracování. Družice, která je součástí GNSS, se sestává například z těchto částí:

- dvojice solárních panelů – zdroj elektrické energie
- palubní baterie – zdroj energie ve chvíli, kdy Země vrhá na družici stín
- záložní zdroje
- anténa pro komunikaci s řídicími stanicemi na Zemi
- anténa pro vysílání navigačních zpráv
- infračervené senzory – vyhodnocují optimální natočení antén vůči Zemi nebo solárních panelů ke Slunci
- odrazové sklo pro laser – pro vysoce přesné měření pozice družice zpětným odražením laserového paprsku vyslaného ze Země



Obrázek 1.3.: Zjednodušené schéma družice vysílající v pásmech L1 a L2

- vyhřívání – dosažení pracovních teplot jednotlivých částí zařízení
- dvojice atomových hodin - vysoce přesné hodiny (princip atomové rezonance)
- výpočetní jednotka - generování navigačního signálu
- gyroskop – měření otáčení satelitu
- hlavní řídicí počítač

Přesnost odhadu polohy závisí na přesném čase. Tuto funkci zastávají atomové hodiny pracující na principu rezonance na atomární úrovni, čímž se dosahuje vysoké stability. Údaje o přesnosti často garantují 10^{-13} . Jedna biliontina sekundy nepřesnosti satelitních hodin by totiž v měřené dálce od přijímače k satelitu způsobila chybu 30 cm [5]. Nejčastěji se používají hodiny:

- cesiové (starší družice)
- rubidiové (chyba 3,6 ns za den)

Čas GPS

Čas GPS (GPST, GPS Time) je centralizován a seřizován hlavními kontrolními hodinami (Master Control Clock). Atomové hodiny jednotlivých družic jsou volnoběžné a do jejich činnosti se zpravidla nezasahuje. Prostřednictvím řídicího segmentu se údaj hodin koriguje v navigační zprávě tak, aby byly eliminovány veškeré odchylky kumulované od počátku jejich činnosti. Čas GPS je vyjádřen pořadovým číslem týdne od počátku epochy z půlnoci dne 6. 1. 1980 a počtem sekund od začátku GPS týdne. Vždy o půlnoci ze soboty na neděli času UTC se nuluje počet sekund a inkrementuje se počet GPS týdnů.

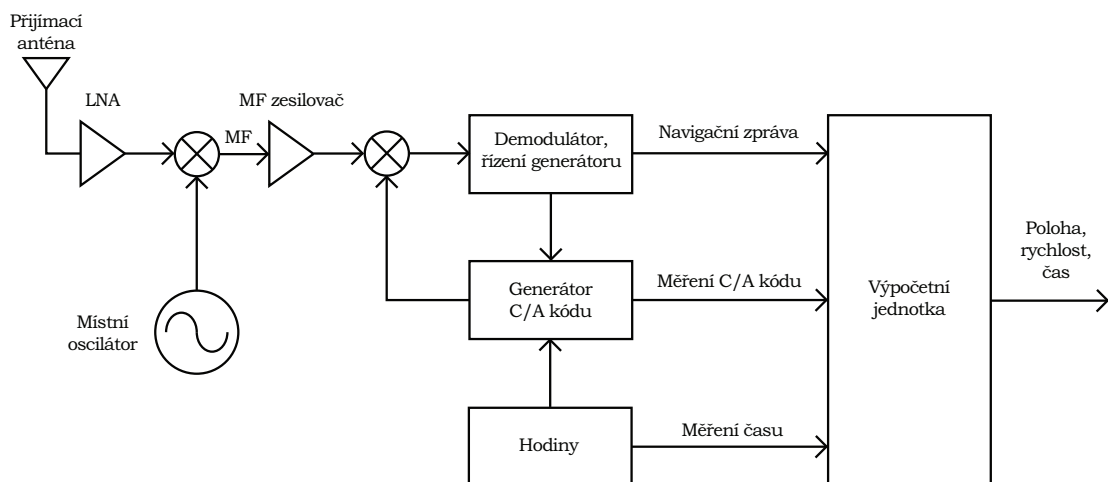
1.1.2. Uživatelský segment

Přijímač je zařízení pasivní, v kmitočtovém pásmu GPS nic nevysílá. Anténa GPS přijímače přijímá v reálném čase signály z více než jedné družice. O tom, jak se tyto signály zpracovávají, rozhoduje počet kanálů.

Přijímače jednokanálové přepínají jeden po druhém vstupní kanál pro jednotlivé družice. Měření provádějí postupně a pro zpracování kódu mají vyhrazen jen krátký časový úsek. Určení polohy se uskuteční nejdříve po zpracování poslední družice nutné pro výpočet polohy. Vzhledem k tomuto omezení a k již nižším cenám hardwaru není jednokanálový přístroj aktuální. Časově výhodnější volbu představují přijímače vícekanálové, u nichž se paralelně zpracovávají signály z více družic najednou. Mnohem vyšší přesnost zaručují například v rychle se pohybujících vozidlech, protože se celá sada dat zpracovává v reálném čase jednotlivě v rámci kanálů. Množství dostupných signálů je závislé na zeměpisné šířce a délce, dostačující počet kanálů v oblasti střední Evropy bude 12 [10]. Hybridní přijímače se technologicky pohybují mezi výše zmíněnými typy. Disponují omezeným počtem kanálů, přičemž každému je přidělena množina družic. Signály se postupně přepínají stejně jako v případě přijímače jednokanálového, avšak na jeden kanál připadá méně družic.

Anténa nadále zůstává jeho důležitou součástí. Její velikost a kvalita se odvíjí od účelu měření. Konstrukce odráží její výsledné parametry, jimiž mohou být například citlivost, odolnost proti rušivým signálům (interference, vícecestné šíření apod.), směrovost nebo poloha fázového středu (PCO, Phase Centre Offset). Prostorová poloha fázového středu není totožná pro obě frekvence L1, L2 a navíc se ještě mění v závislosti na elevačním úhlu a azimutu družice [11]. Geometrická vzdálenost přijímače a družice tedy není vztažena ke geometrickému středu antény.

Na základě znalosti tzv. Goldových posloupností se signál zpracovává metodou vzájemné korelace signálu na vstupu s replikou signálu. Korelační maxima jednak identifikují signál příslušné družice, dále slouží k určení zpoždění vůči replikám generovaným



Obrázek 1.4.: Blokové schéma GPS přijímače s kódovým zpracováním (C/A kód)

v přijímači. Vzhledem k tomu, že časová základna družic a přijímače není synchronní, vypočtené zpoždění určí tzv. pseudovzdálenost. Pojem pseudovzdálenost signalizuje, že pro určení přesné vzdálenosti je nutné doplnit další výpočty. Rovnice pro výpočet polohy se rozšiřují o rozdíl časové základny přijímače a družic, tedy o další proměnnou.

Při teoretickém určování polohy můžeme uvažovat ve dvou rovinách. Pokud chceme získat dvourozměrnou polohu (zeměpisná šířka a délka), potřebujeme pro výpočet signál počtu minimálně tří družic. K určení trojrozměrné polohy si výpočet vyžádá alespoň čtveřici družic. V tomto případě se vychází ze čtyř rovnic s proměnnými x , y , z a rozdílu časových základen Δt . Větší počet rovnic, tedy více různých signálů družic, dále ještě zpřesňuje tyto výpočty.

Rozprostírací kód slouží pro přesné měření zpoždění signálu, avšak komplikuje zachycení signálu. Po spuštění přijímače dochází po určité době k vyhledávání signálu. Faktory ovlivňující čekání na zachycení jsou:

- Kvalita (intenzita) signálu. V tomto směru záleží na parametrech antény a přijímací části bloku přijímače. Vlivem překážek, vegetace a mnohacestného šíření může docházet k zhoršení příjmu.
- Počáteční data. Pokudliže zná přijímač svou přibližnou polohu na začátku měření, může značně urychlit proces určení polohy.
- Paralelizace výpočtů. Moderní GNSS přijímače provádí paralelní vyhledávání signálu v rámci jednoho kanálu (družice) pro různé časové a kmitočtové posuvy.

Vzhledem k celé podstatě systému je GPS schopen obsloužit neomezený počet uživatelů.

GPS přijímače lze z hlediska svého technologického provedení rozdělit podle frekvence na:

- Jednofrekvenční. Přijímají pouze signály na nosné frekvenci L1.
- Dvoufrekvenční. Přijímají signály na obou frekvencích L1 a L2, přičemž mohou eliminovat systematické vlivy ionosféry.

Na základě kódového zpracování lze rozlišovat

- Přijímače založené na bezkódových metodách (tzv. squaring). Přijatý signál se násobí se sebou samým, čímž je odstraněna modulace $\pm\pi$. Výsledkem je demodulovaná vlna s poloviční periodou. Z této se odvodí sinový signál, který má poloviční vlnovou délku, než měl signál původní. V tomto případě se ztrácí informace o efemeridách [11].
- Přijímače s C/A kódem využívající korelační techniky, během které se porovnává přijatý signál s místní vygenerovanou replikou PRN kódu (C/A kód).
- Přijímače s C/A + P kódem. Obdobně jako v předchozím příkladu, ale s tím rozdílem, že se výpočet zpřesňuje zavedením informací o dekódovaném P kódu.

1.1.3. Řídicí segment

Dohled nad provozem obecně každého GNSS systému má segment řídicí, který si vyměňuje data s kosmickým segmentem. Skládá se z těchto částí [11]:

- Hlavní řídicí stanice (řízení a výpočty)
- Monitorovací stanice (získávání dat)
- Stanice pro komunikaci (nahrávání dat)

Sít stanic se rozprostírá po celé Zemi. Monitorovací stanice shromažďují veškerá data ze všech družic. Vybudovány byly například v lokalitě Tichého oceánu, Jižního Atlantiku, Indického oceánu ad. Data se následně odesílají do hlavní řídicí stanice¹. Tady se z dat vypočítá aktuální navigační zpráva včetně veškerých servisních dat a připojí se synchronizační parametry pro seřízení hodin družic. Nahrávací stanice poté odešlou nejnovější navigační zprávu do paměti všech družic. Řídicí segment provádí tyto úkony:

- Udržuje satelity na svých oběžných drahách zasláním příkazů k manévrování
- Zasílá synchronizační data do atomových hodin
- Získává data z celé sítě satelitů, vypočítává navigační zprávu
- Umožňuje přesun na nové oběžné dráhy v případě selhání dílčích družic

¹Hlavní řídicí stanice GPS se nachází na letecké základně v Colorado Springs v USA

Signály GPS	Bloky	Rok operační dostupnosti	Rok uvedení do plného provozu
C/A, P	I, II, IIA	1993	-
C/A, P(Y)	II, IIA	-	1995
C/A, P(Y), M, L2C	(IIA, IIR), IIR-M, IIF	2011	-
C/A, P(Y), M, L2C	(IIR), IIR-M, IIF, III	-	2016
C/A, P(Y), M, L2C, L5	(IIR, IIR-M), IIF, III	2015+	-
C/A, P(Y), M, L2C, L5	(IIR-M), IIF, III	-	2018+
C/A, P(Y), M, L2C, L5, L1C	(IIR-M, IIF), III	2018+	-
C/A, P(Y), M, L2C, L5, L1C	(IIF), III	-	2021+

Tabulka 1.1.: Postup modernizace družic GPS [4]

1.1.4. Družicové bloky

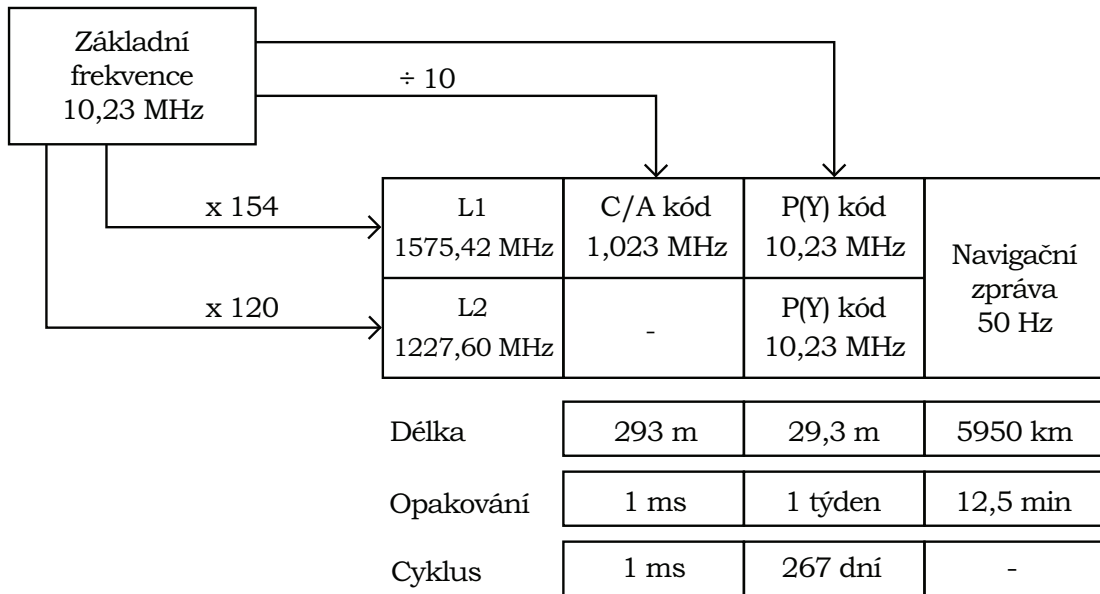
1.2. Signál GPS

Veškeré signály v GPS systému jsou kombinací nosné vlny, dálkoměrného kódu a navigační zprávy. Vysílají ve dvou pásmech, přičemž kmitočet každého z nich se odvozuje od základního 10,23 MHz. L1 vysílá na kmitočet 1575,42 MHz (10,23 MHz x 154) a L2 na 1227,60 MHz (10,23 MHz x 120).

Pro rozproštění jsou použity dva kódy. C/A (Coarse Acquisition) kód, který je veřejně známý a vysílá se pouze v pásmu L1. Fázově se moduluje s taktovacím kmitočtem 1,023 MHz. Kmitočet L1 se tedy rozprostírá v šířce pásma 2,046 MHz se středem v nosné 1575,42 MHz a je součástí tzv. Standardní polohovací služby (SPS, Standard Positioning Service).

V pásmu L1 i L2 je vysílán P-kód (Precision), který je oproti C/A kódu delší a pro měření tak dosahuje vyšší přesnosti. Každá družice vysílá vlastní kód. Sekvence P-kódu se fázově moduluje s taktovacím kmitočtem 10,23 MHz a opakuje se jednou za týden. Vysílání na dvou frekvencích umožňuje lepší odhad vlivu ionosféry na šíření signálu, čímž je dále dosaženo vyšší přesnosti měření. L2 kmitočet patří výhradně do Přesné polohovací služby (PPS, Precise Positioning Service) a vyžaduje speciální GPS přijímače.

Vysílané signály mají vzhledem k vzdálenosti přijímač-vysílač velmi malý výkon. Paradoxně GPS přijímače se navrhují tak, aby měly co nejmenší antény. Výkon na vstupu nízkošumového zesilovače antény se pohybuje zhruba kolem -160 dBW při vysílacím výkonu 0,5 kW. Vyhodnocení veškerých měření tedy často spočívá na statistickém zpra-



Obrázek 1.5.: Princip generování C/A a P(Y) signálů [5]

ování dat. Například při detekci fáze signálu se postupuje cestou její rekonstrukce z kódu.

Signály jsou modulovány na nosnou vlnu binárním fázovým klíčováním (BPSK, Binary Phase Shift Keying) tak, že při každé změně binárního čísla dat se fáze nosné změní o 180° . Signál lze popsat vztahem:

$$s_{L1} = A_P P(t) D(t) \cos(2\pi f_1 t + \phi) + A_C C(t) D(t) \sin(2\pi f_1 t + \phi) \quad (1.1)$$

$$s_{L2} = B_P P(t) D(t) \cos(2\pi f_2 t + \phi) \quad (1.2)$$

kde s_{L1} je signál na kmitočtu L1, s_{L2} je signál na kmitočtu L2, A_P amplituda P kódu, $P(t) = \pm 1$ reprezentuje fázi P kódu, $D(t) = \pm 1$ reprezentuje data, f_1 je L1 kmitočet, f_2 je L2 kmitočet, ϕ je počáteční fáze, A_C je amplituda C/A kódu, $C(t) = \pm 1$ reprezentuje fázi C/A kódu.

Typický GPS přijímač používá všesměrovou anténu pro příjem vln kruhově a pravotočivě polarizovaných. Předtím, než se signál ve směšovači přeloží do mezifrekvenčního pásma, projde pásmovým filtrem a LNA zesilovačem. Analogový signál je vzorkován a převeden na digitální soufázovou a kvadraturní složku (I a Q) násobením sinovým a kosinovým signálem generovaným lokálním oscilátorem.

1.2.1. C/A kód

Mezi tzv. pseudonáhodné (PN) sekvence patří Goldovy kódy. Své uplatnění nacházejí v systémech využívajících přenosové technologie rozprostřeného spektra. Signály jednotlivých družic lze snadno rozlišit na základě přiřazení unikátních PRN kódů, které jsou na straně přijímače předem známy. Ideální PN sekvence je ortogonální, má nulovou vzájemnou korelaci. Přenosový kanál vytvořený metodou rozprostřeného spektra umožňuje použití jedné frekvence, což zjednodušuje vstupní část uživatelského bloku.

Goldův kód je v signálu GPS reprezentován jako dálkoměrný C/A kód (Coarse Acquisition). Jedná se vlastně o pseudonáhodnou posloupnost 1023 nul a jedniček, která se svým charakterem blíží šumu (PRN kód), avšak s jednoznačnou definicí. Každá družice používá jiný kód, celkem 32 pro družice a 5 pro zvláštní užití. Spektrum datového signálu rozprostřeného C/A kódem má tvar funkce *sinc* s minimy v násobcích frekvence 1,023 MHz. Během korelace navigačního signálu s jeho replikou vytvořenou v přijímači je dobře patrné ostré korelační maximum. Naopak po korelaci přijatého signálu s replikou odpovídající signálu jiné družice se žádné maximum neobjeví. C/A kód je tedy charakteristický svým ostrým autokorelačním maximem a velmi nízkou vzájemnou korelací mezi jednotlivými C/A kódy příslušných družic. Generátor Goldových posloupností je veřejně dostupný.

Dálkoměrný C/A kód se kromě využití k vytvoření CDMA multiplexu používá k hrubému měření pseudovzdálenosti a není šifrován. Civilní sektor k němu má volný přístup. Vysílaný signál přenáší kód rychlostí 1,023 Mbit/s.

