

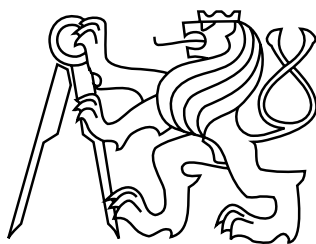
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

PRAHA 2015

Bc. Martin RÁKOSNÍK

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
OBOR ELEKTRONIKA A INFORMATIKA



DIPLOMOVÁ PRÁCE
VYUŽITÍ DRUŽICOVÉ NAVIGACE PRO URČENÍ POLOHY
VLAKU

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Pavel Kovář
Katedra radiotechniky

leden 2015

Bc. Martin RÁKOSNÍK

ZDE VLOŽIT LIST ZADÁNÍ

Z důvodu správného číslování stránek

ABSTRAKT

Práce studuje možnosti globálních navigačních satelitních systémů, zejména poté GPS, a jejich využití v železniční dopravě s ohledem na bezpečnost, logistiku a řízení provozu. Jsou charakterizovány základní prvky GNSS a vybrány dominantní parametry ovlivňující kvalitu polohové informace. Dále je představena metodika měření těchto parametrů a provedeno jejich experimentální měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Klíčová slova v češtině: Globální navigační satelitní systém; Globální poziční systém; Zabezpečení železnic; Akvizice signálu; Mnohacestné šíření; uBlox protokol

ABSTRACT

The thesis pursues on possibilities of Global Navigation Satellite System, especially GPS, and its use in a railway transport, logistics and a traffic control. Basic elements of GNSS are characterized; and dominant parameteres which affect a quality of position information are chosen. Afterwards, a measurement methodology of these parameters is presented and finally, their experimental measurement is provided.

KEYWORDS

Keywords in English: Global Navigation Satellite System; Global Positioning System; Railway safety; Acquisition signal; Multipath Signal Propagation; uBlox protocol

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma „Využití družicové navigace pro určení polohy vlaku“ jsem vypracoval samostatně. Použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v seznamu zdrojů.

V Praze dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce doc. Dr. Ing. Pavlu Kovářovi za vedení, rady a pomoc při zpracování této práce.

Obsah

Úvod	7
1 Systémy pro zabezpečení a určení polohy vlaků	8
1.1 Požadavky na bezpečnost železniční dopravy	8
1.2 ERTMS - European Rail Traffic Management System	10
1.2.1 ETCS - European Train Control System	11
1.3 GNSS - Global Navigation Satellite System	12
1.4 NAVSTAR GPS	13
1.4.1 Charakteristika systému	13
1.4.2 Princip určování polohy	15
2 Vybrané parametry ovlivňující kvalitu polohové informace	22
2.1 Akvizice signálu a citlivost přijímače	22
2.2 Mnohacestné šíření	26
2.3 Dynamické změny polohy přijímače	26
2.4 Elektromagnetické rušení	27
2.5 Návrh metodiky měření vybraných parametrů	28
3 Přijímací zařízení uBlox EVK-6T	30
3.1 Protokol UBX	30
3.2 Struktura kódu uBlox	30
3.3 Dekódování informace z protokolu přijímače	31
4 Realizace měření a analýza vybraných parametrů	33
4.1 Chyba zdánlivé vzdálenosti způsobená mnohacestným šířením signálu	35
4.2 Akvizice a citlivost přijímače	39
4.3 Vliv dynamických změn polohy přijímače na kvalitu polohové informace	43
Závěr	45
Použité zdroje	47

Úvod

Vývojem železniční dopravy vznikaly požadavky na její bezpečnost a spolehlivost. To vedlo k navrhování vhodného vlakového zabezpečovacího zařízení. Řešení mělo čistě národní charakter. Různé železniční společnosti po celé Evropě vyvíjely své vlastní systémy zabezpečení, které jsou vzájemně neslučitelné.

Postupem času začal být strategický zájem o možnost propojení železnic po celé Evropě mezinárodní. Jedním z hlavních důvodů byla konkurenceschopnost automobilové dopravy. Prvotní myšlenka byla o vytvoření univerzální lokomotivy, která by nesla veškeré zabezpečovací systémy. Avšak takové řešení se jevilo jako nemožné. Vlakových zabezpečovacích řešení bylo velké množství. Takovou lokomotivu by bylo náročné a možná i nemožné sestrojít. Navíc některé z těchto projektů nesplňovaly současné požadavky na zabezpečení provozu vlakové dopravy.

Postupně byly vyvíjeny systémy na Evropské úrovni, které splňovaly veškeré bezpečnostní podmínky. Sjednocení zabezpečení železnic tak bylo umožněno, avšak podmínkou byly často radikální zásahy do stávajících železničních systémů, a tím se velmi zvyšovaly náklady na realizaci. Některá z evropských řešení jsou popsána níže v práci.

Hlavní myšlenkou, kterou se tato práce zabývá, je možnost využití GNSS navigace pro řešení vlakové bezpečnosti. Systémy jsou v dnešní době velmi rychle vyvíjeny a přesnost a spolehlivost, se kterou určují polohovou informaci, se neustále zlepšuje. Do budoucna by tedy takové řešení mohlo být levnější a dostupnější než dnešní vyvíjené systémy.

Cílem práce je vytipování parametrů, které jsou zásadní pro dosažení požadované přesnosti určení polohy pomocí systému GPS a porovnání s nároky na bezpečnost železniční přepravy.

1 Systémy pro zabezpečení a určení polohy vlaků

V posledních letech má železniční průmysl, nejen na území České republiky, ale i v dalších státech Evropy, snahu o modernizaci železniční sítě. Možnost integrace a sjednocení železničních sítí a bezpečnostních požadavků mezi státy umožňuje vyšší využití a zvyšuje konkurenci schopnost železniční dopravy oproti ostatním přepravním odvětvím. Rozvoj železnice klade důraz zvýšení rychlosti železniční přepravy a zajištění vyšší spolehlivosti. Tyto změny jsou však velmi náročné i z pohledu dodržení veškerých bezpečnostních náležitostí.

1.1 Požadavky na bezpečnost železniční dopravy

Legislativní zabezpečení požadavků na bezpečnost železniční dopravy je zajištěno ve Vyhlášce ministerstva dopravy č. 177/1995 Sb., kterou se vydává stavební a technický řád drah [6]. Tato vyhláška zahrnuje popis těchto oblastí [6]:

- technické podmínky členění železničních drah, způsob označení a zabezpečení křížení železničních drah s pozemními komunikacemi, rozsah a podmínky technicko-bezpečnostní zkoušky a zkušebního provozu drah a technické podmínky styku drah,
- součásti dráhy, technické podmínky a požadavky pro stavbu dráhy a stavby na dráze a technické podmínky provozuschopnosti dráhy celostátní, dráhy regionální a vlečky,
- součásti dráhy, technické podmínky a požadavky pro stavbu dráhy a stavby na dráze a technické podmínky provozuschopnosti dráhy speciální,
- součásti dráhy, technické podmínky a požadavky pro stavbu dráhy a stavby na dráze a technické podmínky provozuschopnosti dráhy tramvajové,
- součásti dráhy, technické podmínky a požadavky pro stavbu dráhy a stavby na dráze a technické podmínky provozuschopnosti dráhy trolejbusové,

- součásti dráhy, technické podmínky a požadavky pro stavbu dráhy a stavby na dráze a technické podmínky provozuschopnosti dráhy lanové.

Dle §2 této vyhlášky je stanovena prostorová průchodnost celostátních drah pomocí tzv. *průjezdného průřezu* stanoveného podle technických norem:

- ČSN 73 6320 - Průjezdné průřezy na drahách celostátních, drahách regionálních a vlečkách normálního rozchodu,
- ČSN 73 6360 - 1 Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha. Část 1: Projektování,
- TNŽ 73 6388 - Prostorové uspořádání vrat nad kolejemi rozchodu 1435 mm a 1520 (1524) mm,
- ČSN 73 7509 - Průjezdný průřez metra.