Goldovy posloupnosti v C/A kódech se generují binárním sčítáním dvou nezávislých, stejně dlouhých PN kódů G1 a G2., Kód G2 je pro daný dálkoměrný C/A kód zpožděn o určitou hodnotu k bitů. Každý dílčí kód se sestává z posuvného registru s R buňkami. Pro C/A kód je $R = 10$, délka kódu je dána předpisem:

$$L_{G1} = L_{G2} = 2^R - 1 = 2^{10} - 1 = 1023 \quad (1.3)$$

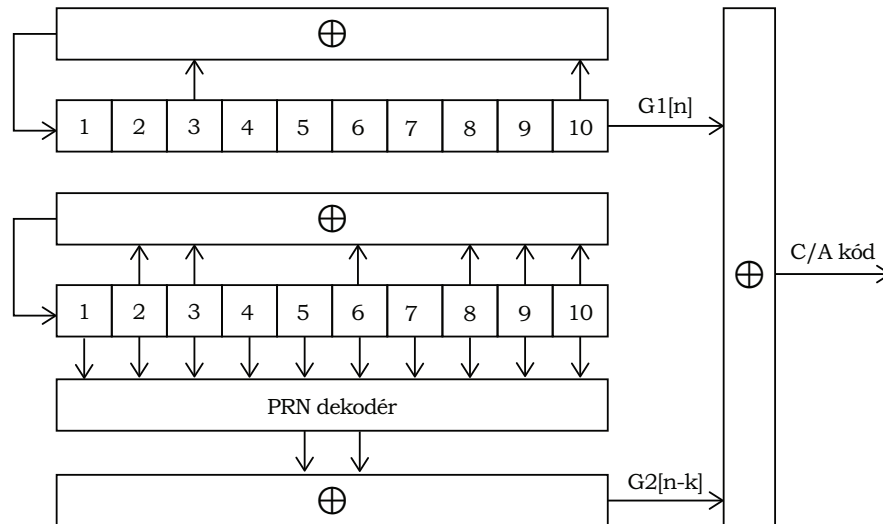
Generující polynom PN kódu G1 má tvar:

$$G1 = 1 + X^3 + X^{10} \quad (1.4)$$

Pro G2 má generující polynom tvar:

$$G2 = 1 + X^2 + X^3 + X^6 + X^8 + X^9 + X^{10} \quad (1.5)$$

Posloupnost G2 se zpožďuje o k bitů binárním součtem buněk posuvného registru generujícího polynom G2. Zpoždění G2 vzhledem k G1 a odpovídající buňky je dáno podle tabulky identifikačních čísel družic SVN (Space Vehicle Number). Posloupnosti



Obrázek 1.6.: Princip generování C/A kódu [12]

G1 a G2 se inicializují jedničkami.

1.2.2. P kód

Do prémiových služeb GPS (PPS, Precise Positioning Service) patří asymetricky šifrovaný P kód nesoucí označení P(Y) kód. Za jeho vznikem stojí vedle nabídky přesnějšího určování polohy také snaha o vyloučení spoofingu. Pojem spoofing popisuje situaci, kdy GPS přijímač zpracovává podvržený pozměněný signál a nikoli signál vysílaný z družic. Bez využití režimu antispoofingu by P kódu nebyla zaručena jeho autentičnost a integrita a klamavá data by tak mohla způsobit falešné určení polohy.

P(Y) kód moduluje oba kmitočty L1 a L2 a data přenáší rychlostí 10,23 Mbit/s. Jeho výhod mohou využívat pouze autorizovaní uživatelé, a to aplikováním W kódu, díky němuž dojde k dekódování P kódu. Charakteristika W a Y kódu podléhá vojenskému utajení. Autorizovanými uživateli se myslí především ozbrojené složky USA a jejich spojenci, v řadě případů se vojenské kódy propůjčují pro geodetické účely. Dekódování probíhá podle jednoduchého vztahu:

$$P = P(Y) \times W \quad (1.6)$$

1.2.3. C kód

V rámci zahájení provozu IIR-M bloku se v pásmu nosné L2 začal vysílat veřejný L2C signál. V porovnání s C/A dosahuje lepších vlastností z hlediska výpočtů polohy podle

SVN	k [bitů]	buňky G2	SVN	k [bitů]	buňky G2	SVN	k [bitů]	buňky G2
1	5	2 ⊕ 6	14	256	7 ⊕ 8	27	515	7 ⊕ 9
2	6	3 ⊕ 7	15	257	8 ⊕ 9	28	516	8 ⊕ 10
3	7	4 ⊕ 8	16	258	9 ⊕ 10	29	859	1 ⊕ 6
4	8	5 ⊕ 9	17	469	1 ⊕ 4	30	860	2 ⊕ 7
5	17	1 ⊕ 9	18	470	2 ⊕ 5	31	861	3 ⊕ 8
6	18	2 ⊕ 10	19	471	3 ⊕ 6	32	862	4 ⊕ 9
7	139	1 ⊕ 8	20	472	4 ⊕ 7	R-33	863	5 ⊕ 10
8	140	2 ⊕ 9	21	473	5 ⊕ 8	R-34	950	4 ⊕ 10
9	141	3 ⊕ 10	22	474	6 ⊕ 9	R-35	947	1 ⊕ 7
10	251	2 ⊕ 3	23	509	1 ⊕ 3	R-36	948	2 ⊕ 8
11	252	3 ⊕ 4	24	512	4 ⊕ 6	R-37	950	4 ⊕ 10
12	254	5 ⊕ 6	25	513	5 ⊕ 7			
13	255	6 ⊕ 7	26	514	6 ⊕ 8			

Tabulka 1.2.: Předpis pro generování jednotlivých C/A kódů [12]

kódu. L2C obsahuje dvě odlišné PRN sekvence: Civilian Moderate kód (tzv. CM), a Civilian Long kód (tzv. CL). Kód CM je 10 230 bitů dlouhý, opakující se každých 20 ms. Kód CL je 767 250 bitů dlouhý, opakující se každých 1 500 ms. Nevýhody L2C kódu ve srovnání s C/A jsou delší doba zachycení a větší ionosférická refrakce.

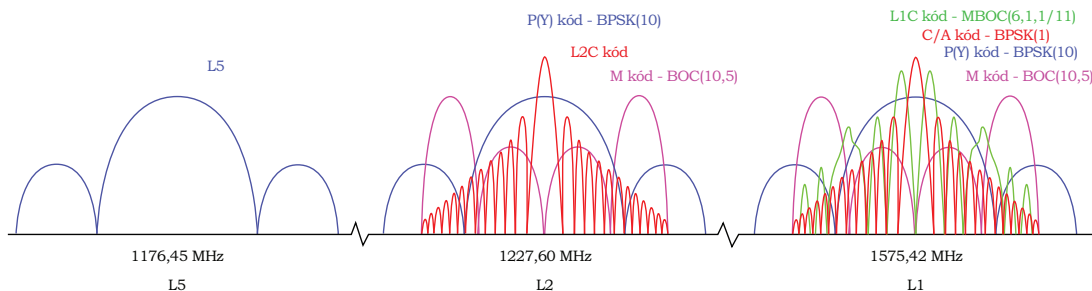
1.2.4. M kód

Po zahájení činnosti bloku IIR-M a novějších se spektrum služeb rozšiřuje o M kód (Military Code, L1M, L2M). Nahrazuje původní P(Y) kód a přináší mnohem lepší šifrování, které posiluje odolnost proti podvržení. Poradí si navíc se selektivitou příjmu. Na nepřátelském území může být k signálu z řídicího střediska odepřen přístup. Vysílá na kmitočtech L1 i L2 binárně modulovaný s vychýlenou nosnou (BOC, Binary Offset Carrier) a šířkou pásma 24 MHz.

1.2.5. Doplnkové signály

Vedle kmitočtů sloužících polohovacím službám družice vysílají i jiné nosné, a to jmenovitě L3 (1381,05 MHz) a L4 (1841,40 MHz). L3 se provozuje počínaje spuštěním bloku IIR a slouží pro monitorování startů balistických raket, detekci jaderných výbuchů a jiných vysokoenergetických zdrojů. Na frekvenci L4 jsou vysílána data pro korekci časového zpoždění vzniklého v ionosféře. Při porovnání měření na dvou kmitočtech lze toto zpoždění korigovat.

Kmitočet L5 (1176,45 MHz = 10,23 MHz x 115) se používá jako součást civilního záchranného systému a nese označení SoL (Safety of Life). Nosná se vysílá v pásmu



Obrázek 1.7.: Přehled frekvenčního spektra vybraných signálů GPS

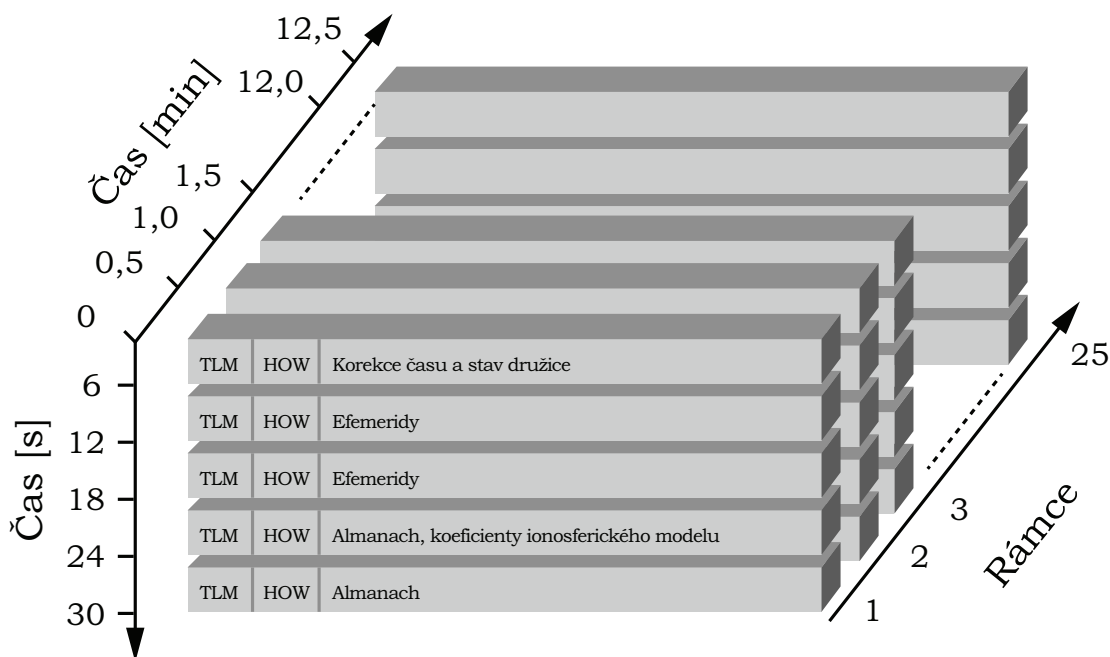
mezinárodně chráněné oblasti letecké navigace s předpokladem malého nebo žádného rušení. Ve spektru služeb GPS se SoL objevil vypuštěním družic bloku IIF.

1.3. Navigační zpráva

Aby bylo možné správně určit polohu uživatele, nelze si vystačit pouze se znalostí zpoždění signálu. K veškerým výpočtům se navíc přidává i informace o poloze družice v okamžiku vysílání dat. Tu lze určit využitím znalostí keplerovských parametrů oběžných drah, které jsou vysílány BPSK modulací signálu vysílaného družicemi ve formě datové relace. Jedná se o cyklicky se opakující navigační zprávu s datovou rychlostí 50 bitů za sekundu modulovanou na signál tak, že se binárně sčítá s dálkoměrným kódem.

Základní stavební jednotkou navigační zprávy je tzv. Rámec (Frame) o délce 1500 bitů, který se dále dělí na 5 podrámců (Subframe). Jednotlivé podrámcce tvoří slova složená z 30 bitů, z nichž šest posledních slouží k zabezpečení přenosu proti chybám. Aplikovaný Hammingův kód umožňuje detekovat nejvýše tři chyby, nebo dovoluje opravit nejvýše jednu chybu. Celý rámec se přenesení za 30 sekund. Navigační zpráva se skládá z 25 rámců, a proto její kompletní stažení skončí nejdříve za 12,5 minut. Rámce obsahují zejména tyto informace [16]:

- Podrámeček 1: čas vysílání počátku zprávy, korekce atomových hodin, stav družice
- Podrámeček 2: přesné keplerovské efemeridy družice – 1. část
- Podrámeček 3: přesné keplerovské efemeridy družice – 2. část
- Podrámeček 4: almanach, zdravotní stav družic 25 - 32, koeficienty ionosférického modelu
- Podrámeček 5: almanach, zdravotní stav družic 1 - 24



Obrázek 1.8.: Struktura navigační zprávy

Podrámce 1, 2 a 3 nesou v každém rámcí stejnou informaci, aktualizovanou vždy jednou po několika hodinách. Podrámce 4 a 5 přenesou v jednom rámcí vždy jen 1/25 dat, resp. stránku. Tyto stránky se aktualizují po několika dnech.

1.3.1. Efemeridy

Pro zjištění přesné polohy astronomických objektů v daném čase se používají tzv. dráhové efemeridy, které podávají informace o přesné krátkodobé předpovědi drah družic pro konkrétní čas. Každá družice vysílá svou vlastní sadu efemerid, a to každých 30 sekund rychlostí 50 bit/s. Příjímač musí jednotlivé efemeridy aktualizovat alespoň jednou za dvě hodiny. Jejich platnost je totiž nejvýše čtyři hodiny, do družic se přesto nahrávají v ještě kratším intervalu. Pakliže se příjímač uvede do provozu ještě v čase platnosti efemerid, nalezení polohy se provede mnohem rychleji. V opačném případě se doba pro první určení polohy (Time to First Fix, TTFF) prodlouží.

1.3.2. Almanach

Každá družice vysílá tzv. almanach, jehož obsahem jsou mimo jiné informace o polohách všech satelitů. Příjímač by na základě těchto informací měl být schopen přesně určit, které družice se aktuálně vyskytují v dohledu, a které se ještě skrývají za horizontem. Jednu z částí almanachu tvoří aktuální ionosférický model Země, neboť na

nepřesnostech při určování zpoždění signálu se ionosféra podílí největší měrou. Tato data se hodí především tehdy, když se neprovádí dvoufrekvenční měření, které by vliv ionosféry eliminovalo. Přesné koeficienty pro okamžitý přepočítání mezi časovou základnou UTC a systémem GPS jsou taktéž nedílnou součástí almanachu.

1.3.3. Platnost almanachu

Stažení kompletního almanachu o velikosti 37 500 bitů trvá při rychlosti 50 bit/s celých 12,5 minuty. Přijímač jeho data nemusí vůbec použít, případně využije jen jeho část, ale určení polohy nemusí být tak přesné.

Poté, co dojde k uvedení GPS přijímače do provozu, lze stanovit tři různé typy startů v závislosti na platnosti dat uložených v paměti z poslední relace.

Studený start (Cold Start, Factory)

Přijímač nemá k dispozici některý z těchto údajů:

- almanach
- přibližný čas (s chybou do cca 10 minut),
- přibližnou polohu (s chybou cca 500 - 1000 km).

Vyhledání signálu může při studeném startu trvat až několik minut. Přijímač nemá buďto vůbec žádné, nebo jen nedostatek informací pro vyhledávání signálů družic. Výpočetní část přechází do režimu náhodného hledání.

Teplý start (Warm Start, Normal)

Přijímač disponuje almanachem a přibližným časem nebo přibližnou polohou. Využitím platných dat o družicích nad obzorem lze vyhledat signály družic mnohem rychleji. Přesný výpočet polohy ale vyžaduje aktuálně platné efemeridy, které chybí. Doba TTFF se tudíž prodlouží o cca 30 - 60 sekund. Teplým startem zahajuje GPS přijímač svou činnost tehdy, pokud je vypnut déle než čtyři hodiny a méně než cca jeden rok.

Horký start (Hot Start, Standby)

Pakliže se přijímač spustí dříve, než za uplynutí doby 4 hodin, interval TTFF se zkrátí na zhruba jednotky až desítky sekund. Veškeré informace nutné pro výpočet polohy jsou platné, zůstává však podmínka znalosti efemerid alespoň 4 družic.

1.3.4. Korekce času

Časová základna UTC se v případě potřeby koriguje přestupnou sekundou (zpravidla 31. prosince nebo 30. června) proto, aby byl vyrovnáván časový rozdíl způsobený nepravidelnou rotací Země. Hodiny systému GPS musí být na základě této změny synchronizovány prostřednictvím úpravy korekčních dat, které jsou součástí navigační zprávy. Navigační zprávou se dále předávají údaje k přepočtu GPS času na čas UTC a případně eliminovat další rozdíly.

1.4. Vyhledávání signálu

Celkový algoritmus výpočtu polohy se skládá z následujících částí:

- generování repliky pseudonáhodné sekvence pro daný PRN kód
- výpočet pořadí PN sekvence v datovém bitu
- demodulace vstupního signálu
- synchronizace na kmitočet nosné (PLL)
- výpočet pseudozpoždění ze signálu z družice
- výpočet polohy přijímače
- převod mezi souřadnými soustavami (geodetická/kartézská)
- výpočet činitele DOP
- výběr čtyř družic s nejnižším činitelem DOP

Vygenerovaná replika pro daný PRN kód vstupuje v reálném čase do výpočtu křížové korelace s demodulovaným signálem na vstupu. Výpočet matematicky popisuje rovnice 1.7:

$$C_{ij}(\Delta t) = \frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} y_i(t)y_j(t + \Delta t)dt = \begin{cases} 1 & \text{pokud } \Delta t = 0 \\ 1 - \frac{|\Delta t|}{T} & \text{pokud } |\Delta t| \leq T \\ \approx 0 & \text{pokud } |\Delta t| > T \end{cases} \quad (1.7)$$

kde τ reprezentuje dobu integrace a y_i, y_j spojité funkce signálů.

1.4.1. Pseudovzdálenost

Při určování pseudovzdálenosti se vychází z modelů popsaných rovnicemi 1.8 a 1.9:

$$\text{L2: } \rho = R + c(\delta t_u - \delta t^s) + T + I_{\rho 2} + M_{\rho 2} + \epsilon_{\rho 2} \quad (1.8)$$

$$\text{L1: } \rho = R + c(\delta t_u - \delta t^s) + T + I_{\rho 1} + M_{\rho 1} + \epsilon_{\rho 1} \quad (1.9)$$

kde ρ je pseudovzdálenost na příslušném kmitočtu, R je geometrická vzdálenost od uživatele k satelitu, δt_u je chyba přijímače/uživatele, δt^s je chyba hodin satelitu, T reprezentuje vliv troposférického zpoždění, I reprezentuje vliv zpoždění v ionosféře, M zohledňuje vliv vícecestného šíření a ϵ je součet všech dalších chyb.

1.4.2. Dopplerův posun

Jak již bylo popsáno dříve, GPS signály ovlivňuje vzájemný pohyb družice-přijímač jak změnou zpoždění kódu, tak změnou kmitočtu nosné. Při generování navigační zprávy v délce trvání 12,5 minuty se zpoždění kódu mění a může se pohybovat v rozmezí 65 až 80 ms. Data pro výpočet velikosti posunu se objeví na výstupu smyček PLL nebo FLL, případně na výstupu kombinace obou. Z pohledu kmitočtové reprezentace signálu dochází ke změně nosné ve dvou případech (za předpokladu stacionárního přijímače):

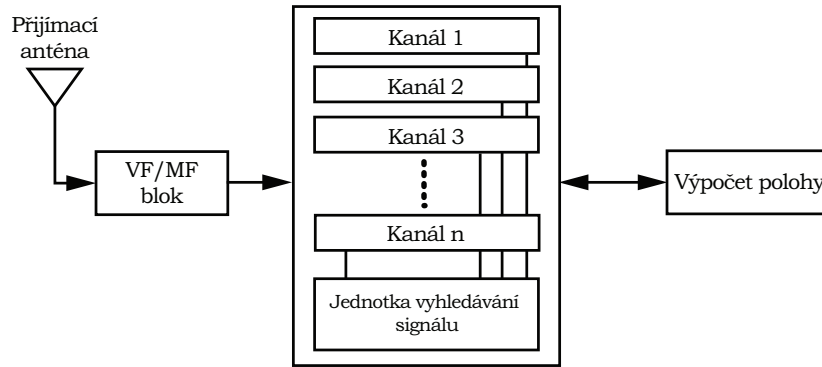
1. Dopplerův posun je kladný a dochází ke zvýšení kmitočtu (přibližující se družice)
2. Dopplerův posun je záporný a dochází ke snížení kmitočtu (vzdalující se družice)

Přesnou hodnotu Dopplerova kmitočtu lze odvodit ze vztahu:

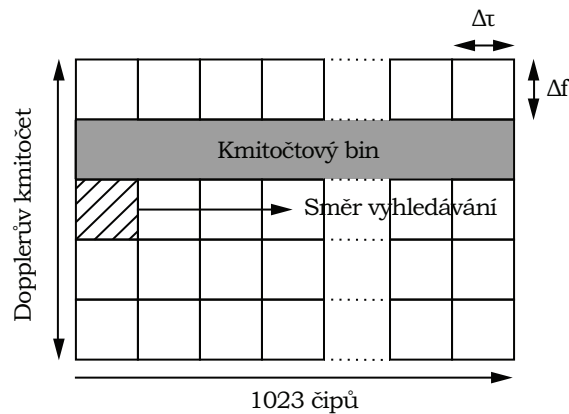
$$f_D = \frac{f \cdot v \cdot \cos\theta}{c} \quad (1.10)$$

1.4.3. Odhad parametrů kanálu

Jednou z hlavních úloh přijímače navigačního systému je přizpůsobení vyhledávacího algoritmu pro družicové signály. Konkrétně jde o jejich detekci na základě předpokládaných změn parametrů dat a nosné, jmenovitě zpoždění kódu a Dopplerův kmitočet. Proměnlivost těchto dvou neznámých způsobuje jednak vzájemná rychlost mezi přijímačem a družicí, a tím pádem změna vzdálenosti. Stanovením obou hodnot vzniknou počáteční podmínky pro algoritmy sledování družicového vysílání. Sledování je provedeno zavěšením zpětnovazebních obvodů poté, co byla s dostatečnou přesností nalezena zmíněná dvojice parametrů.