U regionálních drah musí průjezdný průřez odpovídat obrysu drážního vozidla používaného na regionální dráze a obdobně je tomu tak u vlečky. Průjezdný průřez je v §1 vyhlášky [6] definován jako *obrys obrazce v rovině kolmé k ose koleje, jehož osa je kolmá ke spojnici temen kolejnic a prochází středem koleje a který vymezuje vzdálenosti vně ležících staveb, zařízení a předmětů od osy koleje a od spojnice temen kolejnic, kromě případů, kdy z funkčních důvodů musí dojít ke styku těchto zařízení s drážním vozidlem.*

Pomocí průjezdného průřezu můžeme definovat požadavky na přesnost určení polohy vlaků pomocí metod GNSS. Další z možností, jak určit mezní polohovou přesnost, je uvážení tzv. *mezní osové vzdálenosti* kolejí b_M dané normou ČSN 73 6320, která je v souladu s Mezinárodní železniční unií UIC (Union Internationale des Chemins de fer) [13].

Uvážíme-li, že nejmenší dovolená osová vzdálenost mezi osami kolejí je uváděna jako $b_M = 3750$ mm (odpovídá nejmenší dovolené osové vzdálenosti mezi kolejemi dvoukolejně širé trati [6]), potom můžeme polovinu této hodnoty označit jako mezní hodnotu polohové přesnosti GNSS $\Delta_M = b_M/2 = 1785$ mm. Budeme-li dále požadovat, aby byla polohová přesnost GNSS vyjádřena pomocí mezní směrodatné odchylky polohy σ_M s 95% intervalem spolehlivosti (a uvažujeme Gaussovo normální

rozdělení chyb), dostáváme užitím statistické teorie [7, 8]

$$\sigma_M = \frac{\delta_M}{1,96} = 911 \text{ mm.} \quad (1.1)$$

Pro maximální náklon tratě daný normou ČSN 73 6360-1, který je $D = 150 \text{ mm}$ (udává délku kratší z odvěsen pravoúhlého trojúhelníka s přeponou 1500 mm), dostáváme snadnou matematickou operací upravenou mezní hodnotu

$$\sigma_M = 906 \text{ mm.} \quad (1.2)$$

Se současnými technologiemi zpracování měření GNSS lze požadované přesnosti dané vztahem (1.2) dosáhnout.

Dále je nutno zajistit spolehlivé vyhodnocení polohy metodami GNSS, jestliže se přijímač bude pohybovat rychlostí odpovídající mezní dovolené rychlosti vlaků, která se v budoucnosti bude stále zvyšovat.

1.2 ERTMS - European Rail Traffic Management System

ERTMS (z angl. European Rail Traffic Management System) je mezinárodní projekt zajišťující vzájemnou kooperaci několika evropských států s cílem vytvoření jednotného standardu pro řízení provozu železniční dopravy [13, 14]. Skládá se z několika základních elementů:

- GSM-R (z angl. Global System for Mobile – Railway),
- ETCS (z angl. European Train Control System),
- ETML (z angl. European Traffic Management Layer).

Jak už samotný význam zkratky napovídá, GSM-R označuje komunikační sektor, který zajišťuje komunikaci mezi pohybujícími se prvky systému ERTMS se statickými kontrolními orgány. Dále je také prostředníkem přenosu informací samotného kontrolního drážního systému ETCS. GSM-R je založen na veřejném GSM standardu se specifickými modifikacemi pro drážní sektor, jako jsou například eMLPP

(Multi-Level Precedence and Pre-emption Service), VBS (Voice Broadcast Service), EC (Emergency Calls) a další [13, 14].

ETCS zastupuje úlohu kontroly jevů na železničních tratích ve smyslu revize pohybu jednotlivých entit, automatické ochrany vlaků před kolizemi, dále také zajišťuje postupnou redukci komplexních úkolů pro řidiče vlaků, a to např. automatizací kontrolních aktivit, signalizací v kabinách, přenosem informací na řídicí desky vlaků, permanentní kontrolou vlaků apod.

ETML je složkou plánovací a řídicí, která má na starost logickou optimalizaci dopravních spojů pomocí řízení a interpretace jízdních řádů a dat o jednotlivých vlacích. Zahrnuje zejména plánování v reálném čase a zajištění plynulosti dopravy.

1.2.1 ETCS - European Train Control System

Evropský vlakový zabezpečovací systém ETCS (European Train Control System) je budován za cílem nahrazení několika desítek různých národních vlakových systémů. Tím by mělo dojít k umožnění pohybu vlaků po celém území Evropy bez potřeby výměn hnacích systémů, které se pro různé státy mohou lišit, případně omezit nutnost mít vlaky osazeny více systémy, což značně zvyšuje náklady železniční dopravy.

První plánování systému započalo na konci devadesátých let [13, 14]. Evropská komise definovala směrnici pro globální strategii rozvoje železnic roku 1995 po pětileté výzkumné činnosti a od roku 2001, kdy začala platit evropská směrnice 2001/16/ES, jsou stanoveny zásady zavádění ETCS. Cílem je celková optimalizace logistických procesů na železničních tratích, jejich zabezpečení a unifikace technických zařízení.

Traťová část ETCS se skládá z několika komponent, které byly začleňovány do provozu postupně v rámci několika úrovní (tzv. Level 1 až Level 3 [13, 14]). Prvotní plány a technická řešení díky rychlému rozvoji současné techniky, zejména satelitního monitorování polohy a komunikačních možností, představují poměrně nákladné investice, a nabízí se tak myšlenka hledání alternativních, jednodušších a kvalitou stejných ne-li ideálnějších řešení, jako je například implementace GNSS systémů.

Mezi hlavní nevýhody patří omezenost propustnosti tratí se systémem první úrovně (ETCS L1). Zde je používáno bodové předávání informací [13, 14], a není

tak možné kontinuálně komunikovat s jedoucími vlaky. Další nevýhodou je použití GSM-R techniky v hustě osazených uzlech (nádraží, seřadiště, apod.). Zde je kapacita GSM kanálů omezena a je nutné zavádět úroveň L1. V neposlední řadě oponují výhodám interoperability ETCS vysoké náklady na zřizování systému, jelikož během procesu začleňování je nutné mít instalovány různé zabezpečovací systémy (jak národní, tak ETCS).

Myšlenka zabezpečení traťového provozu s pomocí GNSS představuje, co se týče nákladů na zřízení, několikanásobně levnější alternativu, a analýza možností a omezení určování polohy vlaků pomocí satelitních navigací je tedy v centru zájmu.

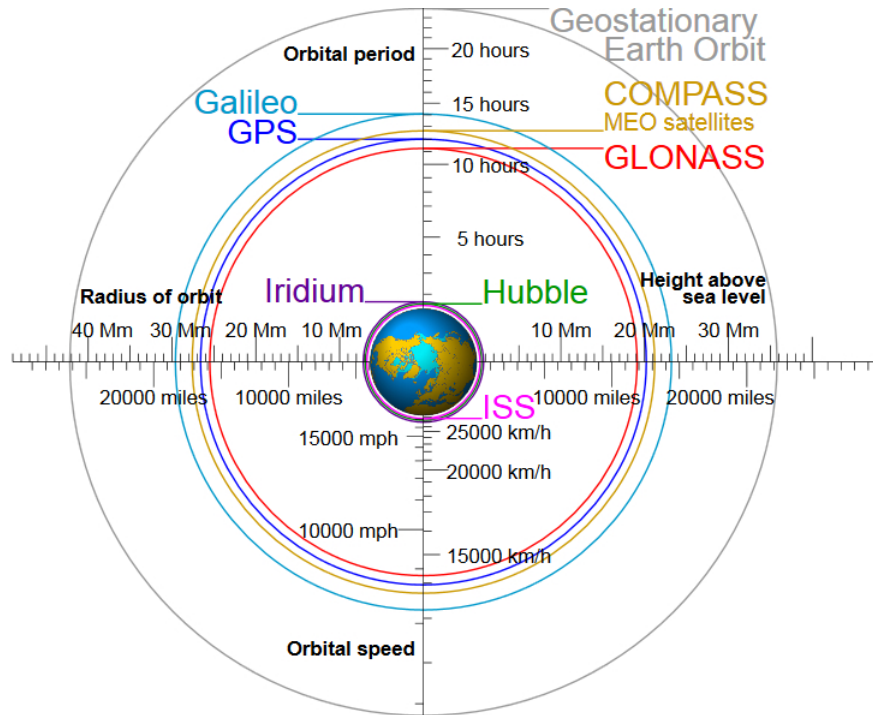
1.3 GNSS - Global Navigation Satellite System

Satelitní navigace je soustava satelitů a přijímačů, které vysílají a zpracovávají informace, které jsou dále použity pro lokalizaci polohy a navigaci po celém světě. Tzv. *pasivní* přijímače, které jsou používány nejvíce, nevysílají žádný svůj signál a dokáží elektromagnetické vlny zachytit a zpracovat. Návrh takového způsobu příjmu signálu byl z důvodu nevysledovatelnosti přijímacího zařízení. Dnes díky tomu může být přijímací modul integrován prakticky do jakéhokoliv zařízení díky malé velikosti. Využití satelitní navigace se velmi rychle rozšiřuje a kvalita určené polohové informace se neustále zpřesňuje. Základní přijímací zařízení svou cenou a rozměry dovoluje velmi široké využití a i takovéto zařízení určí polohu s přesností několika metrů.

Systém, který výše zmíněným signálem pokrývá většinu povrchu Země, lze nazvat globálním systémem. Odtud poté zkratka GNSS.

V době vzniku této práce jsou pouze dva systémy plně provozuschopné a splňují požadavek globálního systému. Jsou jimi NAVSTAR GPS, který spravují Spojené Státy Americké, a ruský systém GLONASS. Systém GPS je v plném provozu od ledna roku 1994, kdy bylo na oběžných drahách umístěno všech 24 družic pro plnou operační schopnost. Ruský GLONASS po úpadku z devadesátých let nabyt plného provozu opět v roce 2001. Mezi další významné navigační systémy pak zajisté patří vyvíjený evropský Galileo a čínský BeiDou-2. Na obr. 1.1 je schematicky zobrazeno

rozložení oběžných drah nejpoužívanějších navigačních systémů společně s dalšími významnými kosmickými zařízeními k porovnání.



Obr. 1.1: Porovnání orbitálních drah systémů GNSS

[19]

1.4 NAVSTAR GPS

Nejdéle funkčním globálním systémem je GPS. Většina jeho parametrů je dobře popsána v různých literaturách a jsou dobře dostupné [1, 2, 3, 10]. Proto je vhodné zabývat se možnostmi tohoto systému nejvíce.

1.4.1 Charakteristika systému

Navigační systém lze rozdělit do tří základních částí. Konstelace satelitů, síť pozemních kontrolních a řídicích stanic a veškerá přijímací zařízení uživatelů systému. Formálními termíny pro tyto tři části systému jsou *Kosmický*, *řídicí* a *uživatelský* segment.

Kosmický segment je část systému nalézající se ve vesmíru. Účelem tohoto segmentu je distribuovat signál a datové zprávy pro výpočet polohy do uživatelských zařízení. Patří sem veškeré družice, které jsou umístěné na šesti oběžných drahách s inklinací 55° k rovině rovníku. Družice obíhají Zemi ve výšce 20 190 km nad jejím povrchem. Rychlost, se kterou se družice pohybují na své dráze, je 11 300 km/h. Oběh celé Země trvá družici 11 hodin a 58 minut. Za jeden den oběhne družice Zemi dvakrát a její pozice se oproti předchozímu dnu liší o 4 minuty. Kosmický segment je navržen tak, že na každou oběžnou dráhu lze umístit pět družic s tím, že družice umístěné na 5. pozici jsou určeny jako záložní. K dosažení plné operační způsobilosti (FOC - Full Operational Capability) je zapotřebí 24 družic.



Obr. 1.2: Znárodnění oběžných drah systému GPS

[20]

Řídící segment (nebo kontrolní segment, CS - Control Segment) spravuje a kontroluje systém družic. To je možné díky monitorovacím stanicím, vysílačům a hlavnímu řídicímu středisku. Monitorovací stanice jsou rozmístěné rovnoměrně po obvodu Země většinou v blízkosti rovníku. Segment kontroluje provozní schopnost jednotlivých družic, korektnost vysílaného signálu, stav atomových hodin na palubě

družic a pozici na oběžných drahách ve vesmíru. Řídí případné korekce ve dráze letu družice, vysílání signálu a zajišťuje synchronizaci atomových hodin.

Uživatelský segment je tvořen přijímacími zařízeními, která jsou schopna přijmout a zpracovat signál z družic. Z informací o poloze a čase družice pak vypočítají polohu na Zemi, kde se zařízení nachází. Jedná se o pasivní přijímače, tedy o zařízení, která signál přijmou, dekodují, ale žádný nevysílají. Hlavním důvodem volby pasivního přijímače je neschopnost takové zařízení zaměřit, podmětem byl zřejmě vývoj pro vojenské účely. V dnešní době díky modernizaci a cenově dostupným zařízením přibývá uživatelů navigačních systémů. S tím je spojena další výhoda pasivních zařízení, která nemusí komunikovat s družicí, tím nezatěžují systém, a počet uživatelů takového systému je neomezený.

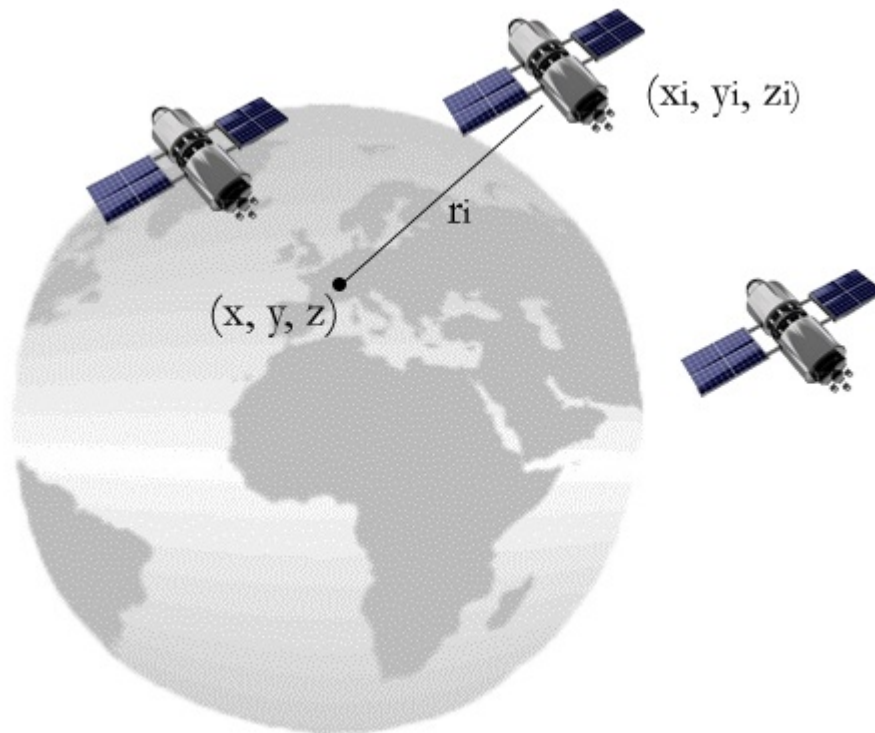
1.4.2 Princip určování polohy

Prostorovou polohu přijímače lze určovat z měření GNSS různými způsoby. Nejsnazším je tzv. *dálkoměrná metoda* [1, 2, 3], která využívá zpracování poměrně běžně a snadno dostupných kódových měření. Jednoduchost je ovšem vyvážena nižší přesností dosažených výsledků. Jako další postupy jmenujme např. výpočet pomocí dvojitých diferencí [1, 2, 3], zpracování fázových měření [1, 2, 3] nebo metodu Precise Point Positioning (PPP) [9].