Obrázek 1.9.: Blokové schéma přijímače pro prohledávání kanálů



Obrázek 1.10.: Dvojdímenzionální vyhledávání signálu

Nalezení jejich správného odhadu probíhá tak, že se prohledává dvojrozměrný frekvenčně-kódový prostor (tzv. Signal Acquisition). Jedna buňka, resp. krok prohledávání, se označuje slovem bin. Fáze kódu se vyhledává přes celou periodu kódu, obvykle s krokem $1/2$ chipu (dáno tvarem autokorelační funkce C/A kódu). Označení čip nese jeden krok fáze kódu, perioda je 1023 čipů (C/A kód). Dopplerův kmitočet se vyhledává v symetrickém intervalu, který pokrývá rozsah radiálních rychlostí. Jejich velikost vychází ze součtu příspěvku pohybu družice po oběžné dráze a pohybu přijímače (vychází se z jeho předpokládané maximální rychlosti pohybu na zemi). Rychlost pohybu přijímače může zvýšit Dopplerův kmitočet natolik, že překročí technologicky daný rozsah. Sledování signálu se v tomto případě na daném kanále ukončí a spustí se synchronizace. Dopplerův posun se pohybuje zhruba v rozmezí -20 kHz až 20 kHz [8]. Kmitočtový rozsah synchronizačního bloku navíc ovlivňuje kvalita lokálního oscilátoru přijímače, který generuje repliku C/A kódu podle vstupních parametrů kódově-fázového prostoru.

Standardní rovnici popisující družicový signál je nutné doplnit o Dopplerův kmitočet f_d a zpoždění kódu τ . Signál na vstupu přijímače lze charakterizovat rovnicí v

následujícím tvaru:

$$s_{C/A} = A_C C(t - \tau) D(t - \tau) \sin(2\pi(f_1 + f_D)t + \phi) + w(t) \quad (1.11)$$

kde A_C je amplituda C/A kódu, $C(t - \tau)$ představuje C/A kód posunutý o čas τ , $D(t - \tau)$ představuje datovou zprávu posunutou o čas τ , f_1 je kmitočet L1, ϕ je počáteční fáze, $w(t)$ je aditivní šum.

Algoritmus prohledávání se opírá o korelační charakteristiky s využitím repliky signálu, tzn. kódu a nosné, přičemž se provádí korekce binů čipu a Dopplerova kmitočtu. Pakliže dojde k nalezení správného binu frekvenčně-kódového prostoru, korelační charakteristika dosáhne svého maxima. Korelaci hodnot popisuje následující rovnice:

$$R(\Delta\tau, \Delta f_D) = \frac{1}{N_T} \sum_{k=1}^{N_T} C(kT_s - \tau) C(kT_s - \tau) e^{j2\pi\Delta f_D kT_s} \quad (1.12)$$

Proces vyhledávání prochází všechny fáze kódu vždy pro jeden Dopplerův kmitočet, a to směrem od začátku kódu k jeho konci. V případě C/A kódu jde o celkem 1023 kroků. Velikost Dopplerova binu se definuje jako $2/(3T)$, kde T je doba integrace připadající na jednu buňku. Doba integrace se může pohybovat od časů kratších než 1 ms (zhruba 667 Hz šířky Dopplerova binu) až po časy delší než 10 ms (67 Hz šířky Dopplerova binu) v případě slabých signálů [7]. Je tedy zjevné, že delší doba integrace je podmínkou úspěšného vyhledání u signálů s malým odstupem signál-šum. Příčinou horšího příjmu mohou být kupříkladu budovy, zelený porost, interference aj.

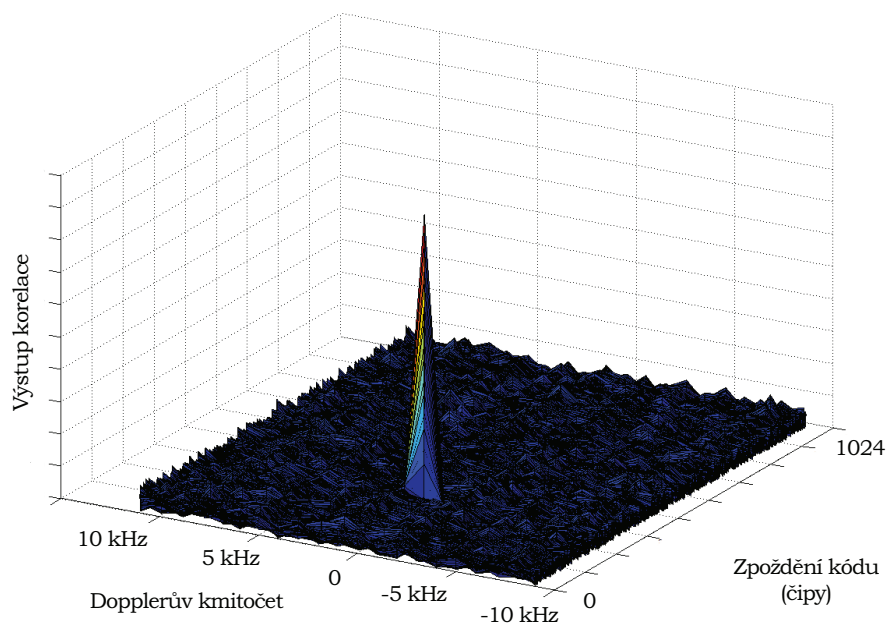
Během doby T se v rámci každé buňky integruje soufázová a kvadrurní složka signálu Q a I , a následně se spočítá obálka $\sqrt{I^2 + Q^2}$. Výsledná hodnota se porovnává s nastaveným prahem. S rozhodnutím o úspěšně nalezených parametrech signálu souvisí statistické metody, které mohou efektivně snížit riziko falešného zasynchronizování.

1.5. Výpočet polohy

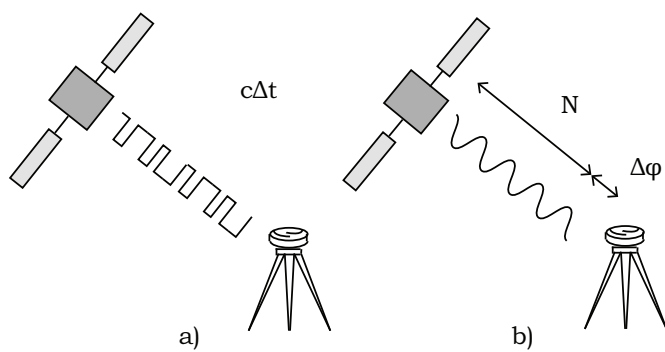
Při určování polohy GPS přijímače se vychází z měření vzdálenosti družice. Výsledkem je pak jejich geometrické protínání. V rovnicích se pracuje s tzv. pseudovzdáleností, kterou lze charakterizovat jako vzdálenost zatíženou mnoha chybami. Tu hlavní představuje nesynchronnost časových základů. Pro určení pseudovzdálenosti lze využít metody kódového nebo fázového měření.

1.5.1. Kódové měření

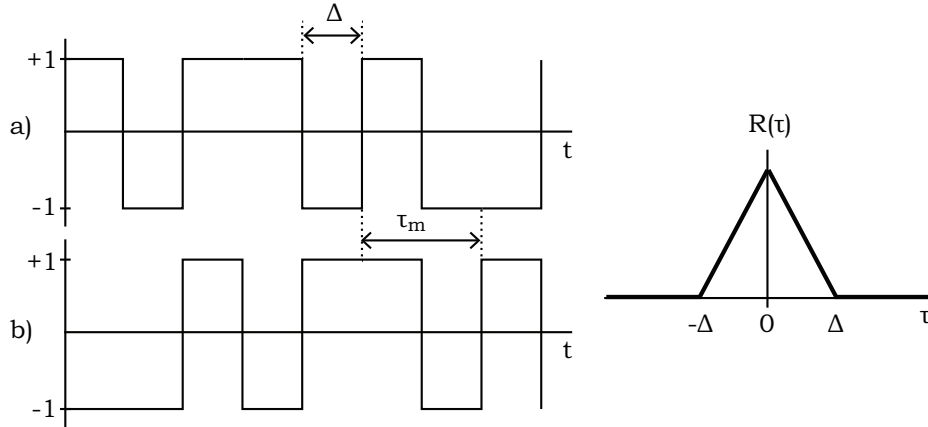
Vzdálenost mezi družicí a anténou GPS přijímače se měří na základě znalosti konečné rychlosti šíření elektromagnetického vlnění v prostoru. Ze změřeného času se poté jedno-



Obrázek 1.11.: Průběh korelace signálu při prohledávání frekvenčně-kódového prostoru



Obrázek 1.12.: Kódové a fázové měření pseudovzdálenosti



Obrázek 1.13.: Princip měření času příchodu signálu korelací repliky C/A kódu (a) a C/A kódu přijatého (b) viz. strana 5

duše určí pseudovzdálenost (metoda TOA, Time of Arrival). V GPS se pro toto měření používá pojem jednosměrný dálkoměr. Signál vysílaný příslušnou družicí se sestává z unikátních dat C/A nebo P kódu periodicky se opakujících, přičemž čas zahájení vysílání jedné sekvence je znám. Sám přijímač začne generovat repliku přijímaného kódu. Oba signály (přijatý a vygenerovaný) se v PPL bloku porovnají a zjistí se časový rozdíl, o který jsou identické signály posunuty. Ideální podmínky pro aplikaci metody TOA jsou:

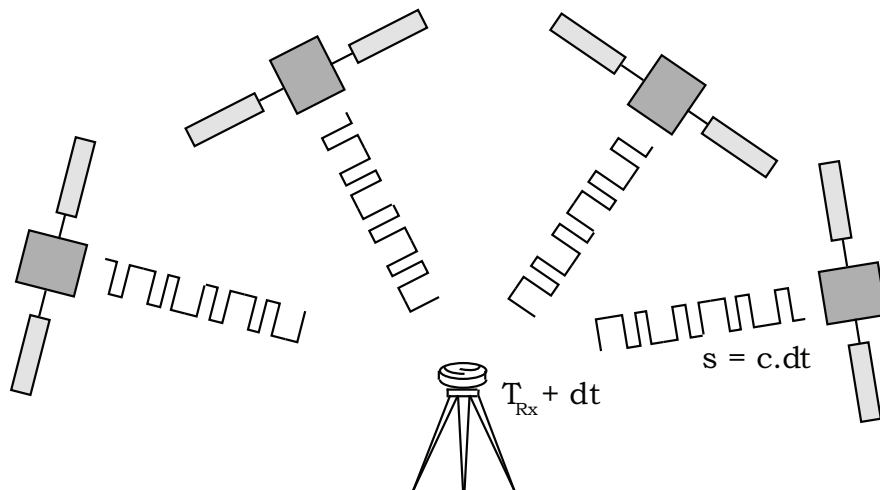
- Časy vysílače a přijímače jsou vzájemně synchronní s definovaným systémovým časem
- Poloha vysílačů (družic) je známa
- Rychlost šíření signálů prostředím je stejná
- Signál je přijímán na přímou viditelnost (LOS, Line of Sight)

Výpočet pseudovzdálenosti se pak řídí podle vztahu [5]:

$$D = c(t_{Rx} - t_{Tx}) = \rho + c\mathbf{dt} + \epsilon \quad (1.13)$$

kde D je měřená pseudovzdálenost, c rychlost světla, t_{Rx} přijímačem odečtený (odhadnutý) čas, t_{Tx} čas vyslání signálu (uvažován jako přesný), ρ geometrická vzdálenost přijímače a satelitu, \mathbf{dt} offset hodin přijímače a ϵ suma všech chyb.

C/A kód vysílá s periodou 1 ms a výpočtem lze snadno odvodit, že délka jeho elektromagnetické signálové reprezentace činí zhruba 300 km. Zavedením přibližných souřadnic přijímače s přesností řádově stovek kilometrů lze podstatně zjednodušit inicializační fázi měření. Přesnost určení pseudovzdáleností se obvykle pohybuje kolem 1 % délky mezi



Obrázek 1.14.: Určení pseudovzdálenosti z kódového měření

dvěma údaji kódu, závisí však také na odstupu signál/šum. U C/A kódu se jedná o přesnost 3 m. P kód vysílá v mnohem vyšším rozlišení (vyšší datový tok), čímž se při jeho zpracování sníží přesnost až na 0,3 m. Relativní přesnost obou druhů kódů však může dosahovat ještě lepších přesností.

Podmínkou pro zjištění aktuální polohy je znalost přesné pozice alespoň těch družic, které se vyskytují nad horizontem. Tyto souřadnice se nachází v efemeridách navigační zprávy. Tyto souřadnice jsou vztaheny k souřadnému systému ECEF WGS-84 (Earth Centered Earth Fixed, World Geodetic System 1984). Tento pravoúhlý souřadný systém byl definován na základě elipsoidu. Jeho tvar byl vybrán tak, aby co možná nejpřesněji kopíroval tvar Země. Do geometrického středu tohoto elipsoidu je umístěn počátek souřadné soustavy.

Určení polohy ze změřených pseudovzdáleností GPS družic vychází z řešení nelineární soustavy rovnic daných zápisem:

$$D_i = \sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2 + (z_i - z_p)^2} + ct_p \quad (1.14)$$

kde D_i odpovídá změřené pseudovzdálenosti, vektory (x_i, y_i, z_i) představují polohy jednotlivých družic v kartézské soustavě (vychází z efemerid). Vektor (x_p, y_p, z_p) je hledaná poloha, t_p je časová diference mezi časovou základnou přijímače a synchronní základnou družic. V rovnici se vyskytují čtyři neznámé: x_p , y_p , z_p a t_p . Pro jejich určení musí výpočet vycházet alespoň ze soustavy čtyř rovnic:

$$D_1 = \sqrt{(x_1 - x_p)^2 + (y_1 - y_p)^2 + (z_1 - z_p)^2} + ct_p$$

$$D_2 = \sqrt{(x_2 - x_p)^2 + (y_2 - y_p)^2 + (z_2 - z_p)^2} + ct_p$$

$$D_3 = \sqrt{(x_3 - x_p)^2 + (y_3 - y_p)^2 + (z_3 - z_p)^2} + ct_p$$

$$D_4 = \sqrt{(x_4 - x_p)^2 + (y_4 - y_p)^2 + (z_4 - z_p)^2} + ct_p$$

Pro řešení této nelineární soustavy je možné využít několik způsobů. Jedním z nich je rozvoj Taylorovy řady pro vhodně zvolený přibližný odhad řešení. Taylorův rozvoj lze matematicky vyjádřit takto:

$$\hat{D}_i = \sqrt{(x_i - \hat{x}_p)^2 + (y_i - \hat{y}_p)^2 + (z_i - \hat{z}_p)^2} + \hat{c}t_p \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, 4 \quad (1.15)$$

Vypočtená poloha je vztažena k systému ECEF, přičemž se následně převede do běžných zeměpisných souřadnic (zeměpisná šířka a zeměpisná výška). Třetí souřadnicí je výška reprezentovaná jako vzdálenost od povrchu referenčního elipsoidu.

1.5.2. Fázové měření

Po odstranění PRN kódu přijatý signál obsahuje ještě navigační zprávu. Takto se získá nosná vlna, která je vlivem pohybu družice dopplerovsky posunuta a kterou lze využít k fázovým měřením.

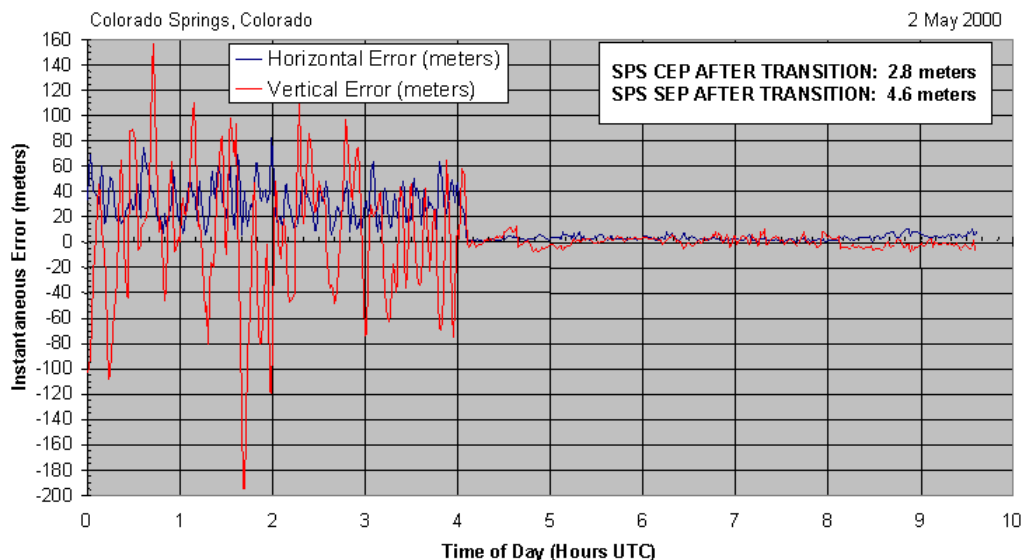
Zejména v geodetických GPS přijímačích se lze setkat s výpočtem polohy na základě měření fáze signálu. Jde vesměs o příjem a zpracování fázových doměrek přímo na nosných vlnách signálů GPS. Snadno lze touto metodou změřit, v jaké fázi signál dorazil. Přijímač dokáže velice přesně určit desetinnou část vlny v rozmezí $0^\circ - 360^\circ$. U klasické sinusovky však nelze určit čas jejího odeslání, jak je to možné v případě dálkoměrných kódů. Signál navíc neříká nic o tom, kolik celých vln (ambiguit) předcházelo na celé vzdálenosti od družice. Ambiguita je definována jako celočíselná část počtu period nosné vlny, odpovídajících zdánlivé vzdálenosti mezi družicí GNSS a přijímačem [15]. Správné určení ambiguit společně s fázovým doměrkem tvoří základ pro fázové měření.

Určení celočíselné nejednoznačnosti se věnuje celá řada postupů. Jakmile se podaří určit počáteční hodnotu celočíselné nejednoznačnosti, následující sled fázových posunů již podává jasnou informaci o počtu celých vln. Přijímač určí velikost počáteční celočíselné nejednoznačnosti a k ní připočte celý počet vlnových délek, o které se změnila vzdálenost družice-přijímač od zahájení měření, a dále desetinou část vlnové délky.