Ukažme nyní na příkladu zpracování kódových měření princip určení prostorové polohy z měření GNSS s využitím jednoho přijímače pomocí metody dálkoměrného pasivního určení polohy. Význam pasivity byl vysvětlen výše v kapitole 1.4.1. Principem je určení vzdáleností r_i od jednotlivých družic k přijímači přepočtem z doby τ_i potřebné k překonání této vzdálenosti signálem šířícím se rychlostí c . Schematicky je situace zobrazena na obr. 1.3. Na průsečíku kulových sfér s poloměrem r_i se pak nachází anténa přijímacího zařízení. Pro určení polohy v prostoru (tří souřadnic v inerciálním souřadném systému) je obecně zapotřebí tří souřadnic. V družicové navigaci by to odpovídalo znalosti polohy tří družic a měření vzdáleností od nich, které jsou vyjádřeny vztahem

$$r_i = \tau_i c = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} . \quad (1.3)$$

Inverzním postupem pak lze určit souřadnice přijímače.

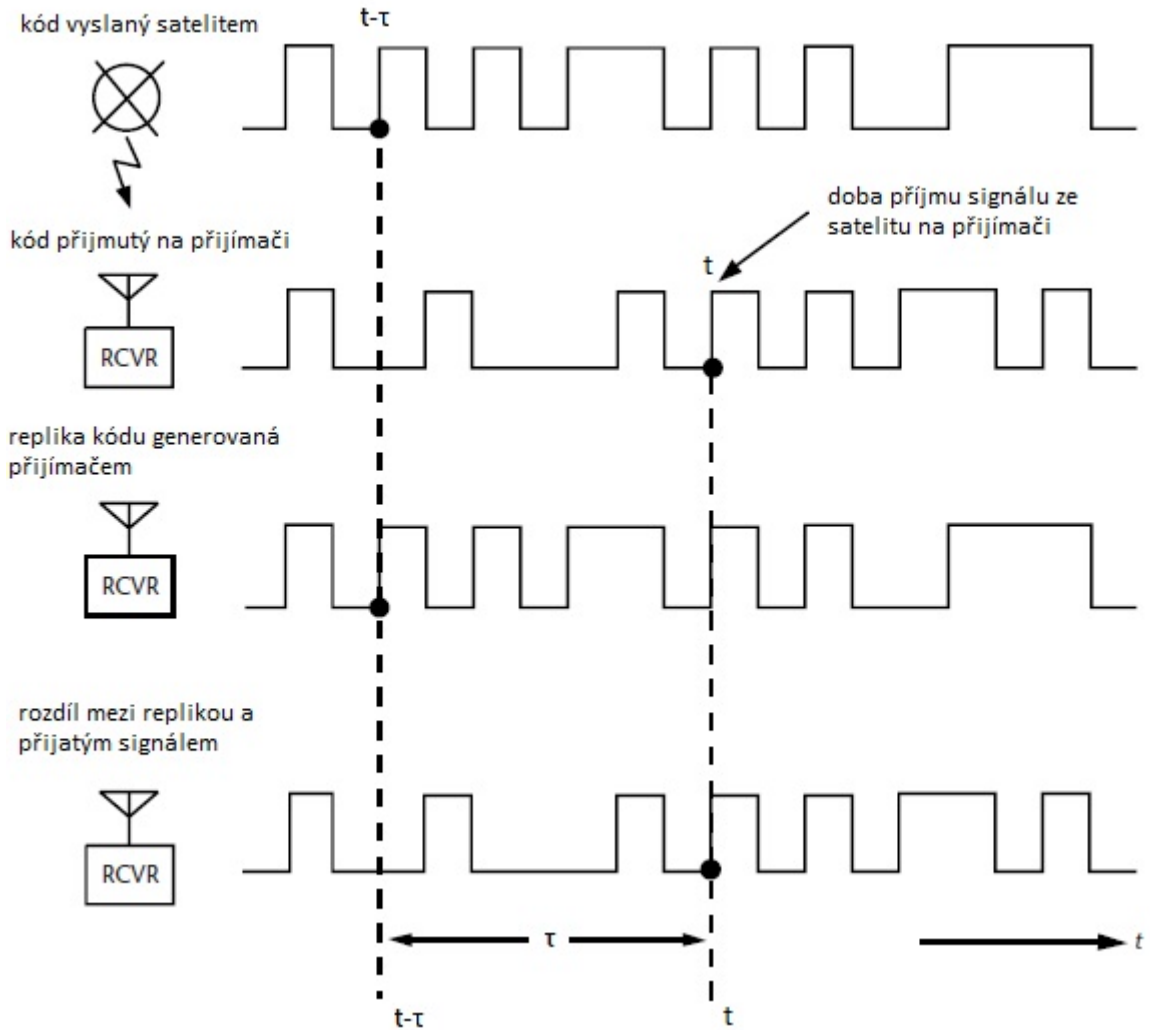


Obr. 1.3: Schematické znázornění měření pseudovzdálenosti

Doba potřebná k přenosu signálu se měří pomocí zpoždění kódu pseudonáhodné posloupnosti vyslané družicí [1, 2, 3]. Schematicky je proces znázorněn na obr. 1.4. V uživatelském přístroji je generována replika stejného kódu. V čase t je družicový signál přijat a porovnán s touto replikou. Přijatý signál je od repliky kódu zpožděn právě o dobu τ_i , potřebnou k překonání vzdálenosti mezi i -tou družicí a přijímačem.

Bohužel v reálném řešení dálkoměrné polohy nastává problém se synchronizací časové základny systému, satelitu a uživatelského přístroje. Každá družice je vybavena atomovými hodinami, které zaručují velice přesný čas, ten je navíc monitorován pozemními stanicemi a doladován, takže odchylka času satelitu je poměrně malá. Naproti tomu uživatelské zařízení musí být cenově dostupné, a tak není možné, aby bylo vybaveno takto přesným zdrojem času. Do rovnic pro určení polohy je tedy potřeba započítat i časový posun zařízení od systémového času.

Pokud byl signál přijat v čase t a k překonání skutečné vzdálenosti je potřeba času τ_i , pak $t_{si}(t - \tau_i)$ je doba vyslání signálu naměřená i -tou družicí a $t_u(t)$ je doba



Obr. 1.4: Určení zpoždění signálu přenosem [2]

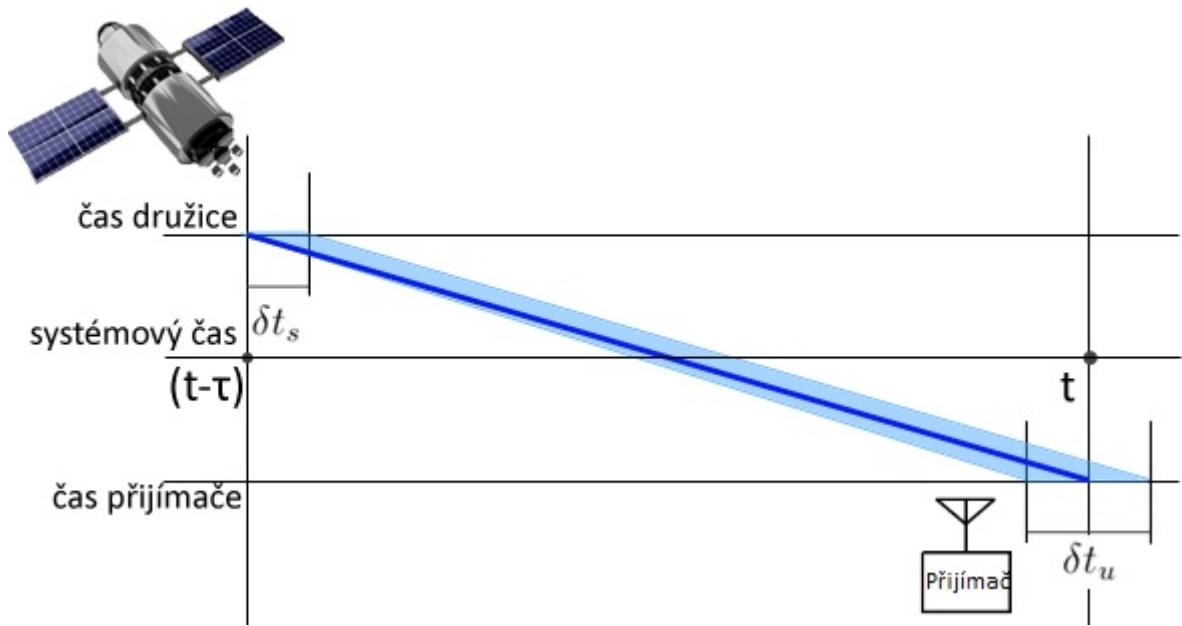
přijmutí signálu naměřená přijímačem. Při odečtení těchto dvou časů a převedením na vzdálenost je výsledkem tzv. pseudovzdálenost d_i , pro kterou platí [1]

$$d_i = c(t_u(t) - t_{si}(t - \tau_i)) . \quad (1.4)$$

Časy naměřené různými přístroji se dají převést na systémový čas pomocí [1]

$$\begin{aligned} t_u(t) &= t + \delta t_u(t) , \\ t_{si}(t - \tau_i) &= (t - \tau_i) + \delta t_{si}(t - \tau_i) , \end{aligned} \quad (1.5)$$

kde $\delta t_u(t)$ je časová nepřesnost přijímače a $\delta t_{si}(t - \tau_i)$ časová nepřesnost i -té družice schematicky zobrazená na obr. 1.5.



Obr. 1.5: Časový posuv zařízení vůči systémovému času

Dosazením do (1.4) poté dostáváme

$$\begin{aligned} d_i &= c \cdot (t + \delta t_u - ((t - \tau_i) + \delta t_{si}(t - \tau_i))) \\ &= c \cdot \tau_i + c \cdot \delta t_u(t) - c \cdot \delta t_{si}(t - \tau_i) . \end{aligned} \quad (1.6)$$

Dosadíme-li nyní z rovnice (1.3) do (1.6), dostáváme

$$d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} + c \cdot \delta t_u(t) - c \cdot \delta t_{si}(t - \tau_i) . \quad (1.7)$$

Vztah (1.7) představuje základní rovnici pozorování pro výpočet polohy přijímače. Známe-li polohy dostatečného množství družic (x_i, y_i, z_i) , opravy hodin δt_u a δt_{si} , rychlost šíření signálu c a měříme-li pseudovzdálenost d_i , poté můžeme vyrovnaním např. metodou nejmenších čtverců (MNČ) [7, 8] určit polohu přijímače (x, y, z) .

Model měření (1.7) nezahrnuje další vlivy, které ovlivňují měřené pseudovzdálenosti d_i , jako například ionosférickou a troposférickou refrakci, dopplerovské zpoždění signálu apod. [1, 2, 3]. Pro alespoň částečnou eliminaci těchto jevů jsou využívány již výše zmíněné metody např. zpracování fázových měření, metoda dvojích diferencí nebo PPP.

Ukažme nyní postup výpočtu polohy přijímače z modelové situace (1.7) vyrovnáním metodou nejmenších čtverců [7, 8]. Označme pro přehlednost výpočtu odmocninu na pravé straně rovnice (1.7) jako $r_i(x, y, z)$ a předpokládejme znalost přibližných pozic přijímače (x_0, y_0, z_0) , dostatečně přesnou znalost opravy hodin satelitu δt_{si} a polohu satelitu (x_i, y_i, z_i) . Poté Taylorovým rozvojem [7] $r_i(x, y, z)$ se zanedbáním členů vyšších než lineárních můžeme psát

$$d_i = r_i(x_0, y_0, z_0) + \frac{\partial r_i(x_0, y_0, z_0)}{\partial x} dx + \frac{\partial r_i(x_0, y_0, z_0)}{\partial y} dy + \frac{\partial r_i(x_0, y_0, z_0)}{\partial z} dz + c \cdot \delta t_u(t) - c \cdot \delta t_{si}(t - \tau_i) . \quad (1.8)$$

Tzv. *rovnice oprav* [8] vyrovnání MNČ následně můžeme zapsat ve tvaru

$$\epsilon_i = r_i(x_0, y_0, z_0) + \frac{\partial r_i(x_0, y_0, z_0)}{\partial x} dx + \frac{\partial r_i(x_0, y_0, z_0)}{\partial y} dy + \frac{\partial r_i(x_0, y_0, z_0)}{\partial z} dz + c \cdot \delta t_u(t) - c \cdot \delta t_{si}(t - \tau_i) - d_i . \quad (1.9)$$

Předpokládáme-li měření na m družic, lze situaci zapsat maticově vztahem

$$\boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{A} \mathbf{d} \mathbf{x} - \mathbf{l} , \quad (1.10)$$

kde \mathbf{A} je matice soustavy daná jako

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial r_1(x_0, y_0, z_0)}{\partial x} dx & \frac{\partial r_1(x_0, y_0, z_0)}{\partial y} dy & \frac{\partial r_1(x_0, y_0, z_0)}{\partial z} dz & 1 \\ \frac{\partial r_2(x_0, y_0, z_0)}{\partial x} dx & \frac{\partial r_2(x_0, y_0, z_0)}{\partial y} dy & \frac{\partial r_2(x_0, y_0, z_0)}{\partial z} dz & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial r_m(x_0, y_0, z_0)}{\partial x} dx & \frac{\partial r_m(x_0, y_0, z_0)}{\partial y} dy & \frac{\partial r_m(x_0, y_0, z_0)}{\partial z} dz & 1 \end{pmatrix} ,$$

$\boldsymbol{\epsilon} = (\epsilon_1, \dots, \epsilon_m)^T$ je vektor chyb, $\mathbf{d} \mathbf{x} = (dx, dy, dz, c \cdot \delta t_u(t))^T$ je vektor přírůstků a matice

\mathbf{l} je dána jako

$$\mathbf{l} = \begin{pmatrix} c \cdot \delta t_{s1}(t - \tau_1) - r_1(x_0, y_0, z_0) + d_1 \\ c \cdot \delta t_{s2}(t - \tau_2) - r_2(x_0, y_0, z_0) + d_2 \\ \vdots \\ c \cdot \delta t_{sm}(t - \tau_m) - r_m(x_0, y_0, z_0) + d_m \end{pmatrix}$$

Z podmínky MNČ na minimalizaci sumy čtverců oprav (1.9) můžeme s využitím maticové formulace psát pro vyrovnané hodnoty oprav (přírůstků) parametrů $\hat{\mathbf{x}}$ následující vztah [7, 8]:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{l} . \quad (1.11)$$

Vyrovnané hodnoty parametrů poté budou dány jako

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_0 + d\hat{\mathbf{x}} , \quad (1.12)$$

kde \mathbf{x}_0 značí vektor počátečních přibližných hodnot polohy a opravy hodin přijímače, $\mathbf{x}_0 = (x_0, y_0, z_0, 0)^T$. Z důvodu linearizace modelu (1.7) je třeba výpočet provádět iterativně, než se vyrovnané hodnoty hledaných parametrů v jednotlivých krocích iterace nebudou lišit o více než zvolenou tolerovanou hodnotu.