Pokud během měření dojde k zastínění družice, dojde k fázovému skoku, přijímač oznámí chybu a zahájí nové měření.



SA Transition -- 2 May 2000



Obrázek 1.15.: Záznam odchylek určení polohy v okamžik vypnutí SA [1]

1.5.3. Dopplerovské měření

Z vlastností elektromagnetického vlnění je všeobecně známa souvislost mezi rychlostí zdroje vlnění a změnou jeho základního kmitočtu. Změny kmitočtu nosné vyslané pohybuující se družicí lze využít také při zjišťování radiální vzdálenosti družice-přijímač, a to opakovaným měřením mezi dvěma časovými značkami. Z rozdílů těchto vzdáleností lze trojrozměrnou polohu přijímače vypočítat. Toto měření se dříve používalo spíše pro zjištění rychlosti přijímače [16]. Navigační systémy pracující na principu Dopplerova posunu se využívaly především v oblasti námořní navigace.

1.6. Přesnost měření GPS a vlivy

Největší vliv na zhoršenou přesnost určení polohy mělo záměrně zavedené omezení označované jako Selective Availability (SA). Aktivní bylo v období leden 1994 - 2. května 2000 [11]. Plná přesnost byla původně zamýšlena pouze pro armádní účely a polohu bylo z veřejně dostupného přijímače možno určit s přesností na několik stovek metrů. Blokovací mechanismus byl odpojen počínaje 2. květnem roku 2000 [6], přičemž přesnost se zlepšila skokově během sekundy do řádu jednotek metrů.

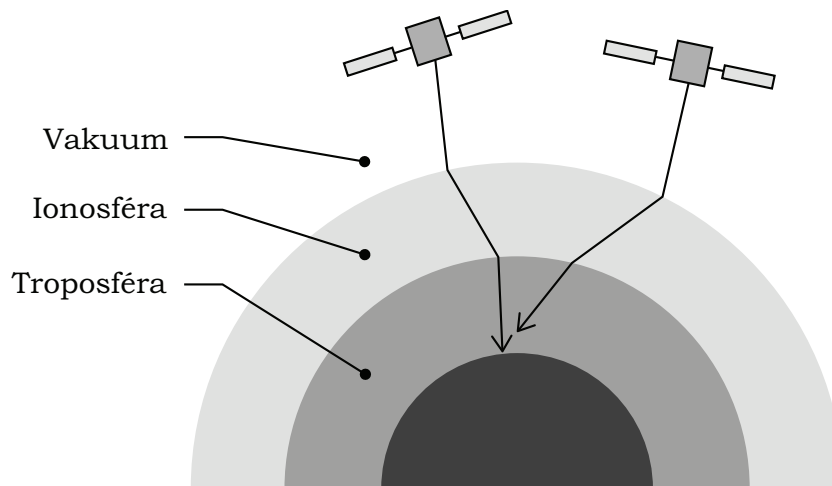
Odchytky určování polohy mohou být způsobeny především následujícími vlivy:

- zpoždění signálu v ionosféře (ionosféra způsobuje zakřivení dráhy signálu)
- chyby v určení polohy družice
- nepřesnost hodin umístěných na družici (vč. relativistických efektů)
- vícecestné šíření
- vlastní šum přijímače
- šum na straně vysílače (družice)
- konstelace družic
- sluneční aktivita
- typ a kvalita antény přijímače, úhlová viditelnost
- pohyb přijímače (statický, dynamický)
- doba pozorování
- záměrné rušení (např. NAVWAR – vypnutí SPS)

1.6.1. Vícecestné šíření

Odražené signály se velkou měrou podílejí na zhoršení přesnosti zaměření, obzvláště v zastavěném území nebo v lese. Vícenásobně odražený signál se stává zdrojem náhodných chyb (Multipath Error), které se velmi obtížně odstraňují nebo potlačují. Anténa přijímače v zásadě přijme dva signály: přímý a odražený. Interference obou signálů způsobuje chybné určení pseudovzdálenosti.

Mnohem větší chyby měření vznikají během kódového měření (chyba až 50 m) ve srovnání s měřením fázovým (chyba až 5 cm) [11]. Míra zavedení odchytky závisí na časovém rozlišení přijímače, resp. na časovém úseku, v němž je výpočetní část schopna zpracovat přijatý signál. Čím rychlejší je v tomto směru přijímač, tím přesnější bude určení polohy. V celé řadě hardwarových řešení se využívají tzv. choke-ring antény, usazené v masivních tlumících prstencích. Svojí konstrukcí přispívají k potlačení vícecestného šíření především při realizaci referenčních GNSS systémů a geodetických činnostech.



Obrázek 1.16.: Vliv ionosféry na šíření signálů z družic

1.6.2. Ionosférické zpoždění

Průchod signálů vrstvou ionosféry Země způsobuje systémům pro určování polohy relativně velké problémy. Spodní okraj začíná (ve dne) ve výšce zhruba 60 kilometrů a končí mezi 700 a 1000 kilometry. Volně elektricky nabitě částice mění svůj charakter, vznikají a zanikají v rámci celé vrstvy cyklicky během 24 hodin podle aktuálního vlivu slunečního záření. Rychlost šíření elektromagnetického vlnění závisí na počtu volných elektronů, což mění i hodnotu indexu lomu. Největší korekce se tudíž u systému GPS očekávají v místech, kde je právě den. Bez korekcí může v denní době dojít k odchylce desítek metrů, v noci přes deset metrů. Model ionosféry obsažený v navigační zprávě slouží pro přepočítání ovlivněných naměřených hodnot. Jak již bylo vysvětleno dříve, minimalizace vlivu ionosféry lze dosáhnout využitím obou signálů L1 a L2.

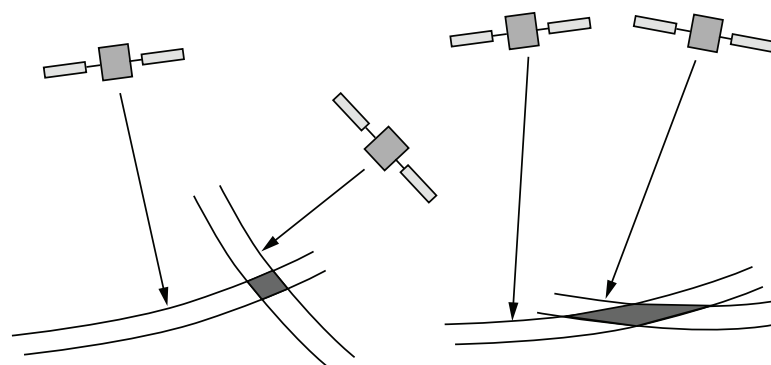
1.6.3. Konstelace družic

Nezanedbatelný vliv na přesnost určení polohy má aktuální rozmístění družic na nebeské báni nad místem příjmu. Konfigurace družic ovlivňuje úhel, pod kterým se přímky vzdáleností protnou. Pro účely číselného vyjádření tohoto vlivu se používá GDOP (Geometrický DOP).

Čím menší je velikost GDOP, tím lepší odhad polohy je schopen GPS přijímač určit. Zmenšení GDOP lze docílit zahrnutím dalšího sledovaného satelitu do výpočtů. Minimální hodnota GDOP se rovná jedné.

GDOP se sestává z jednotlivých složek:

- PDOP – polohová – vliv na určení polohy v prostoru
- HDOP – horizontální – vliv na určení horizontální polohy



Obrázek 1.17.: Ukázka řezu objemem vymezeným kulovými plochami signálu při dobré (vlevo) a špatné (vpravo) konstelaci družic

- VDOP – vertikální – vliv na určení výšky
- TDOP – časová – vliv na určení korekce času

Vliv zhoršení lze demonstrovat na vztahu:

$$M_x = DOP \cdot M_0 \quad (1.16)$$

kde M_0 je střední chyba určení polohy závislá na přesnostech určení fází a pseudo-vzdáleností, M_x je střední chyba zahrnující vliv konfigurace družic.

Přesnost určení pseudovzdálenosti je ovlivněna elevačním úhlem družice vzhledem k rovině horizontu. Při malých elevačních úhlech prochází signál vrstvami atmosféry v relativně dlouhém úseku své cesty. Typicky nejnižší hodnota elevačního úhlu, pod kterým se signály daných družic již nezahrnují do výpočtů, je 5° . Toto omezení se zavádí v rámci tzv. elevační masky.

Pro GDOP byla stanovena přehledová tabulka, která klasifikuje jednotlivé rozmezí hodnot. Nejhorší výsledky měření vznikají při hodnotách GDOP větších než 20. Naopak nejlepších výsledků v konfiguraci 4 satelitů je dosaženo tehdy, když jedna z družic se nachází v zenitu a ostatní rovnoměrně rozmístěny v azimutu (např. 3 družice = 120°) s minimální elevací ($15^\circ - 20^\circ$) [16].

1.6.4. Chyba dráhy družice

Znalost přesnosti pozice družice je dalším z faktorů, který ovlivňuje přesnost výpočtu. Dráhy družic jsou průběžně monitorovány z několika monitorovacích stanic rozmístěných po celém světě. Jejich předpovědi drah jsou přenášeny na satelity a odtud zase zpátky na Zem do GPS přijímačů. Zkušenosti ukazují, že přesnost předpovědi dráhy (orbitu) je řádově několik metrů. Toto může způsobit chybu v určení polohy několik

metrů [5].

1.7. NMEA zprávy

Ze skupiny formátů přenosu GNSS dat je nejvýznamnější protokol NMEA, který vznikl ve stejnojmenné asociaci (National Marine Electronics Association). Protokol NMEA-0183 standardizuje sériovou komunikaci mezi GPS přijímačem a výpočetní technikou. Komunikace probíhá pomocí textových vět v řádku s pevně danou strukturou.

Větný rámec začíná znakem \$ (dolar). Následuje dvojpísmenná zkratka zařízení a třípísmenný kód určující formát zprávy. Jednotlivá data obsahu zprávy se oddělují čárkou. Věta končí sekvencí <CR><LF>, případně hvězdičkou následovanou kontrolním součtem. Kontrolní součet je vyjádřen jako hexadecimální hodnota výsledku logické operace XOR. Délka řádku nesmí mít jiné než ASCII znaky a jejich počet nesmí být více jak 80. V případě, že některá z dat věty nejsou k dispozici, pole zůstává nevyplněné, přesto oddělovací čárky zůstávají. Obecný formát ze strany mluvčího je:

```
$tsss,d1,d2,...<CR><LF>
```

Z celé množiny definovaných vět jsou nejvýznamnější tyto:

RMC věta

Doporučené minimum dat (RMC, Recommended Minimum Specific GPS/Transit Data)

```
$GPRMC,181038.0,A,5006.3171,N,01425.6622,E,0.00,  
42.00,150606,,*37
```

Aktuální čas v UTC, aktuální souřadnice, status varování získaný z navigační zprávy, aktuální rychlost v rovině (v uzlech), kurz pohybu ve stupních, aktuální datum a magnetická deklinace ve stupních.

GGA věta

Informace o globální poloze

```
$GPGGA,161016.000,5005.0334,N,01430.3369,E,1,  
06,2.1,242.9,M,45.5,M,0000*5C
```

Čas UTC, ve kterém byla vypočtena poloha, souřadnice polohy, identifikátor kvality příjmu, počet použitých družic pro výpočet, HDOP, geodetická výška včetně jednotek, výška nad elipsoidem WGS84, čas od poslední aktualizace DGPS, identifikátor DGPS.

GSV věta

Informace o počtu viditelných družic z aktuální polohy a informace o každé viditelné družici

```
$GPGSA,A,3,26,08,18,29,28,09,,,,,,,,,2.9,2.1,1.9*3F
```

Počet viditelných družic z aktuální polohy, informace o každé viditelné družici (identifikační číslo družice PRN, úhlová výška ve stupních, azimut polohy družice, odstup signálu od šumu v dB). Věta GSV může být rozdělena do několika separátních vět, aby nebyl překročen limit znaků. Pro tyto případy věta obsahuje údaje o celkovém počtu dílčích vět včetně jejich pořadí.

Vedle výše uvedených vět ze strany mluvčího (Talker Sentences) lze při programování používat vlastní věty (Proprietary Sentences). Pro ně existuje speciální větný rámec, v němž se na začátku uvádí třípísmenný identifikátor výrobce. Existují i tzv. dotazovací věty (Query Sentences), v nichž může posluchač zažádat mluvčího o zaslání konkrétní věty.

Vybraný záznam:

```
$GPGSA,A,3,06,03,25,19,16,,,,,,,,,7.6,6.5,3.9*37
$GPGSV,3,1,12,06,61,291,31,16,58,209,22,21,57,
066,14,18,48,121,*73
$GPGSV,3,2,12,03,47,291,37,22,30,164,,19,15,286,
27,25,14,303,31*70
$GPGSV,3,3,12,24,12,059,,07,12,322,20,15,08,
061,,26,08,043,*76
$GPRMC,122036.000,A,5006.1739,N,01423.5946,E,
0.19,264.58,091208,,*05
$GPGGA,122037.000,5006.1737,N,01423.5935,E,
1,05,6.5,244.8,M,45.5,M,0000*5E
```

Určení aktuální polohy pro vybraný záznam:

```
$GPGGA,122037.000,5006.1737,N,01423.5935,E,1,05,6.5,244.8,M,45.5,M,0000*5E
```

Zeměpisná šířka: 5006,1737 severní šířky $\Rightarrow 50^{\circ} 6,1737' N = 50^{\circ} 6' 10,42'' N$

Zeměpisná délka: 01423,5935 východní délky $\Rightarrow 14^{\circ} 23,5935' E = 14^{\circ} 23' 35,61'' E$

Nadmořská výška: 244,8 m

1.8. Asistované polohové služby

1.8.1. A-GPS

Systém GPS pracuje na principu jednosměrného vysílání dálkoměrných signálů a dalších polohových dat. S postupným rozvojem mobilních datových sítí se otevřel nový a

mnohem rychlejší informační kanál podporující určování polohy GPS. Integrace GPS a GSM/data čipu do mobilních zařízení byla předpokladem pro vzniku služby A-GPS (Assisted GPS), která družicový systém podporuje v následujícím:

Mobile Station Based (MSB)

Namísto zdlouhavého odposlechu GPS dat z družic (almanach, dráhové efemeridy) se data zašlou prostřednictvím internetu z asistenčního serveru. Nová sada dat se stáhne buďto manuálně, a nebo automaticky po uplynutí její platnosti. Studený start přijímače, který si almanach dodaný kanálem A-GPS stáhne, potrvá zlomek času² ve srovnání se standardním datovým přenosem ze satelitů³. Data v rádech několika kilobajtů se přenáší v rámci tzv. mobilního připojení operátora, u něhož musí mít uživatel aktivní příslušný datový tarif. Životnost dat se obvykle pohybuje v délce trvání 7 dní.

Mobile Station Assisted (MSA)

Výpočet polohy z naměřených hodnot může být proveden vzdáleně na výkonných serverech. Nezpracovaná data se odešlou přes mobilní síť do výpočetního centra. Tato metoda se využívá u přenosných zařízení, u nichž je vyžadována co nejmenší spotřeba.

A-GPS razantně zkracuje dobu TTFF. Především v hustě zastavěných městech, kde je příjem ztížen vlivem vícecestného šíření, mohou podpůrná data usnadnit lokalizaci přijímače. Kvůli špatnému signálu může docházet ke stavům, kdy data z družic nelze správně dekodovat.

1.8.2. Wi-Fi Positioning System

Mobilní síť mohou někteří poskytovatelé polohovacích služeb (např. společnosti Google a Apple) použít k výměně tzv. crowdsourcovaných informací o Wi-Fi sítích, které se nacházejí v dosahu zařízení. V dotazu na polohu se odesílá seznam těchto Wi-Fi sítí bez ohledu na to, jestli se k nim zařízení připojilo, nebo ne. Součástí anonymní a šifrované zprávy je MAC adresa, SSID (Service Set Identifier) a intenzita signálu Wi-Fi routeru. Služba porovná údaje se záznamy ve své databázi a pokusí se polohu určit. Navíc, pokud zařízení, kterému byla určena přesná poloha, odeslalo data o Wi-Fi síti, která dosud nejsou v záznamech, uloží se do databáze včetně údajů o geografické poloze.

U tohoto systému však nelze polohu zaručit. Výpočet je zatížen celým množstvím proměnlivých veličin. Přesnost určení polohy mohou ovlivnit nepřesné informace o poloze Wi-Fi routerů, počet aktuálně vysílajících, změna SSID apod.

²Rychlost závisí na aktuální přenosové rychlosti mobilního připojení operátora.

³Přenosová rychlost 50 b/s (almanach stažen za 12,5 min)

Tato služba se stala terčem kritiky v oblasti ochrany soukromí, neboť automatizovaný sběr informací se týká rovněž neveřejných AP. V reakci na mnohé stížnosti společnost Google stanovila, že ze sběru vyloučí AP vysílající SSID doplněný o určenou příponu ("_nomap") s tím, že toto pravidlo se stane doporučením pro jiné agregátory dat WPS.

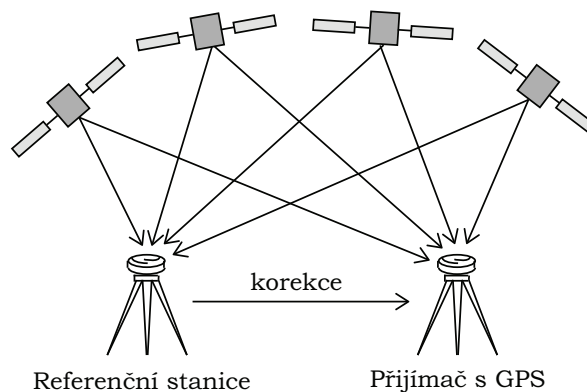
1.8.3. DGPS

V době, kdy byl aktivní systém SA pro záměrné zavádění chyb během určování polohy, se hledaly metody, jak tuto negativní vlastnost PPS potlačit. Vznikla metodika lokalizace nazývaná DGPS (Diferenciální GPS). Využitím diferencí mezi měřeními lze některé chyby eliminovat. Pro jednu diferencii je nutné mít k dispozici více než jedno měření a z něj vypočtené korekce.

V systému DGPS musí existovat alespoň jeden GPS přijímač o známých souřadnicích (systému WGS-84). Jde o tzv. referenční stanici, která přijímá v reálném čase signály GPS z aktuálně viditelných družic a na základě získaných dat měří pseudovzdálenost. V dalším kroku vyhodnotí odchylku vypočtené pseudovzdálenosti od skutečné vzdálenosti družice-stanice a na výstup odešle korekce zdánlivých vzdáleností. Přesnost korekčních hodnot závisí na jejich platnosti v čase (do 15 - 30 s) a na vzdálenosti mezi přijímačem a referenční stanicí (účinné do řádu stovek kilometrů). Opravy pro danou družici se vysílají tehdy, pokud se družice nachází nad horizontem, resp. nad spodní hranicí určeného elevačního úhlu.

Korekce se do navigačních přístrojů uživatelů odesílají prostřednictvím komunikačních sítí (mobilní připojení, dlouhovlnné vysílání, RDS). Přijatá data umožní následně opravit údaje o poloze.