Výše uvedené vyrovnaní MNČ nemusí vždy nalézt správné řešení, resp. nemusí vždy iterovat ke skutečným správným výsledkům. Výpočet je závislý na volbě počátečních parametrů polohy. Dále může být také v některých případech numericky nestabilní a je třeba volit různé regularizační přístupy vyrovnaní. Pro daný účel nastínění principu určení polohy a její přesnosti pomocí GNSS nám ale výše popsaný postup postačuje.

Na druhou stranu má kromě numerických komplikací přístup MNČ výhodu, a to ve snadné implementaci dalších vyrovnaných parametrů, které mohou sloužit ke zpřesňování výsledné polohy. Tohoto snadného přístupu využívá např. PPP metoda [9], kde zadáním a vyrovnaním dalších parametrů, např. ionosférických korekcí, může dosáhnout s použitím pouze jednoho přijímače přesnosti v poloze v řádu centimetrů.

Pomocí postupu vyrovnaní parametrů MNČ, který byl představen, lze názorně ukázat charakteristiky přesnosti, které se při použití GNSS používají. Jak je známo z teorie metody nejmenších čtverců, bude kovarianční matice vyrovnaných parametrů $\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}}$ určených pomocí vztahu (1.12) dána jako [8]

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}} = \sigma_0^2 \mathbf{Q} = \sigma_0^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} , \quad (1.13)$$

kde σ_0 tzv. *jednotková směrodatná odchylka* a \mathbf{Q} je tzv. *matice kofaktorů* [8]. Jednotková směrodatná odchylka zde má funkci konstanty, která může být apriorně volena nebo aposteriorně odhadována dle vztahu $\hat{\sigma}_0^2 = (\mathbf{A}d\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{1})^T (\mathbf{A}d\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{1}) / n'$ [8], kde n' značí počet nadbytečných měření vstupujících do vyrovnaní MNČ. Matice kofaktorů charakterizuje vnitřní přesnost vyrovnaní. Jak je známo ze statistické teorie s aplikací na vyrovnaní MNČ [7, 8], kovarianční matice určená vztahem (1.13) obsahuje na své diagonále čtverce směrodatných odchylek vyrovnaných parametrů, čili charakteristiky rozptylů polohy v průmětu do souřadných os inerciálního systému použitého

v GNSS společně s charakteristikou rozptylu opravy hodin přijímače násobeného rychlostí šíření signálu c . Mimo diagonálu budou umístěny variance charakterizující vzájemnou závislost jednotlivých parametrů. Symbolicky můžeme význam kovarianční matice (1.13) zapsat jako

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}} = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \text{Var}(x, y) & \text{Var}(x, z) & \text{Var}(x, c \cdot \delta t_u) \\ \text{Var}(x, y) & \sigma_y^2 & \text{Var}(y, z) & \text{Var}(y, c \cdot \delta t_u) \\ \text{Var}(x, z) & \text{Var}(y, z) & \sigma_z^2 & \text{Var}(z, c \cdot \delta t_u) \\ \text{Var}(x, c \cdot \delta t_u) & \text{Var}(y, c \cdot \delta t_u) & \text{Var}(z, c \cdot \delta t_u) & \sigma_{c \cdot \delta t_u}^2 \end{pmatrix}. \quad (1.14)$$

V GNSS je vnitřní přesnost určování polohy vyjádřena DOP parametry, z angl. *Dilution of Precision* [3]. Porovnáním vztahu (1.13) a (1.14) je patrné, že matice kofaktorů \mathbf{Q} nese také informaci o vnitřní přesnosti určení polohy, ovšem je nezávislá na hodnotě jednotkové směrodatné odchylky. DOP parametry jsou určovány právě z diagonály matice kofaktorů. Označíme-li symbolicky

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & Q_{14} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & Q_{24} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & Q_{34} \\ Q_{41} & Q_{42} & Q_{43} & Q_{44} \end{pmatrix}, \quad (1.15)$$

potom jsou jednotlivé definované DOP parametry dány vztahy dle Tab. 1.

Tab. 1.1: DOP parametry určování polohy pomocí GNSS [3].

GDOP	Geometrický DOP (Geometric DOP)	$\text{GDOP} = \sqrt{Q_{11} + Q_{22} + Q_{33} + Q_{44}}$
PDOP	Polohový DOP (Position DOP)	$\text{PDOP} = \sqrt{Q_{11} + Q_{22} + Q_{33}}$
HDOP	Horizontální DOP (Horizontal DOP)	$\text{HDOP} = \sqrt{Q_{11} + Q_{22}}$
VDOP	Vertikální DOP (Vertical DOP)	$\text{VDOP} = \sqrt{Q_{33}}$
TDOP	Časový DOP (Time DOP)	$\text{TDOP} = \sqrt{Q_{44}}$

2 Vybrané parametry ovlivňující kvalitu polohové informace

Družicová navigace a její použití je v konkrétních aplikacích limitováno množstvím parametrů, které ovlivňují přesnost a kvalitu zpracování signálu. Níže vypsané parametry byly vytipovány jako zásadní pro použití ve vlakové navigaci s ohledem na bezpečnostní požadavky viz kapitola 1.1. Simulovaná měření kladou na přijímač nároky, které odpovídají reálnému použití. Dále bylo sledováno chování přijímače po překročení těchto podmínek. Účelem bylo hledání krajní meze, kdy již informace o poloze není dostatečně přesná, nebo přístroj přestane udávat informace úplně.

2.1 Akvizice signálu a citlivost přijímače

V této části jsou popsány stavy obecného GNSS přijímače, ve kterých se může nacházet při započítí získávání dat z přijímaného signálu. Tyto stavy lze popsat množstvím informace, které přijímač má uložené v paměti o rozmístění družic na oběžných drahách. Množství informace ovlivní čas, za který se přijímač dostane do fáze sledování signálu a začne s výpočtem a určením polohové informace. Tento čas se v družicové navigaci uvádí pod termínem *akvizice signálu*.

Charakteristika akvizičního času může být vyjádřena jako doba hledání a zachycení signálu. Prohledávání prostoru je závislé na pseudonáhodné posloupnosti (PRN - z angl. *PseudoRandom Sequence*) a zachycení a synchronizaci přijímače se systémovým časem. Dále poté frekvenční kompenzaci a zpoždění přijímaného kódu.

Doba hledání se liší podle výchozích informací, které jsou přijímači dostupné. Množství informace, kterou má přijímač v určitou dobu, nelze specifikovat obecně, stejně jako nelze stanovit jak přijímač známá data zpracovává. A tak pro uchopení tohoto parametru může být doba akvizice jako čas potřebný pro získání signálu po ztrátě a obnovení napájení přijímače.

Nyní lze popsat stavy přijímače s ohledem na množství informace, kterou má k dispozici. Tato data, která má přijímač v daném stavu, shrnuje tab. 2.1

Tab. 2.1: Popis stavů přijímače pro akvizici signálu [4].

	odhad PVT fix	almanach ¹	efemeridy ²	sledování pozice
Cold start	X	X	X	X
Warm strat	Y	Y	X	X
Hot strat	Y	Y	Y	X
Re-akvizice	Y	Y	Y	Y

Zmíněné stavy lze nazvat procedurou akvizice, kdy na začátku této procedury přijímač nesleduje žádný satelitní signál. To znamená neudává polohovou informaci. V průběhu procedury dojde k zachycení signálu a výpočtu polohové informace. Pokud se při warm/hot startu nebo při re-akvizici přístroje objeví nový satelit, lze dobou akvizice popsat i zpracování signálu od tohoto nového satelitu, dojde k přesnějším výpočtu polohové informace. Během takového stavu dokáže přijímač udávat během akvizice nově přijímaného satelitu i polohu z předchozích informací [4].