V České republice jsou od roku 2004 v provozu služby Sítě permanentních stanic GNSS pro určování polohy (CZEPOS) jako součást informačních systémů veřejné správy. Jejich účelem je přesné určení polohy na celém území ČR. Systém CZEPOS tvoří 28 permanentních stanic rovnoměrně rozmístěných na území ČR a dále 27 stanic zahraničních sítí. Obstarávají zpracování korekčních dat a jejich přenos ke klient-skému měřicímu zařízení. CZEPOS využívají zejména uživatelé přesných geodetických GNSS přijímačů, kde lze prostřednictvím služeb CZEPOS dosáhnout centimetrové až subcentimetrové přesnosti a také GNSS přijímačů určených pro sběr dat GIS, kde lze dosáhnout submetrové až centimetrové přesnosti[2]. Systém se používá především pro přesnou navigaci v zemědělství u automatizovaných strojů, v záchranných systémech, v zeměměřičství, pro účely zavádění dat do katastru nemovitostí aj. Přesnost měření se sítí CZEPOS v poloze je u kódových měření 0,25 m, u fázových měření 0,015 m[2]. Služby jsou zpoplatněny.



Obrázek 1.18.: Princip činnosti DGPS

1.9. Další navigační systémy

1.9.1. Galileo

Evropský navigační systém vyvíjený a financovaný členskými státy EU se nazývá Galileo. Vznikl s myšlenkou ryze civilního charakteru bez zásahu vojenských autorit.

Systém Galileo předběžně počítá s 30 družicemi, z toho 3 záložními. Jednotlivé družice budou obíhat ve výšce 23 222 km (MEO) na třech kruhových oběžných drahách se sklonem 56° k rovníku a vzájemným posunem o 120° . Oběžná perioda systému je 10/17, tedy každých 8 dní se dráhová geometrie satelitů opakuje a za stejnou dobu oběhne družice Zemi 17krát. Sklon oběžných drah zaručuje dobré pokrytí i v okolí zemských pólů. Oběžná doba je přibližně 14 hodin. První dvě družice systému Galileo byly vyneseny v roce 2011. Systém nabídne pět druhů služeb:

- základní OS (Open Service)
- komerční CS (Commercial Service)
- veřejně regulovanou PRS (Public Regulated Service)
- vyhledávací a záchrannou SAR (Search and Rescue Service)
- SoL (Safety of Life Service)

Služba Open Service (OS) bude volně dostupná. Její signály budou využívat 2 pásma: 1164 – 1214 MHz a 1563 – 1591 MHz. U přijímačů se počítá s horizontální přesností lepší než 4 m a vertikální lepší než 8 m (nebo horizontálně pod 15 m a vertikálně pod 35 m při použití jednoho pásma). Protože bylo dosaženo dohody o kompatibilitě s již fungujícím americkým systémem, přijímače budou zároveň využívat i GPS.

Commercial Service (CS) bude šifrovaná, zpoplatněná a má poskytnout přesnost lepší než OS.

Safety of Life Service (SOL) bude šifrovaná s důrazem na integritu a bezpečnost, pro nasazení např. v řízení letového provozu.

Search and Rescue (SAR), služba nouzové lokalizace v rámci celosvětové družicové záchranné služby COSPAS/SARSAT s možností oboustranné komunikace.

Public Regulated Service (PRS), která bude šifrovaná, s kontrolovaným přístupem a dlouhodobou podporou, určená pro armády a bezpečnostní složky států.

Jednotlivé družice systému Galileo budou vysílat celkem 6 radiových signálů na 10 různých kanálech. Signály jsou rozděleny do tří základních skupin, pro které jsou přidělena jednotlivá frekvenční pásma. Základní frekvence v systému Galileo je 10,23 MHz. Ostatní jsou od této odvozeny.

Pásmo E5 (1164 – 1215 MHz)

- Vysílá dva různé signály E5a a E5b na čtyřech kanálech se střední frekvencí 1191,795 MHz. Signál E5a (1164 - 1191,795 MHz) s pilotním kmitočtem 1176,45 MHz. Signál E5b (1191,795 – 1215 MHz) s pilotním kmitočtem 1207,14 MHz.
- Modulace: BPSK

Pásmo E6 (1260 – 1300 MHz)

- Pilotní kmitočet 1278,75 MHz
- E6C komerční signál se dvěma kanály s modulací BPSK
- E6P privátní s datovým kanálem s modulací BOC (Binary Offset Carrier)

L6 (1544 – 1545 MHz)

- Pilotní kmitočet 1544,2 MHz

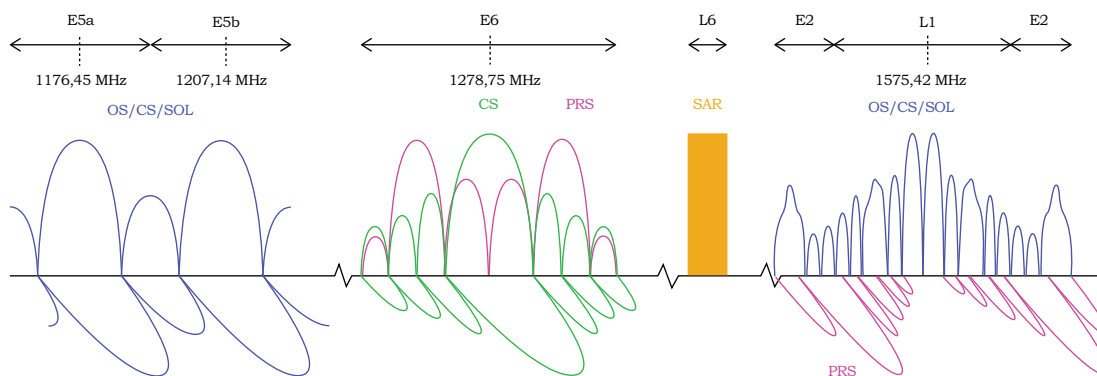
E2 (1559 – 1563 MHz)

L1 (1563 – 1587 MHz)

- Pilotní kmitočet 1575,42 MHz

Pásmo E1 (1559 – 1592 MHz)

- Datový signál veřejné regulované služby PRS označovaný E1-A,
- Datový signál základní služby OS označovaný E1-B



Obrázek 1.19.: Frekvenční spektrum GNSS Galileo

- Pilotní signál základní služby OS označovaného E1-C.

Administrativní centrum Galileo Supervising Authority (GSA) vzniklo v roce 2004 v Bruselu, od roku 2012 sídlí v Praze. Technologické centrum Galileo Control Centre (GCC) v Oberpfaffenhofenu u německého Mnichova. European Space Research and Technology Centre (ESTEC) ESA v holandském Noordwijku slouží pro testování satelitů pro jejich následné nasazení. Odtud pak v případě úspěšného testu putují na kosmodrom k připojení na nosnou raketu.

Na základě vzájemné spolupráce mezi Evropskou unií a Spojenými státy americkými bylo dohodnuto, že otevřené služby obou systémů se budou v rámci radiového spektra překrývat v pásmu modulace MBOC. Tímto krokem byla potvrzena vzájemná kompatibilita systémů u nešifrovaných a volně přístupných služeb. Systém GPS je pro tuto spolupráci technologicky vybaven počínaje zahájením provozu bloku GPS III. Uživatel je vybaven jedním GPS přijímačem pracujícím právě v tomto pásmu s modulací MBOC a využívá výhody interoperability signálů z družic obou systémů. U GPS se takto přenáší signály C/A, P(Y), M, L1C. Poloha uživatele se počítá z množiny kompatibilních signálů s vyšší přesností⁴ a s lepším pokrytím.

Největší potenciál systému Galileo stojí především v letecké, železniční, námořní a samozejmě i silniční dopravě. Široké využití však najde i v dalších oblastech, kde bude moci zajistit vyšší bezpečnost, přesnost a komfort, jako např. energetický průmysl, civilní ochrana, stavebnictví apod.

⁴GNSS přijímače mohou provádět výpočet polohy i ze signálů oddělených systémů na různých kmitočtech, např. GPS (TDMA, CDMA) a Glonass (FDMA). Pro činnost je nutné příslušné hardwarové vybavení a specifický algoritmus pro zpřesnění polohy na základě dat jednotlivých systémů.

1.9.2. Glonass

Ruský kosmický navigační systém vyvinutý v tehdejší SSSR pro vojenské účely nese název Glonass (Globální družicový navigační systém). Celý kontrolní segment se nachází na území Ruska a států SSSR. První satelit byl vynesena na oběžnou dráhu v roce 1982. V roce 2007 se základní polohovací služba stala veřejnou bez omezení.

Kosmický segment počítá s 24 družicemi, z nichž 3 slouží jako záložní. Satelity obíhají ve výšce 19 100 km (MEO) na třech orbitálních rovinách s náklonem 64,8 ° od rovníku a vzájemným posunem o 120 °. Oběžná perioda systému je 8/17, tedy každých 8 dní se dráhová geometrie satelitů opakuje a za stejnou dobu oběhne družice Zemí 17krát. Oběžná doba je 11 hodin a 15 minut. Konstelace byla nastavena tak, aby kdekoli na světě bylo dostupných alespoň 5 družic za podmínky provozu všech 24.

Na rozdíl od GPS se pro přenos dat používá netypická metoda FDMA (Frequency Division Multiple Access). Satelity označované jako Uragan tedy vysílají na unikátních kmitočtech L1 a L2 daných rovnicí:

$$s_i = f_i + k\Delta f_i \quad (1.17)$$

kde pro L1 je $i = 1$, pro L2 $i = 2$ a pro L3 $i = 3$. Nominální frekvence nosné jsou $f_1 = 1602 \text{ MHz}$, $f_2 = 1246 \text{ MHz}$ a $f_3 = 1202,025 \text{ MHz}$. Minimální odstupy kanálů $\Delta f_1 = 0,5625 \text{ MHz}$, $\Delta f_2 = 0,4375 \text{ MHz}$ a $\Delta f_3 = 0,42195 \text{ MHz}$. Jednotlivé kmitočtové kanály představuje konstanta k a může nabývat hodnot celých čísel v intervalu od -7 do 4. Družice, které se nacházejí navzájem v protilehlých místech orbitálních rovin, mohou vysílat na stejném kanále (stejně číslo k).

Základní vysílací rychlost dat pro polohovací zařízení je 5,11 MHz. Systém nabízí dva typy služeb.

- Služba **SP (Standard Precision)** poskytuje signál generovaný PRN kódem o délce 511 bitů. Ten se svým charakterem podobá C/A kódu u GPS. Každá opakující se sekvence se moduluje kmitočtem 0,511 MHz na nosnou L1.
- Přijímače využívající výhod služby **HP (High Precision)** pracují s kódem o délce $5,11 \cdot 10^6$ bitů při modulačním kmitočtu 5,11 MHz na nosných L1 i L2. Pro běžné uživatele však tento signál není dostupný.

Přijímače GLONASS se vzhledem k nutné frekvenční selekci musí přeladovat a pracovat na širokém kmitočtovém spektru, což v porovnání s GPS vyžaduje složitější konstrukci hardwaru. Ionosferické zpoždění se na různých kmitočtech liší, přijímače musí vyhodnocovat toto zpoždění zvlášť. Používání rozdílných kmitočtů při zpracování navíc ztěžuje fixování ambiguit na jejich celočíselnou hodnotu.

1.9.3. Beidou/Compass

Navigační systém Beidou je projekt Čínské lidové republiky. Klade si za cíl vytvořit nezávislý družicový navigační systém. Poté, co byla struktura systému přeplánována z regionálního na globální, bylo schváleno nové pojmenování Compass. První družice byla na oběžnou dráhu vyslána v říjnu roku 2000.

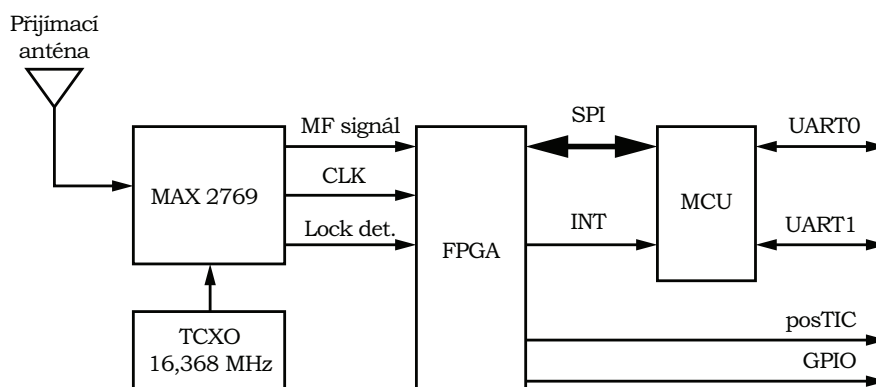
První blok označovaný Beidou-1 byl navržen jako prvotní experiment fungující výhradně nad Čínou a jejím okolím. Tři družice Beidou-1A, Beidou-1B a Beidou-1C byly vyneseny na geostacionární oběžnou dráhu Země v průběhu let 2000 až 2003. Princip určování polohy se oproti ostatním systémům lišil tím, že komunikace probíhala obousměrně. Uživatelská jednotka zažádala o stanovení polohy družici přímo, a to vysláním signálu. Družice požadavek přijaly a s informací o přesném času přijetí přeposlaly řídicímu centru, kde se spočítala zeměpisná šířka a zeměpisná délka uživatele včetně nadmořské výšky získané z mapového modelu. Spočítaná data se vyslala uživateli zpět prostřednictvím družice. Z popisu principu jasně vyplývá, že jednou z nevýhod byl limit počtu uživatelů a možnost monitorování datového kanálu.

První krok k zahájení činnosti Beidou-2 (Compass) se uskutečnil v dubnu roku 2007, kdy byla vypuštěna družice typu Compass-M na MEO (21 500 km). Počínaje rokem 2009 se začaly vypouštět plně funkční satelity. Dokončení globálního pokrytí se předpokládá nejdříve v roce 2020. Čínský družicový navigační systém bloku Beidou-2 je navržen pro 35 družic. Na MEO bude obíhat 27 družic, na GEO (geostacionární) 5 družic a 3 na geosynchronní oběžné dráze. Obdobně jako u ostatních systému bude nabízena dvojice služeb - veřejná (bezplatná) a koncesovaná (přesnější) [7].

Signály se multiplexují v CDMA kanálech na 4 frekvenčních pásmech E1, E2, E5B, E6 (dochází k překryvu s GNSS Galileo).

2. GPS přijímač

Pro účely analýzy vnitřních stavů GPS přijímače sloužil výukový přijímač. Výsledky umožnily optimalizaci a doladění použitého algoritmu a srovnání s teoretickými předpoklady. Při hardwarovém návrhu byl výukový GPS přijímač rozšířen o sériový port, prostřednictvím kterého se vysílají data v textovém formátu do PC. Na straně příjmu se nachází univerzální programovatelný čip MAX2769. Čip zpracovává signál přijímaný na anténu v rozmezí 1550 - 1610 MHz přes integrovaný nízkošumový zesilovač LNA (sem dát referenci na datasheet), resp. je přijímáno spektrum L1 ($f_{L1} = 1575,42 \text{ MHz}$). Schéma zapojení popisuje obrázek 2.1.

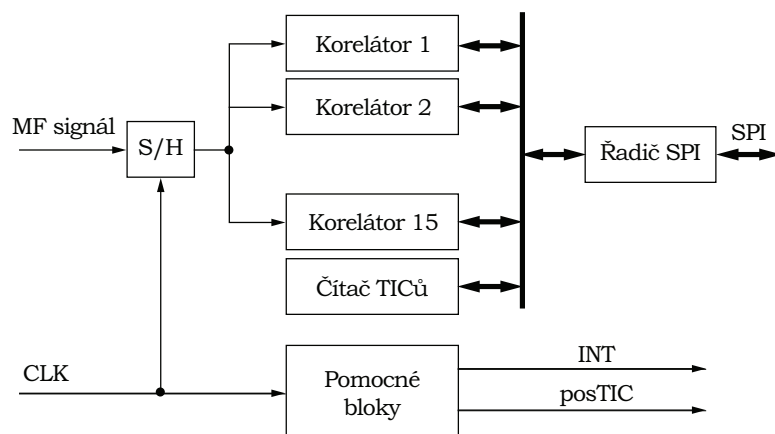


Obrázek 2.1.: Blokové schéma přijímače

2.1. Popis hardware

GPS přijímač provádí sériové měření kanálů. Signálový procesor je vybaven paralelně pracujícími E-L korelátory (obrázek 2.2). Na vstup se přivádí dvoubitové vzorky měřeného signálu na MF kmitočtu 4,092 MHz a dále se převzorkovávají hodinovým kmitočtem 16,368 MHz. Jednotlivé vzorky se přivádí na vstupy korelátorů. Informace o výstupech korelátorů se předávají prostřednictvím komunikačního rozhraní SPI¹. Pomocnými bloky se realizují tyto funkce [9]:

¹Serial Peripheral Interface - sériové periferní rozhraní pro komunikaci mezi řídicími mikroprocesory

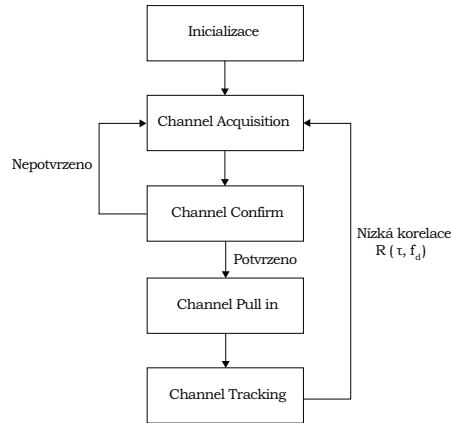


Obrázek 2.2.: Blokové schéma signálového procesoru [9]

- **Generátor TIC.** Slouží ke vzorkování výstupů generátoru PRN kódu a fáze nosné s periodou 0,625 ms.
- **Generátor intTIC.** Přerušovací signál pro synchronizaci MCU.
- **Čítač TIC.** 8bitový čítač ke kontrole, zdali MCU obsloužil všechna přerušení.
- **Indikátor prnTIC.** Generován příslušným korelátozem na konci periody PRN kódu. Indikátory slouží k rychlému výběru korelátorů, které je třeba programově obsloužit.
- **Výstup Lock detektoru obvodu MAX 2769.** Detektor indikuje správnou funkci (zavěšení) syntezátoru obvodu MAX 2769.
- **Generátor posTIC.** Indikace vzorkování výstupu generátoru PRN kódu a fáze nosného kmitočtu.

2.1.1. Odhad parametrů kanálu

Algoritmus vyhledávání v rámci kanálu družice se řídí schématem na obrázku 2.3. Přijímač zahajuje svou činnost vyhledávání (Acquisition), během kterého odesílá informace o stavech korelátorů Early a Late. Ve chvíli, kdy hodnoty těchto stavů překročí stanovený limit, dojde k několikanásobnému ověření, zdali nedošlo k falešnému poplachu (Confirm). Pokud k falešnému poplachu nedošlo, přechází se do stavu zpřesňování. Jakmile je kanál plně zasynchronizován, pokračuje se do stavu sledování (Tracking). Pakliže signál detekován nebyl, vyhledávání pokračuje na dalším kmitočtovém binu (Frequency Bin). Režim vyhledávání pokračuje tak dlouho, dokud není překročen stanovený maximální limit Dopplerova posunu kladný i záporný. Překročení tohoto limitu



Obrázek 2.3.: Schéma algoritmu synchronizace kanálu

může mít celou řadu příčin. Jednou z nich je úplná absence družice nad měřeným horizontem. Kanál pro měření družice mimo obzor se otevírá proto, že přijímač zahajuje svou činnost studeným startem (nejsou k dispozici efemeridy). Dále může být příčinou rychlost pohybu GPS přijímače.