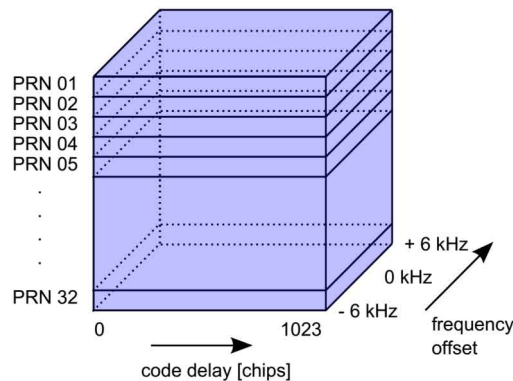
Doba výpočtu polohy a její přesnost je tedy závislá na počtu viditelných satelitů. Vstupní informace uvedené v tabulce se svou dostupností liší pro každou proceduru zvlášť. Zmíněné procedury pokrývají stavy, které mohou nastat u přijímače v běžném použití.

Cold Start Přijímač nemá žádné informace o předchozí polohové informaci. Almanach a efemeridy jsou neplatné. Prohledávání prostoru je tedy závislé na všech třech parametrech viz obr. 2.1. Pokud je během akvizice zachycen nějaký satelitní signál, lze z informace kterou nese (almanach) použít data k ostatním satelitům pro další prohledávání prostoru, a tím tak zkrátit dobu potřebnou pro udání polohové informace. Informace nesená v almanachu je platná sedm dní [2]. Cold startem tedy

¹Zpráva nesoucí redukovanou informaci o poloze a dráze ostatních satelitů v konstelaci systému. Obsahuje až 7 z 15 orbitálních parametrů obsažených v přesnějších zprávách - efemeridách. Využívá se pro predikci polohy a nalezení ostatních družic systému. Taková predikce je platná 7 dní [2].

²Zpráva obsahuje přesné informace o poloze a rychlosti družice. Výpočet těchto informací se provádí pomocí oskulačních Keplerových elementů. Tento výpočet však není pro požadovanou přesnost dostatečný, a tak musí být zpráva nesená družicí aktualizována s poměrně vysokou frekvencí jednou za 4 hodiny.

nazýváme proceduru, kdy je v paměti přijímače zjištěna aktuální verze almanachu starší sedmi dnů. (Např.: přístroj byl zapnutý po nečinnosti delší sedmi dnů). Akvizice cold start však nastává i při výrazné změně pozice (přes 100 km) či změně přijímaného času (chyba > 20 s) [4]. Obdobná situace lze simulovat odpojením přístroje od napájení či návratem přístroje do továrního nastavení.



Obr. 2.1: Vyhledávací prostor pro akvizici signálu při cold startu

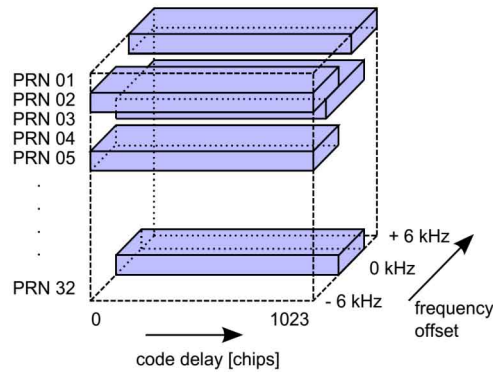
[4]

Warm Start Přijímač má k dispozici odhad polohové informace z předešlého sledování signálu. V takovém případě je platná informace almanachu (nebyl-li přístroj vypnutý po delší dobu 7 dnů). Tuto informaci může přístroj využít k redukci prohledávaného prostoru. Tím dosáhne konstelace satelitů a určí které jsou viditelné. Pro určení polohy však musí z viditelných satelitů získat přesnou zprávu o poloze, kterou každý z nich nese (efemeridy) [4].

Doba takovéto procedury je kratší díky známé konstelaci a zmenšení prohledávaného prostoru a vyhledávání dalších potřebných satelitů je méně náhodné.

V případě, že je však předchozí pozice neplatná, korekce takové informace polohy nemůže být kratší než procedura cold startu. Akvizice by trvala déle. Kompletní aktuální data almanachu potřebné pro takovouto proceduru se získávají z družice 12,5 min. V takovém případě je výhodnější určení polohové informace od počátku [2, 4]. Hlavní rozdíl mezi warm startem a cold startem je, že přijímač využije rozložení družic na obloze a jejich viditelnost z odhadované pozice viz obr. 2.2 [4].

Proceduru lze využít pro jeden satelit. Typickým příkladem je dosažení viditelnosti nového satelitu na horizontu. Přijímač z almanachu zná predikci polohy nového satelitu a lehce určí jeho Dopplerův posun. To pak slouží ke zpřesnění výpočtu polohové informace.



Obr. 2.2: Vyhledávací prostor pro akvizici signálu při warm startu

[4]

Hot Start V takovém stavu, kdy přijímač má k dispozici platné zprávy almanach i efemeridy, lze proceduru zkrátit pouze na výpočet aktuální pozice. Přijímač nemusí aktualizovat zprávu o rychlosti a poloze družice a dekódovat ji. Proceduru lze využít pro jeden satelit. Typickým příkladem je dosažení viditelnosti nového satelitu, který byl blokován terénem či zástavbou. Přijímač se chvilkově zastíněný satelit neustále snaží zahrnout do výpočtu polohy. Díky tomu se po navázání viditelnosti v krátkém čase do výpočtu zahrne a může dojít ke zpřesnění určení [4].

Re-Acquisition Takovýto stav nastane při zablokování signálu od družice na velmi krátkou dobu (řádově sekundy až minuty v závislosti na kvalitě oscilátoru v přijímači). Almanach i efemeridy jsou známé a stále platné. Rozdíl mezi re-akvizicí a hot startem je, že při re-akvizici nedochází ke ztrátě sledovaných veličin během krátkého výpadku [4].

Citlivost přijímače Doba akvizice je závislá na citlivosti přijímače. Se snižujícím se výkonem přijímaného signálu se doba akvizice prodlužuje. Lze také sledovat

pravděpodobnost výpočtu polohy za určitou dobu při snižování úrovně přijatého signálu.

2.2 Mnohacestné šíření

Modernizací a rozšiřováním systémů GNSS se daří redukovat velké množství zdrojů chyb, které mají vliv na zpracování příchozího signálu. Jedním významným zdrojem chyby a nepřesností ve družicové navigaci je mnohacestné šíření.

Mnohacestné šíření vzniká odrazem či difrakcí signálu (např. průchodem mraky, odrazem od hor, skal apod.) a sečtením takto odražené vlny s vlnou příchozí v místě přijímače. Odražená část z jiného směru má oproti přímo se šířící vlně zpoždění a její amplituda je menší. Zpoždění vzniká delší trasou, kterou musí elektromagnetická vlna uletět oproti přímé vlně. Pokles výkonu je pak způsoben rozložením energie do více směrů šíření. Dnešní přijímače si s odraženou vlnou s větším zpožděním snadno poradí. Například pokud je zpoždění odražené vlny dvakrát delší, než je perioda kódového symbolu [2]:

$$\Delta t_{delay} = 2 \cdot t_{code\ bit} . \quad (2.1)$$

Odrazy od blízkých předmětů, či ploše odražené vlny od předmětů vzdálených, se s přímou vlnou sčítají s malým zpožděním (cca 10-100 ns) a nejsou rozpoznány. Tím je narušena korelace mezi přijímaným signálem a replikou signálu generovanou v přijímači. Dále je rušen příjem fáze přijatého signálu, tím je narušen výpočet pseudovzdálenosti a nosné fáze. Ve výsledku jde o chybu určení pozice, rychlosti a času [1, 2]. Chybu může dále generovat i výkon a změna fáze v závislosti na směru, ze kterého se odražená vlna signálu šíří. Avšak nepřesnost, která je způsobena takto, je v porovnání s rušením způsobeným zpožděním odraženého signálu malá [2].