Prohledávání kmitočtově-kódového prostoru začíná ve středu na nulovém Dopplerově posunu a pokračuje směrem ke nastaveným kladným/záporným hranicím po krocích takto:

$$0, \Delta f, -\Delta f, 2\Delta f, -2\Delta f, 3\Delta f, -3\Delta f, \dots \quad (2.1)$$

2.1.2. Synchronizace

Proces synchronizace v systému GPS zahrnuje obnovu kmitočtu nosné, fáze nosné a časování symbolů. Změny fáze a kmitočtu nosné způsobuje nestabilita kmitočtu místního oscilátoru při generování repliky kódu a Dopplerovým jevem při vzájemném pohybu přijímač-vysílač. Obecně lze pro přijímaný signál lze psát:

$$s(t) = Av(t - \tau)\cos[2\pi(f_c - f_d)(t - \tau) + \Theta] + n(t), \quad (2.2)$$

kde $v(t - \tau)$ je signál v základním pásmu, f_d je kmitočtová odchylka nosné od nominálního kmitočtu f_c , τ je zpoždění a $n(t)$ je šum. Fázové odchylky lze sdružit do jednoho členu:

$$\phi = \Theta - 2\pi(f_c - f_d)\tau. \quad (2.3)$$

Odhad parametrů v 2.3 se nazývá synchronizace. V případě modulace BPSK lze přijatý signál popsat vztahem:

$$s(t) = \pm A p_T(t - \tau) \cos[2\pi(f_c - f_d)t + \phi] + n(t), \quad (2.4)$$

kde $p_T(t)$ jsou symbolové prvky BPSK a $n(t)$ je šum se spektrální hustotou $N_0/2$. Během synchronizačního procesu se zjišťují odhady \hat{f}_d , $\hat{\tau}$ a $\hat{\phi}$ parametrů f_d , τ a ϕ .

2.1.3. Zachycení

Modulaci dálkoměrného signálu s C/A kódem lze popsat vztahem:

$$s(t) = C_{C/A}(t)D(t)\sin(2\pi f_c t), \quad (2.5)$$

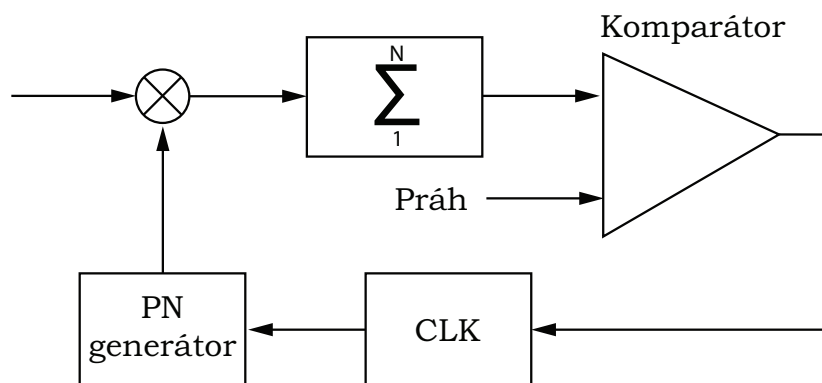
kde $f_c(t)$ je nosný kmitočet. Pro BPSK modulaci v systému GPS platí:

$$C_{C/A} \in \{-1; 1\} \quad (2.6)$$

$$D \in \{-1; 1\} \quad (2.7)$$

kde $C_{C/A}(t)$ je pseudonáhodný dálkoměrný kód a $D(t)$ je navigační zpráva.

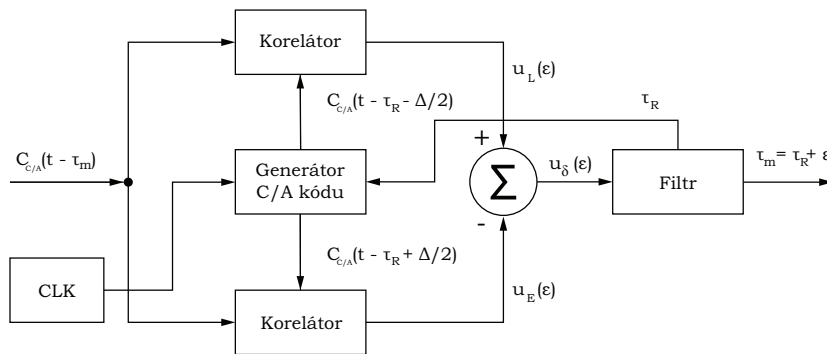
Prvním krokem při synchronizaci založené na korelačních vlastnostech pseudonáhodných sekvencí je zachycení signálu. To se provádí implementací korelátoru, jehož výstupy se porovnávají s prahem. Ve chvíli, kdy se na výstupu korelátoru objeví špička větší než zvolený práh, dojde k přepnutí do režimu Confirm. Pokud naopak práh překročen není, posune se posloupnost generovaná v přijímači o časový interval T_C odpovídající jednomu chipu a celý proces porovnání se znovu zopakuje. Odtud lze odvodit, že maximální chyba synchronizace je $T_C/2$.



Obrázek 2.4.: Blokové schéma implementace módu zachycení

2.1.4. Sledování

Signálový procesor se sestává z patnácti GPS Early-Late korelátorů. Jejich počet je zvolen s ohledem na maximální počet viditelných satelitů kdekoli na Zemi. Princip funkce E-L korelátorů demonstruje následující blokové schéma XY. Přijímačem generovaná posloupnost je v jedné větvi zpožděna o $\Delta/2$ (Late) a ve druhé zrychlena o $\Delta/2$ (Early). Mezi oběma replikami posloupnosti je tudíž časový posuv Δ fixní. Korelátor vytváří součet (integrál) součinů přijímaného signálu s kopií signálu vysílaného družicí. Součet (integrál) součinů je reprezentován korelační funkcí $R(e)$. Hodnota korelační funkce závisí na vzájemném posunu e obou signálů. Její maximální hodnota nastává tehdy, je-li vzájemný posun signálů nulový. Pokud je synchronizace mezi vstupním signálem s rozprostřeným spektrem a posloupností generovanou v přijímači přesná, jsou výstupy obou korelátorů stejné. Rozdíl výstupů korelátorů (chyba e) je pak nulový. V opačném případě je přijímačem generovaná posloupnost zpožděna nebo urychlena, dle znaménka chyby. V reálném provozu je vstupní satelitní signál výrazně postižen gaussovským nekorelovaným šumem a synchronizace není dokonalá, vzniká chyba v určení pseudovzdálenosti. [14]

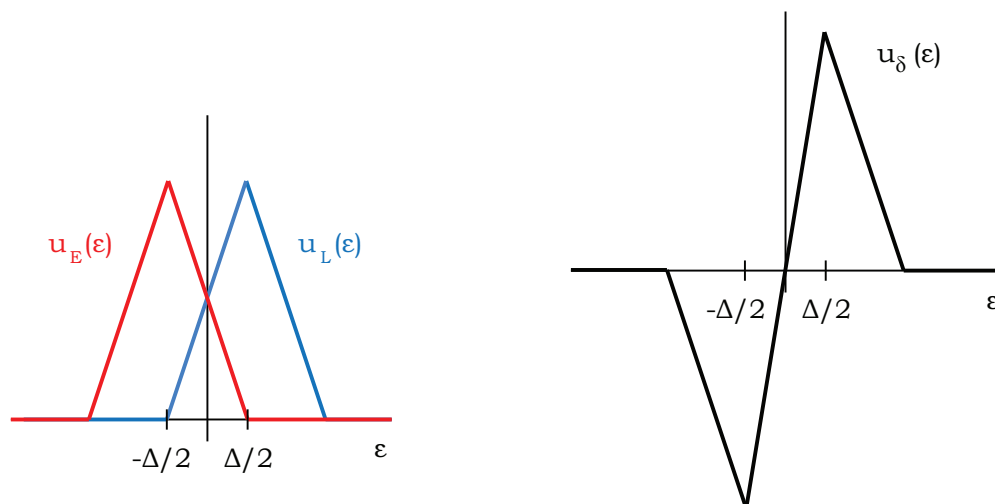


Obrázek 2.5.: Blokové schéma implementace korelátoru Early/Late

2.1.5. Výpočet polohy

Určování polohy se řídí dříve popsanou metodou. 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 vychází z předpokladu poloměru Země 6378 km a kruhového pohybu družic po dráze s nadmořskou výškou 20200 km. GPS přijímač zpracovává následující úlohy:

- generuje repliku pseudonáhodné sekvence pro daný PRN kód
- vypočítá pořadí PN sekvence (v datovém bitu)



Obrázek 2.6.: Charakteristiky korelátoru Early/Late

- demoduluje signál na vstupu
- synchronizuje jej na kmitočtu nosné (fázový závěs, PLL)
- vypočítá pseudozpoždění ze signálu z družice
- převádí data o poloze mezi souřadnými soustavami (geodetická, kartézská,...)
- vypočítá činitele DOP
- vybírá alespoň čtyři družice s nejnižším činitelem DOP

2.2. Struktura dat

Vnitřní stavy GPS přijímače se předávají prostřednictvím ASCII textových zpráv. Standardní zpráva má následující tvar:

`AA#, #, . . \n\t`

kde namísto dvojice písmen AA je značka typu zprávy, následuje řada číselných hodnot oddělených čárkou. O počtu číselných hodnot rozhoduje typ zprávy. Datovou větu uzavírá deklaráce nového řádku `\n\t`.

Vzhledem k nižší přenosové rychlosti rozhraní UART² a omezené velikosti bufferu se v případě jeho přeplnění předčasně ukončí vysílací funkce, proto může dojít k odeslání pouze části věty.

²Komunikační rozhraní pro přenos dat mikrokontrolérů

2.2.1. Typy zpráv

Channel Reset

Značka: CR

Věta Channel Reset se generuje ihned po spuštění GPS přijímače, a také po přepnutí aktuálně sledované družice v rámci sledovaného kanálu. Součástí datové zprávy se odesílá informace o kanále, sledované družici a počátečním odhadu Dopplerova kmitočtu.

```
CR<DEBUG_CHANNEL_NO>,<PRN>,<doppler>\n\r
```

DEBUG_CHANNEL_NO	číslo monitorovaného kanálu přijímače
PRN	PRN sledované družice
doppler	Počáteční Dopplerův kmitočet [Hz]

Channel Acquisition

Značka: CA

Během procházení dvojrozměrného kódově-fázového prostoru (doppler, bin) se generuje datová zpráva o stavu korelovaných hodnot zpoždovací DLL³ smyčky větví Early a Late.

```
CA<ve>,<vl>\n\r
```

ve	velikost obálky signálu změřená ve větvi Early
vl	velikost obálky signálu změřená ve větvi Late

Channel Confirm

Značka: CC

V případě, že korelované hodnoty výstupu DLL překročily nastavený práh citlivosti, dochází k několikanásobnému ověření. Pakliže není zjištěn falešný poplach, kanál přijímače se přepne do stavu Channel Pull-in. V opačném případě se znovu vrátí do stavu Channel Acquisition a pokračuje ve vyhledávání.

```
CC<ve>,<vl>,<m>,<n>\n\r
```

DEBUG_CHANNEL_NO	číslo monitorovaného kanálu přijímače
ve	velikost obálky signálu změřená ve větvi Early
vl	velikost obálky signálu změřená ve větvi Late
m, n	statové proměnné algoritmu m z n

³Delay Locked Loop - zpětnovazební smyčka pro měření zpoždění

Channel Pull-in

Značka: CP

V případě, že korelované hodnoty výstupu DLL překročily nastavený práh citlivosti, dochází k několikanásobnému ověření. Pakliže není zjištěn falešný poplach, kanál přijímače se přepne do stavu Channel Pull-in. V opačném případě se znovu vrátí do stavu Channel Acquisition a pokračuje ve vyhledávání.

CP<EI>,<EQ>,,<LQ>,<d_code>,<d_freq>\n\r

- <EI> Výstup korelátoru Early (soufázová složka)
- <EQ> Výstup korelátoru Early (kvadrurní složka)
- Výstup korelátoru Late (soufázová složka)
- <LQ> Výstup korelátoru Late (kvadrurní složka)
- <d_code> Zpoždění detektoru kódu. Chybě zpoždění jeden chip odpovídá hodnota 2^{15} .
- <d_freq> Výstup detektoru kmitočtu. Chybě kmitočtu 1 Hz odpovídá hodnota $102,94(2\pi 2^{15}/1000)$.

Výstupy korelátoru lze přepočítat na velikost obálky signálu ve a vl :

$$ve = \sqrt{EI^2 + EQ^2} \quad (2.8)$$

$$vl = \sqrt{LI^2 + LQ^2} \quad (2.9)$$

Channel Tracking DLL

Značka: TD

Zpráva obsahuje výsledky činnosti smyčky DLL. Výstupní hodnoty korelátorů odpovídají koherentní integraci za 20 ms (krok smyčky).

TD<EI20>,<EQ20>,<LI20>,<LQ20>,<d_code>,<b_code>\n\r

- <EI20> Výstup korelátoru Early (soufázová složka)
- <EQ20> Výstup korelátoru Early (kvadrurní složka)
- <LI20> Výstup korelátoru Late (soufázová složka)
- <LQ20> Výstup korelátoru Late (kvadrurní složka)
- <d_code> Výstup detektoru zpoždění. Chybě zpoždění jeden chip odpovídá hodnota 2^{15} .
- <b_code> Řídící slovo NCO_code. Rychlosti 1 chip/s odpovídá hodnota 16,4

Channel Tracking PLL

Značka: TP

Zpráva předává výsledky činnosti smyčky PLL resp. PLL podporované DLL. Generuje se s periodou 5 ms, což je rovněž krok smyčky.

TP<EI5>,<EQ5>,<LI5>,<LQ5>,<d_phase>,<d_freq>,<b_phase>\n\r

<EI5>	Výstup korelátoru Early (soufázová složka)
<EQ5>	Výstup korelátoru Early (kvadrurní složka)
<LI5>	Výstup korelátoru Late (soufázová složka)
<LQ5>	Výstup korelátoru Late (kvadrurní složka)
<d_phase>	Výstup fázového detektoru. Chybě kmitočtu 1 Hz odpovídá hodnota $5,147(2\pi 2^{15}/2000)$.
<d_freq>	Výstup kmitočtového detektoru. Chybě fáze 1 rad odpovídá hodnota 2^{15} .
<b_phase>	Řídicí slovo NCO_phase. Kmitočtu 1 Hz odpovídá hodnota 16,4

Channel Measurement

Značka: CM

Zpráva se generuje každá 8 PRN TICů . Nese informace o fázovém a kódovém měření pro potřeby výpočtu rozptylu kódového a fázového měření. Perioda generování zprávy byla stanovena tak, aby kódové ani fázové měření nebylo třeba přepočítávat ($8 * 0,625 \mu s = 5 ms$).

CM<TIC_counter>,<PRN_NO>,<CODE_P>,<CARR_N>,<CARR_P>\n\r

<TIC_counter>	Výstup 8bitového čítače TICů
<PRN_NO>	Fáze dálkoměrného kódu, celočíselná část
<CODE_P>	Fáze dálkoměrného kódu, desetinná část. Jednomu chipu odpovídá hodnota 2^{16} .
<CARR_N>	16bitový čítač period fáze nosné vlny.
<CARR_P>	Fáze nosné vlny. Hodnotě 2^{16} odpovídá 2π .

2.2.2. Struktura zpráv

Přenos vnitřních stavů se v jednotlivých fázích přijímače liší periodou.

Stav přijímače	Typ zprávy	Perioda opakování
Channel Acquisition	CA	1 ms
	CM	5 ms
Channel Confirm	CC	1 ms
Channel Pull-in	CP	1 ms
	CM	5 ms
Channel Tracking	TP	5 ms
	TD	20 ms
	CM	5 ms

Tabulka 2.1.: Periody jednotlivých datových vět

Náhled formátu souboru:

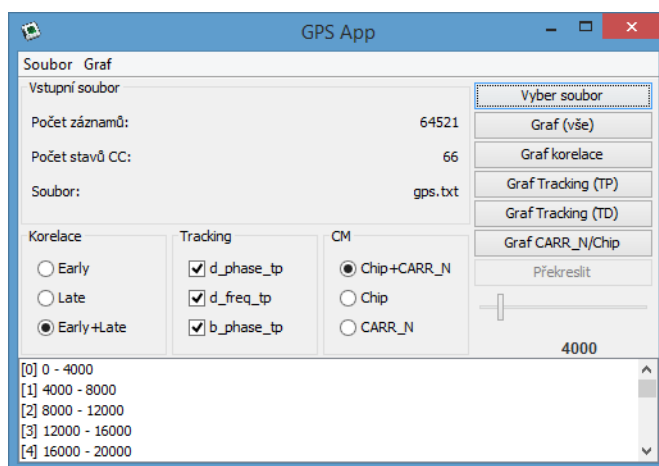
```

CR0,1,0
CA2180,1968
CA585,113
CA200,458
CA1825,845
CM8,747,46956,7685,57528
CA870,1230
CA440,424
CA785,650
CA1340,265
CA984,1160
CM16,750,14187,28145,57528
CA310,1520
CA1495,1178
CA525,1185
CA1030,1980
CA1200,1235
CM24,752,46955,48605,57528

```

2.3. Implementace software

Program pro zpracování výstupů GPS přijímače byl navržen v programovacím jazyce Java. Aplikace byla sestavena nad platformou Java 7. Software lze nainstalovat do celé škály verzí operačních systémů Microsoft Windows, Sun Solaris, distribucí OS Linux nebo Apple OS X. Přenositelnost vlastní aplikace zajišťuje hlavní součást platformy, tzv. Java Virtual Machine. Byte kód aplikace je vykonáván nezávisle na operačním systému, ve kterém právě běží. Součástí implementace aplikace pro analýzu vnitřních



Obrázek 2.7.: Ukázka grafického rozhraní aplikace

stavů GPS přijímače je grafické uživatelské rozhraní (GUI) pro snadnou obsluhu funkcí. GUI je realizováno tradičními knihovnami Swing a AWT s důrazem na zachování nativního vzhledu oken a tlačítek spuštěného OS. Načtení externích dat probíhá prostřednictvím ruční volby textového souboru vygenerovaného GPS přijímačem. Jednotlivé datové zprávy se předávají po řádcích, viz 2.2.1.

Pro vykreslení zpracované sady proměnných do grafu byla použito API GRAL verze 0.10, které je distribuováno pod licencí GPL⁴ pro programy v jazyce Java. Knihovny GRAL (Graphing Library) byly navrženy ke zpracování sady vstupních hodnot a jejich grafickému zobrazení v okně. Obsahují všechny funkce pro elementární práci s grafy, jako např. nastavení typu os (lineární, logaritmická) apod. Knihovny disponují popisnou API dokumentací, která je dostupná v [3].

2.3.1. Základní třídy

GPSapp.java

Primární třída s hlavní metodou main. Ošetřeny nejkritičtější výjimky běhu programu.

MainWindow.java

Implementováno hlavní okno aplikace včetně návaznosti na další třídy (viz obrázek 2.7). Při zavedení se spustí informační okno se záznamem veškeré činnosti. Ve spodní části hlavního okna se vypisuje seznam odkazů na dílčí části vyparsovaných dat. Vzhledem k tomu, že vstupní soubor může obsahovat obrovské množství dat, posuvníkem lze ručně

⁴Licence GPL umožňuje volné používání, šíření a modifikaci za předpokladu, že software bude nadále poskytován bezplatně, což se týká i softwaru, který z něj vychází.

určit velikost q jedné části a umožnit uživateli zobrazit graf jen pro zvolenou část dat. Tlačítkem "Překreslit" se na základě nastavené velikosti rozdělí data vstupního souboru na p částí. Jednotlivé části se pak mohou zpracovat zvlášť

```
public ArrayList<Results> loadResults(File file) {
    ArrayList<Results> results = new ArrayList<Results>(); //
        seznam rozdelenych dat
    BufferedReader in = new BufferedReader(new FileReader(file.
        getPath()));
    String [] buffer = new String [pageSize]; //buffer velikosti "q"
    int temp; // pomocna promenna
    String s; // pomocna promenna
    int multiplikator = 0; // signalizace poradi dat z intervalu
        <0; "p">
    while((s = in.readLine()) != null){
        buffer [0] = s; // nacteni prvnio radku
        temp = 1; // ukazatel na druhy radek
        while(( (s = in.readLine()) != null) && (temp<pageSize
            ) ){
            buffer [temp] = s; // cteni radku
            temp++; // posun ukazatele na dalsi
                radek
        }
        results.add(new Results(buffer ,multiplikator)); //
            ulozeni objektu Results
        multiplikator++; // inkrementace poradi
            dat
    }
    return results; // navrat seznamu objektu Results
}
```

Results.java

Třída Results představuje objekt jedné z množiny p částí vyparsovaného vstupního souboru dat. Konstruktor načte soubor a parsuje jednotlivé řádky. Parser pracuje s pevně definovanou syntaxí (viz 2.2.1). Data se ukládají do globální proměnné typu DataTable. Datové zprávy nejsou synchronní, neboť v čase n (jeden řádek) přichází z celé sady jen data pro jeden vnitřní stav (např. E-L korelátor). Z toho důvodu se před samotným parsováním zduplikují hodnoty všech m proměnných z času $n-1$ do n . Následuje vyparsování načteného řádku a aktualizuje se jedna příslušná proměnná. Nevýhodou tohoto řešení je, že výsledný průběh jednotlivých proměnných má schodovitý charakter, naopak

jako výhodou je možnost vertikálního porovnávání všech průběhů.

```
import de.erichseifert.gral.data.DataTable;
...
public DataTable data;
...
data = new DataTable(
    Integer.class, //0 = n
    Integer.class, //1 = korr_early
    Integer.class, //2 = korr_late
    Integer.class, //3 = korr_early_cp
    Integer.class, //4 = korr_late_cp
    Integer.class, //5 = korr_late_cp
    Integer.class, //6 = korr_late_cp
    Integer.class, //7 = korr_early_tp
    ...
    Integer.class, //18 = chip
    Integer.class //19 = doppler
);
```

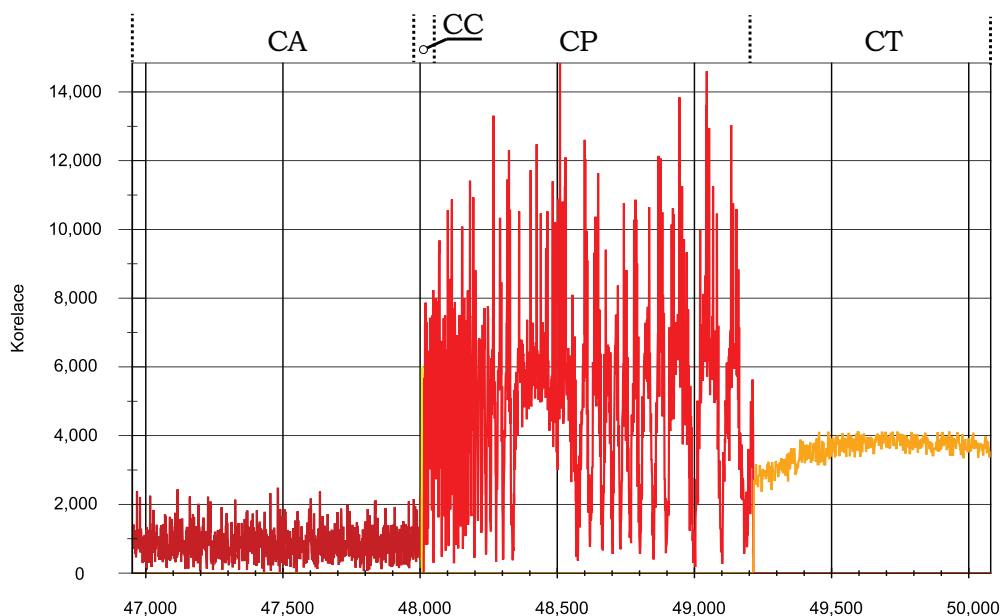
Graph.java

Třída, k níž byly navázány knihovny GRAL. Vstupem je objekt výsledků Results a přepínač pro vykreslení požadovaného grafu včetně dalších proměnných. Na konci konstruktoru třídy se otevře okno s grafem. Jednotlivé průběhy lze kolečkem myši přibližovat a oddalovat.

2.4. Analýza vnitřních stavů GPS přijímače

2.4.1. Výstup korelační E-L smyčky

Během procházení všech stavů činnosti přijímače Acquisition, Confirm, Pull in a Tracking se na datový výstup posílá velikost obálky ve větvích korelátoru Early a Late. Na obrázku 2.8 je zobrazena obálka korelátoru Early časového úseku, ve kterém přijímač přešel ze stavu vyhledávání (Acquisition) do stavu zpřesňování (Pull in) a následně do stavu sledování (Tracking). Vzhledem ke zvýšení rozlišení ve stavu Channel Pull in se v průběhu vykreslují vyšší hodnoty, než ve stavech Channel Acquisition a Channel Tracking.



Obrázek 2.8.: Výstup korelátoru větve Early

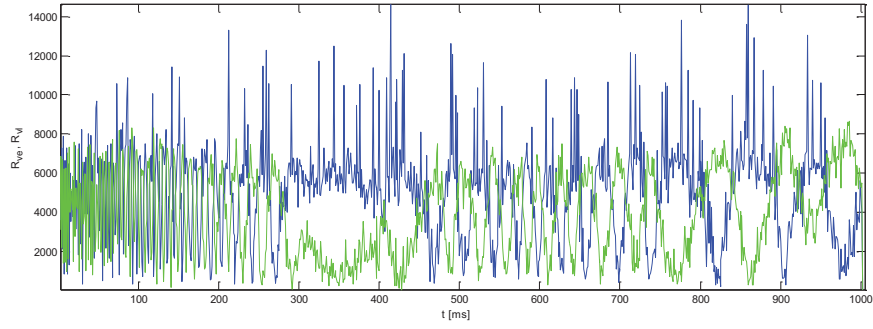
Na obrázku 2.9 jsou vykresleny výstupní hodnoty korelátorů Early a Late ve stavu Channel Pull in, a to v jednom grafu s větším rozlišením.

Během vyhledávání signálu často dochází k detekci špičky šumu. V takovémto případě přijímač ukotví parametry f_d a τ , neboť došlo k detekci hodnoty korelace nad stanoveným prahem. V následujícím kroku jsou opakovaně ověřeny hodnoty korelace ve stavu Channel Confirm. Pakliže šlo skutečně pouze o náhodnou špičku šumu, přijímač není synchronizován a vyhledávání pokračuje dále. Na průběhu 2.10 lze vyčíst míru četnosti výskytu stavu Channel Confirm. Měření bylo zjištěno, že v režimu vyhledávání stráví přijímač zhruba 1 % času ve stavu Channel Confirm. Vysoký podíl času by značně prodloužil dobu vyhledávání.

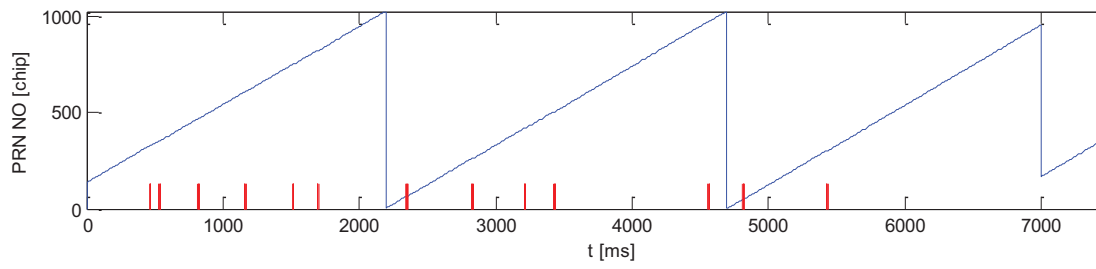
2.4.2. Měření odhadu parametrů kanálu

Stav CM (Channel Measurement) podává informaci o aktuálních stavových veličinách kódově-fázového prostoru $S(\tau, f_D)$. Kódová část mechanismu prohledávání je realizována 10bitovým čítačem s přetečením. Jakmile je dosaženo hraničního chipu (1023), čítač se vrací zpět na nulu. Na obrázku 2.11 je vykreslen časový průběh činnosti čítače získaný z přijatých dat.

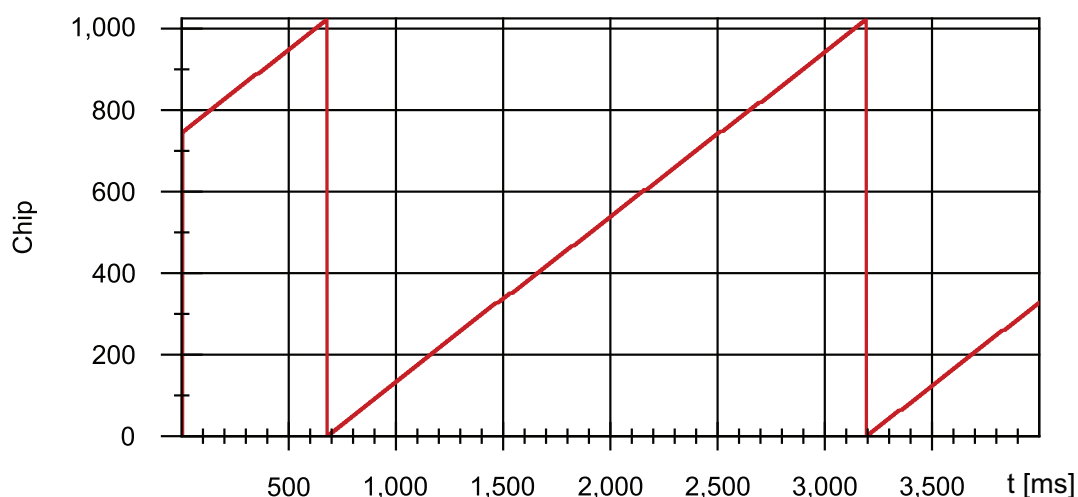
Ve chvíli, kdy přímáč přechází do stavu sledování, změní se i činnost čítače kódu. Aktuální hodnota chipu se mění v čase velmi pomalu. Nestálost hodnoty chipu v čase je způsobena změnou vzdálenosti mezi družicí a přijímačem. Datová slova CODE_P představují desetinnou část čítače kódu a zjemňují rozlišení průběhu (viz obrázek)



Obrázek 2.9.: Výstup korelátoru větví Early R_{ve} a Late R_{vl} ve stavu Channel Pull in



Obrázek 2.10.: Vyhledávání signálu. Stavy Channel Confirm červeně.



Obrázek 2.11.: Vyhledávání v rámci kanálu. Posun fáze dálkoměrného kódu (nahore)

Pro dosažení požadované velikosti korelace je nutné uvažovat i vliv vzájemné rychlosti přijímače a družice. Přeladováním vnitřního oscilátoru generujícího repliku kódu se hýbe s druhou zásadní proměnnou kódově-fázového prostoru. Přijímač zahajuje svou činnost ve středu na nulové hodnotě Dopplerova kmitočtu. V následujících krocích dochází ke skokové změně kmitočtu střídavě mezi kladnými a zápornými hodnotami podle 2.1.

Obrázek 2.14 zobrazuje principiální funkci 16bitového čítače. Plná čára reprezentuje stav čítače, přerušovaná čára znázorňuje jeho výchozí činnost při nepřeladěném vnitřním oscilátoru (odhad Dopplerova kmitočtu je roven nule). Z rychlosti čítání, resp. úhlu bitové reprezentace a osy x lze odvodit, jak byl oscilátor přeladěn.

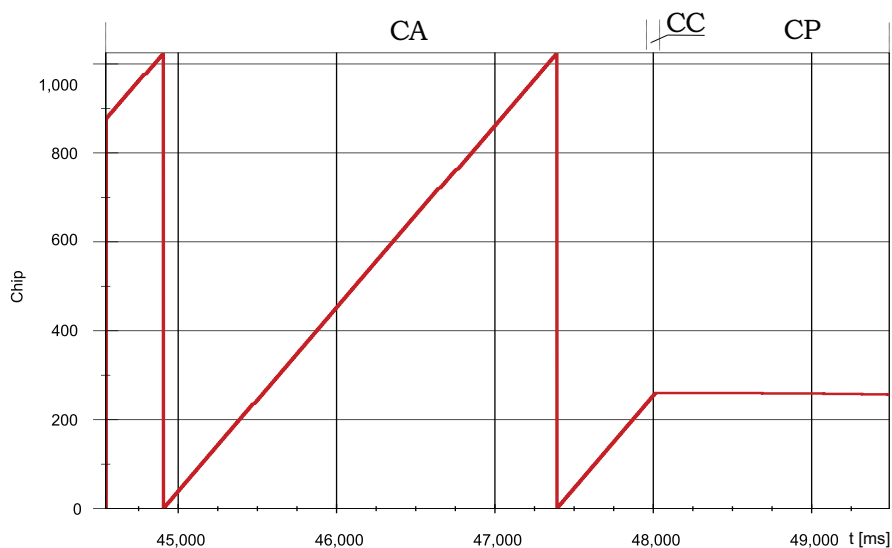
Satelity mají oběžnou dobu zhruba 12 hodin. V závislosti na poloze pozorovatele a na pozorovaném satelitu může být satelit z jednoho místa pozorován 1 až 10 hodin. Dopplerův kmitočet je nejnižší, pokud se družice nachází přímo nad pozorovatelem a má v tomto místě největší derivaci.

2.4.3. Analýza pseudovzdálenosti

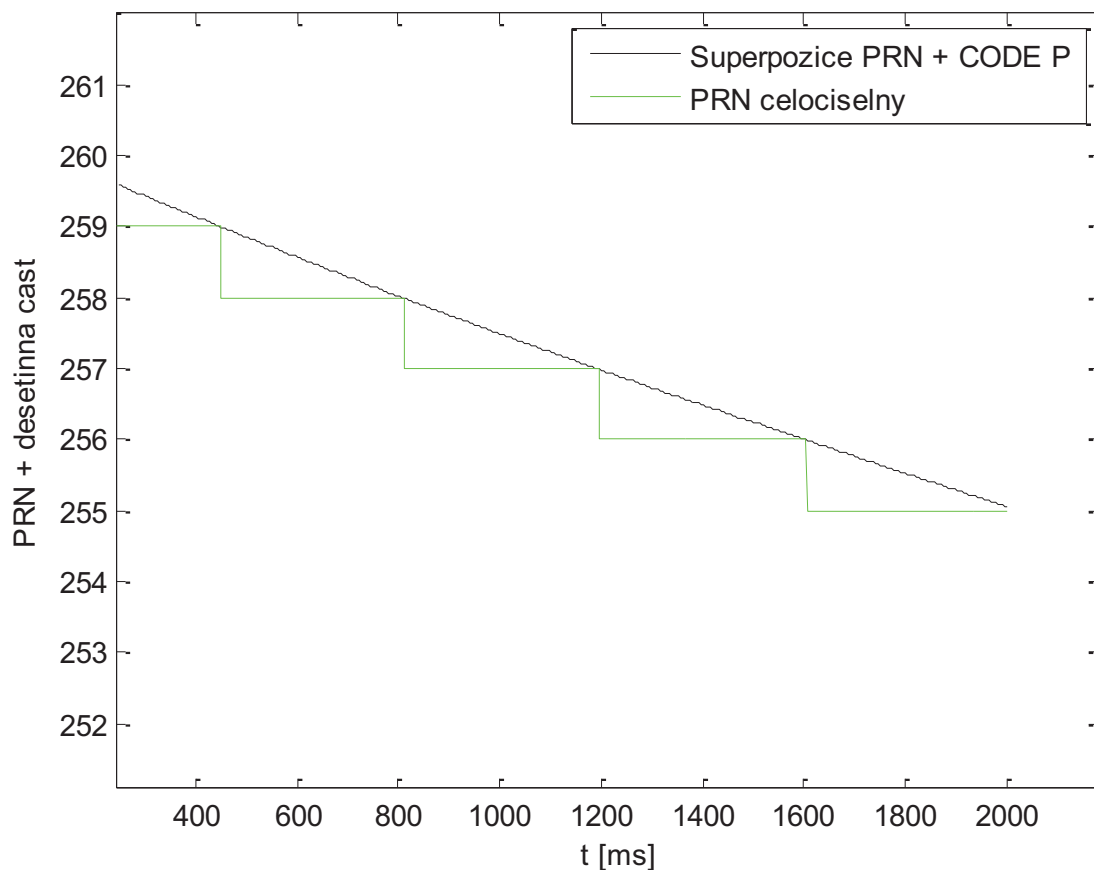
Získaná data ve zprávě CM (Channel Measurement) se přepočítají na pseudovzdálenost podle vzorce 2.10:

$$R_c = \left(PRNN + \frac{CODEP}{2^{16}} \right) \frac{3 \cdot 10^8}{1023000} [m] \quad (2.10)$$

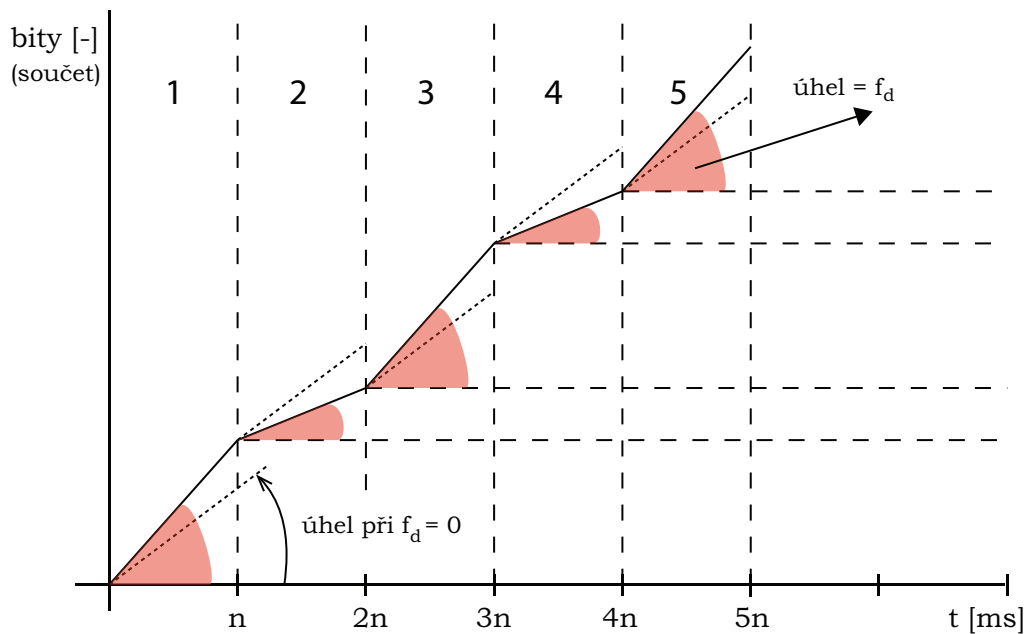
Přepočítaný průběh znázorňuje změnu pseudovzdálenosti v čase. Jde o běžný jev, kdy se průběžně mění vzájemná vzdálenost mezi družicí a GPS přijímačem. Ačkoliv rychlost



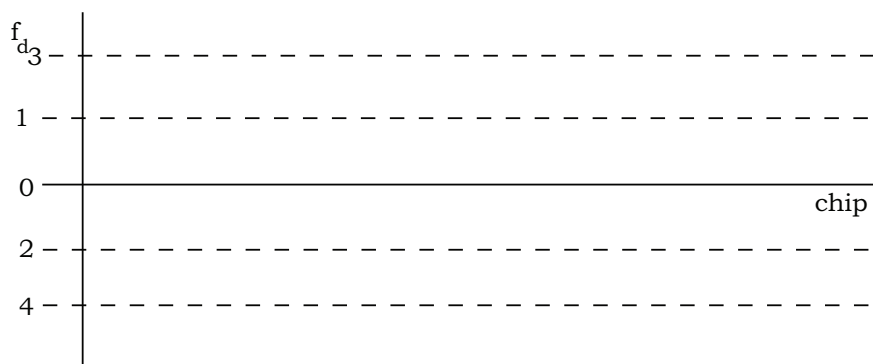
Obrázek 2.12.: Zobrazení části dat posunu dálkoměrného kódu, kdy došlo k přechodu z režimu akvizice do režimu tracking



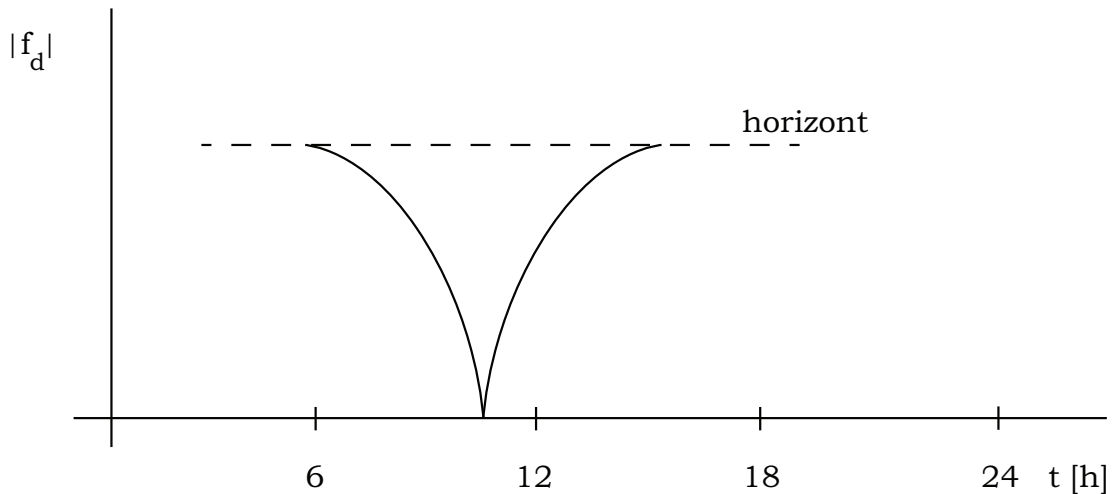
Obrázek 2.13.: Superpozice hodnot dat PRN_NO a CODE_P během měření kanálu (mód Tracking)



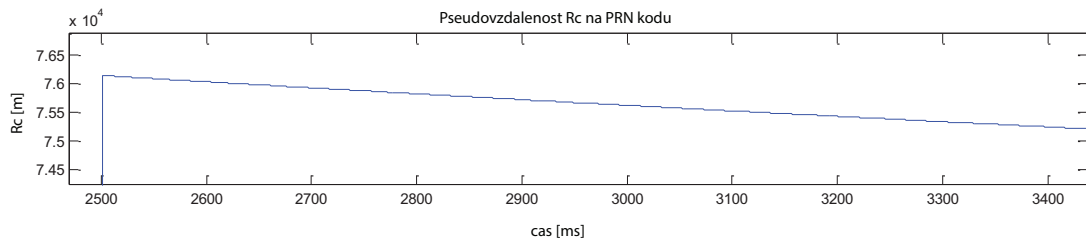
Obrázek 2.14.: Princip realizace 16bitového čítače period nosné



Obrázek 2.15.: Vertikální zónové rozdělení kódově-fázového prostoru. Vztaženo k obrázku 2.14



Obrázek 2.16.: Znázornění relativní změny dopplerova kmitočtu při měření v jednom místě



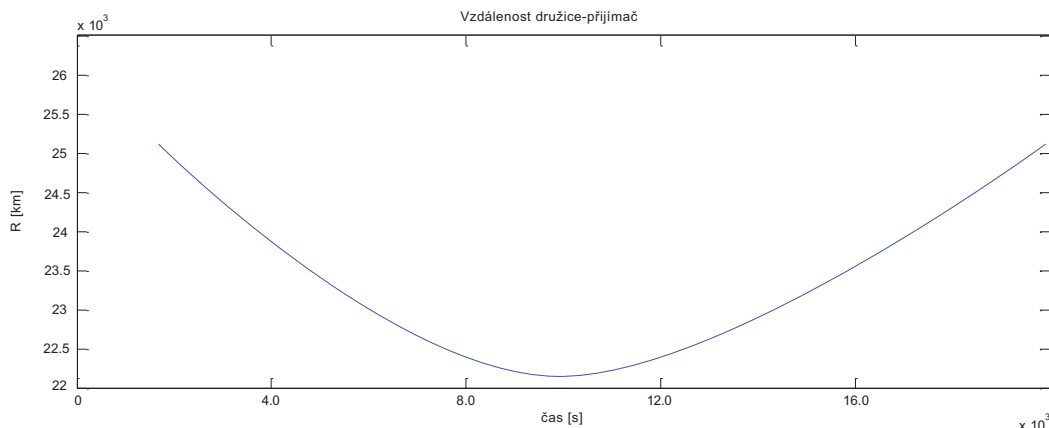
Obrázek 2.17.: Měření změny pseudovzdálenosti R_C v čase

pohybu družice je 3,8 km/s [13], radiální složka je menší a lze ji odečíst z průběhu níže, tj. cca 1 km / 1000 ms.

Při uvažování vzdálenosti mezi družicí a přijímačem při vzdálenosti zhruba 20 200 km [13]) se zjednodušeně vychází ze vzorce

$$d_i = c \cdot \tau_i \quad (2.11)$$

kde d_i je vzdálenost i -té družice a τ_i je doba šíření C/A kódu. Doba šíření C/A kódu je 67,3 ms a jeho délka je vzhledem k celkové vzdálenosti družice-přijímač pouze cca 300 km. Jak již bylo předtím zmíněno, během pohybu družice nad obzorem se vzdálenost mění, což má za následek fakt, že při přiblížení se čas šíření C/A kódu zkrátí, vzdálení naopak čas prodlouží. Vzhledem k tomu, že C/A kód se opakuje vždy jednou za 1 ms, je nutné najít referenční základnu pro určení počtu jeho period (ambiguit). Pro určení počtu period C/A kódu (1 ms) slouží navigační zpráva, resp. jeden z jejích podrámců v délce trvání 6000 ms. V navigační zprávě jsou obsaženy časové značky. Navigační



Obrázek 2.18.: Změna vzdálenosti družice během pozorování z jednoho místa

zpráva je časově synchronní s dálkoměrným kódem, což je předpoklad pro stanovení ambiguit C/A kódu. Dálkoměrný kód tedy umožňuje odměřovat čas vůči časové značce v navigační zprávě.

2.5. Závěr

Na základě tématu diplomové práce byl vytvořen počítačový program pro analýzu dat na výstupu GPS přijímače, a také zdrojový kód pro vykreslování měřených průběhů v programu MATLAB.

Zobrazené průběhy demonstrují princip činnosti GPS přijímače z pohledu analýzy korelačních funkcí. Během vyhledávání signálu se v průměru v 1 % případů vyskytovaly falešné špičky nad nastaveným prahem. Tyto stavy způsobuje proměnlivý charakter aditivní šumové složky.

Graf znázorňující změnu pseudovzdálenosti se od počátku měření družice vycházející nad horizontem a zapadající má tvar elipsy, místy však může být vychýlena vlivem gravitačního působení jiných těles na trajektorii letící družice.

Výstupní data jsou zatížena kvantizační chybou výpočetní jednotky (rozlišení 2^{16}). Na průbězích se dále vyskytují superponované chyby měření - tepelný šum.

Další chyby vnesené do měření jsou: chyba časové základny v přijímači a kvantizační šum posunu základny C/A kódu ($300\text{ m} / 2^{16}$). Pokrokové technologie umožnily měření s mnohem vyšším rozlišením a vzorkovacími frekvencemi při číslicovém zpracování signálů. Rozhodujícím faktorem pro přesnost činnosti GPS přijímače je vedle konstrukce antény a hardwaru také metodika výpočtu. Algoritmy se sestavují podle konkrétního způsobu využití (silniční doprava, letectví, námořní doprava, geodézie).

3. Seznam zkratek

3D+T	3 pseudovzdálenosti a 1 korekce času
AP	Přístupový bod (Access Point)
BEIDOU	Čínský systém družicové navigace
BOC	Binární modulace s vychýlenou nosnou (Binary Offset Carrier)
BPSK	Dvoustavové klíčování fázovým posuvem (Binary Phase Shift Keying)
C/A	Hrubé zachycení (Coarse Acquisition)
CA	Vyhledávání kanálu (Channel Acquisition)
CC	Potvrzení kanálu (Channel Confirm)
CDMA	Kódový multiplex (Code division multiple access)
CP	Zpřesnění paramterů kanálu (Channel Pull in)
CZEPOS	Czech Positioning System
DGPS	Diferenciální GPS
DLL	Smyčka závěsu zpoždění (Delay locked loop)
DOP	Dilution of Precision
EFEC	Souřadnicový systém EFEC (Earth-Centered, Earth-Fixed)
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay System
E-L	Early-Late
ENU	Souřadnicový systém (East, Nord, Up)
FOC	Plná (Full Operational Capability)
FLL	Frequency Locked Loop
GDOP	Parametr geometrické přesnosti (Geometric Dilution of Precision)
GNSS	Globální družicový polohový systém (Global Navigation Satellite System)
GPS	Globální polohový systém (Global Positioning System)
GLONASS	Globální navigační satelitní systém (Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistema)
HDOP	Parametr horizontální přesnosti (Horizontal Dilution of Precision)
IOC	Počáteční operační schopnost (Initial Operational Capability)
LLA	Souřadnicový systém LLA (Latitude, Longitude, Latitude)
LO	Místní oscilátor (Local Oscillator)

MBOC	Multiplexed BOC
MEO	Střední oběžná dráha Země (Medium Earth Orbit)
MF	Mezifrekvenční signál
NAVSTAR	Navigation Signal Timing and Ranging
NMEA	Národní asociace pro námořní elektroniku (National Marine Electronics Association)
PDOP	Parametr přesnosti polohy (Position Dilution of Precision)
PLL	Phase Locked Loop
PPS	Přesná polohová služba (Precise Positioning Service)
PRN	Pseudonáhodný šum (Pseudorandom Noise)
RX	Přijímač
SA	Selektivní přístupnost (Selective Availability)
SV	Družice (Space Vehicle)
SBAS	Satellite-based Augmentation System
TDOP	Parametr časové přesnosti (Time Dilution of Precision)
TOA	Time of Arrival (Čas příchodu signálu)
TTF	Čas prvního určení polohy, resp. čas spuštění služby (Time to First Fix)
TX	Vysílač
UTC	Koordinovaný světový čas (Coordinated Universal Time)
SoL	Safety-of-Life Service
SPS	Standardní polohová služba (Standard Positioning Service)
SSID	Service Set Identifier
VDOP	Parametr vertikální přesnosti (Vertical Dilution of Precision)
WAAS	Wide Area Augmentation System
WPS	Wi-Fi Positioning System
WGS 84	Souřadnicový systém WGS 84 (World Geodetic System 1984)

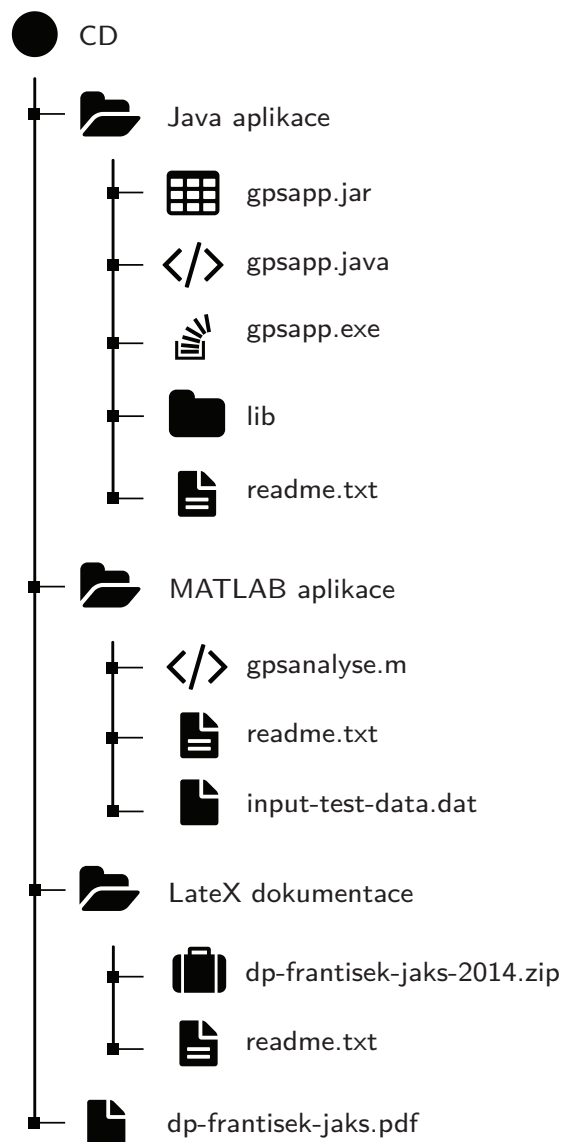
Literatura

- [1] *Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics* [online]. [cit. 29. 4. 2014]. Dostupné z: <http://www.gps.gov>.
- [2] *Síť permanentních stanic GNSS České Republiky CZEPOS* [online]. Poslední aktualizace 1. září 2014. Dostupné z: <http://czeapos.cuzk.cz>.
- [3] *Global Positioning System* [online]. Poslední aktualizace 29. dubna 2005 18:08. [cit. 30. 4. 2014]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System.
- [4] *GRAL Java Graphing* [online]. Poslední aktualizace 30. května 2014 18:08. Dostupné z: <http://trac.erichseifert.de/gral>.
- [5] ČÁBELKA, M. *Úvod do GPS* [online]. [cit. 29. 4. 2014]. Dostupné z: <https://www.natur.cuni.cz/geografie/geoinformatika-kartografie/ke-stazeni/vyuka/gps/skriptum-uvod-do-gps>.
- [6] CLINTON, B. *Office of the Press Secretary: Improving the Civilian Global Positioning System (GPS)* [online]. [cit. 29. 4. 2014]. Dostupné z: http://clinton3.nara.gov/WH/New/html/20000501_2.html.
- [7] ELLIOTT D. KAPLAN, C. J. H. *Understanding GPS: Principles and Applications*. Boston, MA, USA : Boston - Artech House, 1996. ISBN 0-89006-793-7.
- [8] JAN HOFMAN, A. P. Emulace navigačního signálu systému GPS. *Elektrorevue*. 2013, 15.
- [9] KOVÁŘ, P. Signálový procesor GPS přijímače pro družici CubeSat. Únor 2014.
- [10] MISRA, P. – ENGE, P. *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*. Č. sv. 1 v *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*. Ganga-Jamuna Press, 2001. Dostupné z: <http://books.google.cz/books?id=V7x7QgAACAAJ>. ISBN 9780970954404.
- [11] OTAKAR ŠVÁBENSKÝ, R. M. J. W. *Seminář GPS - Metodika GPS měření a vyhodnocení*. VUT Brno, 2007.

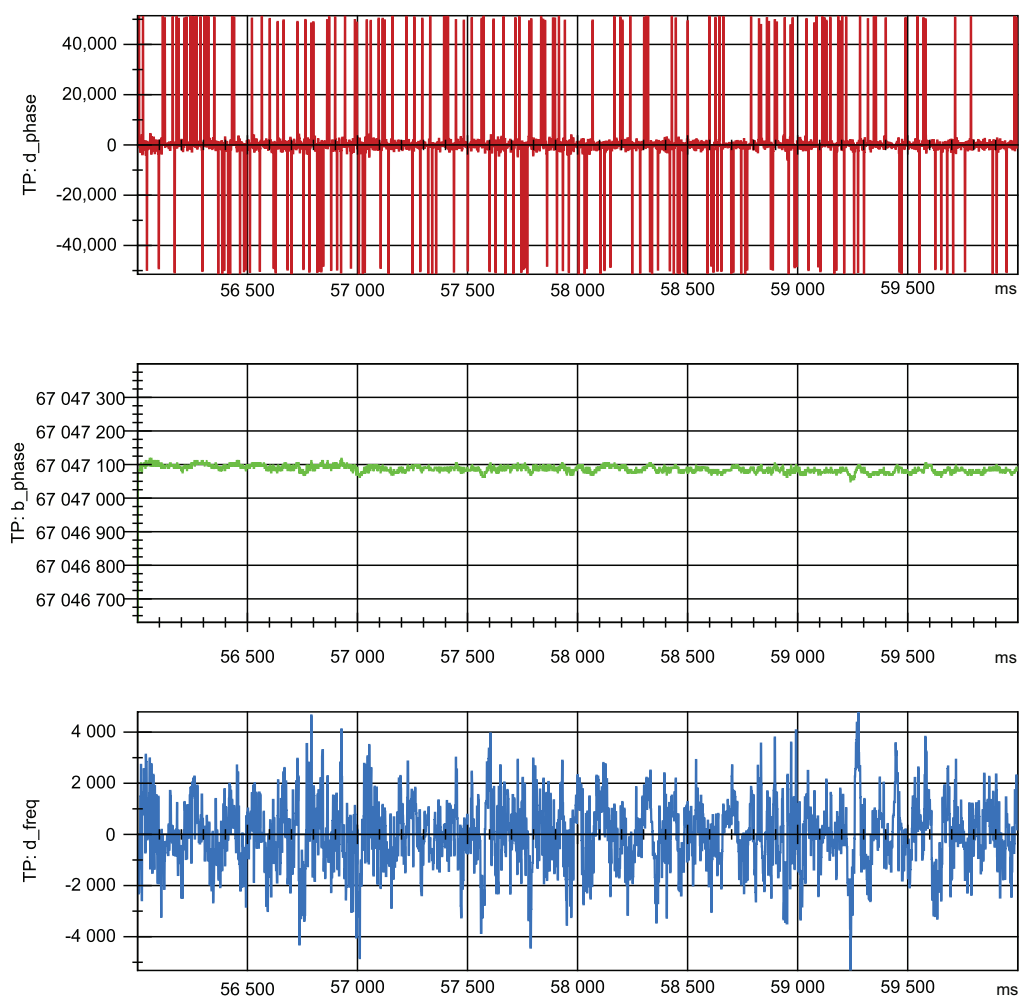
- [12] PARKINSON, B. – SPILKER, J. *The global positioning system: theory and applications*. Č. sv. 2, sv. 164 v Progress in astronautics and aeronautics. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. ISBN 9781563471070.
- [13] SCHENK, J. *Globální polohové systémy v geodézii* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2003. [cit. 29. 4. 2014]. Dostupné z: http://igdm.vsb.cz/igdm/materialy/Globalni_polohove_systemy.pdf.
- [14] ŠEBESTA, J. *Globální navigační systémy*. VUT v Brně, 2012. ISBN 978-80-214-4500-0.
- [15] Terminologická komise ČÚZK. *Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí* [online]. [cit. 29. 4. 2014]. Dostupné z: <https://www.vugtk.cz/slovník/>.
- [16] TOMÁŠ LÁSKA, J. S. J. S. M. T. *Globální navigační satelitní systémy a jejich využití v praxi: Učební texty k semináři* [online]. Brno: VUT, 2010. [cit. 29. 4. 2014]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_08_1009.pdf.

Příloha

A. Obsah přiloženého CD



B. Další proměnné



Obrázek B.1.: Režim sledování. Proměnné d_phase, b_phase a d_freq