2.3 Dynamické změny polohy přijímače

Dynamické změny polohy přijímače zahrnují veškeré změny v umístění antény přístroje, které mohou mít za následek při překročení mezních hodnot výpadek přijímaného signálu po určitý časový okamžik, a tedy nemožnost kontinuálního určení

polohové informace. V krajním případě může dojít až k takovým rychlostem nebo zrychlením změn, při kterých nebude již možné určit polohu přístroje s dostatečnou přesností. Pro dynamické procesy, kde je třeba určovat polohu s určitou přesností, je nutné určit mezní parametry, při kterých bude možné zaručit dostatečnou kvalitu polohové informace.

2.4 Elektromagnetické rušení

Rušení elektromagnetických vln navigačního GNSS signálu může být způsobeno různými rušivými zdroji. Popis takového rušení zahrnuje velmi komplexní oblast. Rušivé elementy lze shrnout v do následujících skupin s ohledem na zaměření práce [4]:

- rušení přímo od vlakové soupravy (např. rušení napájecím signálem lokomotivy - harmonickým průběh),
- neúmyslné radiofrekvenční venkovní rušení (pozemní televizní vysílání, telekomunikační síť jako LTE, a další),
- úmyslné rušení.

Rušení způsobené vlakovou soupravou je velice problematická část. Takové rušení není prozatím korektně popsáno a nejsou dosud známy metody, jak ho změřit a kvalitativně zhodnotit [4].

Jak je řečeno v [4], problém neúmyslného rušení radiofrekvenčním signálem byl dobře popsán pro letecký průmysl. V posledních letech bylo rušení GNSS způsobené interferencemi studováno mezinárodní komunitou speciálně pro potřeby komerčního využití. Vzhledem k podmínkám železničního provozu lze předpokládat, že přístup využitý v leteckém sektoru lze aplikovat i v sektoru železničním jako výchozí bod nutných podrobných studií.

2.5 Návrh metodiky měření vybraných parametrů

Akvizice Pro měření doby zachycení signálu je zapotřebí nastavit přijímač do stavu bez jakékoliv předchozí informace. Taková doba akvizice je při dané konstelaci a viditelnosti družic mezní. Dosažení výchozího stavu přijímače pro měření akvizice signálu lze dosáhnout dvojím způsobem. Přímou ovládním přijímače, kdy lze přes ovládací prostředí nechat přijímač smazat veškerá data. Druhou možností je ovládat ztrátu informace externě. Informace může být ztracena pomocí resetování přijímače, vypnutí a zapnutí napájení přijímače, či zabránění příjmu signálu GNSS. Po obnovení příjmu signálu přijímačem lze měřit dobu, od tohoto navázání do okamžiku, kdy přijímač zpracuje přijímaný signál a započne fáze sledování.

Citlivost Tento parametr silně ovlivňuje čas potřebný k akvizici signálu. V laboratorním prostředí a při generování GNSS signálu lze snadno snížit výkon signálu. Nastavením generátoru či zapojením útlumového prvku do signálové cesty. Tím lze sledovat citlivost přijímače a najít mezní hodnotu úrovně signálu, při které již přijímač signál nezachytí.

Mnohacestné šíření Simulaci mnohacestného šíření lze realizovat laboratorně pomocí generátoru GNSS signálu. Generátor musí umožnit nastavení zpoždění přijímaného signálu alespoň s přesností doby jednoho chipu³. Dále je vhodné nastavení zatlumení odražené vlny. Takovýmto způsobem pak lze generovat mnohacestné šíření, které nedokáže přijímač odfiltrout. Můžeme poté sledovat chování přijímače a přesnost určených veličin v závislosti na zpoždění a výkonu odraženého signálu.

Dynamické změny polohy přijímače Zrychlující se pohyb lze simulovat generátorem GNSS signálu. Pokud generátor umožňuje nastavení změny polohy v čase, lze nasimulovat pohyb přijímače na povrchu Země. Vhodný pohyb je například kružnicový, který lze matematicky popsat, a jeho průmět do jedné souřadnicové osy lze snadno vyhodnotit. Rozměr kružnice musí být dostatečně veliký (cca 10-100 m). Při pohybu po kružnici malých rozměrů nastává riziko, že rozměr kružnice bude menší

³Perioda bitu PRN sekvence, pro GPS $t_{chip} = 1/1023$ ms.

než chyba určení polohové informace. Cílem tohoto měření by mělo být zjištění mezních podmínek při pohybu přijímače, za kterých jsou vnitřní zpětnovazební obvody schopny sledovat družicový signál a vyhodnocovat informaci o poloze. Matematický popis zpětnovazebních systémů (FLL/PLL/DLL) je popsán v [2]. Pro test je důležité simulovat zrychlený pohyb. Podle [4] je maximální uvažované zrychlení pro přijímač v použití pro vlakovou navigaci 3 ms^{-2} .

Elektromagnetické rušení Jak bylo uvedeno již výše, vliv elektromagnetického rušení na chování přijímače a kvalitu přijímaného signálu, z něhož je určována polohová informace, je komplexní problém. Pro jeho důkladnou analýzu bude zapotřebí zkoumání širokého souboru statisticky významných dat získaných z dlouhého období experimentálního pozorování. Podkladem mohou být dříve prováděné studie v oblasti leteckého průmyslu, kde byl již problém v minulosti analyzován.

3 Přijímací zařízení uBlox EVK-6T

Ublox EVK-6 (Evaluation Kit) je modul s GPS přijímačem. Lze jej nastavit a ovládat pomocí softwaru s uživatelským rozhraním u-Center. Konfigurační a obslužné příkazy mají stejnou strukturu jako samotné zprávy, pomocí nichž jsou přenášeny data s informacemi o přenášených parametrech důležitých k výpočtu polohy, rychlosti a dalších veličin navigace. Díky těmto konfiguračním zprávám lze přijímač ovládat a vyčítat z něj veškeré přijaté a zpracované informace. Komunikace probíhá pomocí dvou druhů zpráv NMEA a UBX. Data v této práci byla získána pomocí binárního protokolu UBX (UBX zprávy), který bude popsán níže. Oba druhy zpráv jsou detailně popsány v dokumentaci protokolu vydané výrobcem zařízení [12].

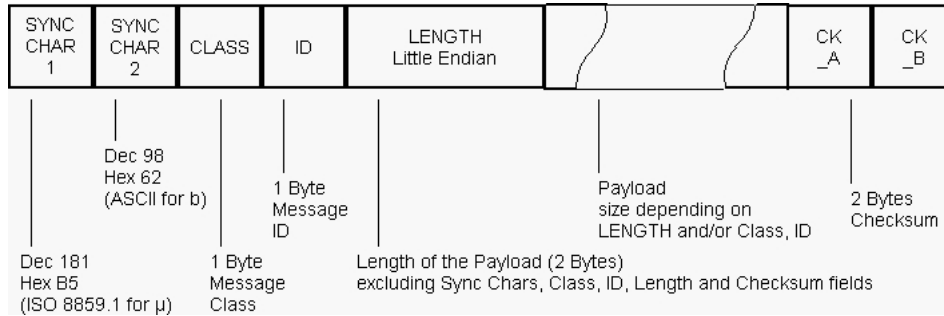
3.1 Protokol UBX

Jedná se o binární protokol, který byl navržen ke komunikaci mezi GPS přijímačem EVK-6T a ovládacím počítačem, na kterém je instalován požadovaný software u-Center. Program umí z dat přijatých od přijímače vypočítat polohu a další uživatelské parametry, ale hlavně zobrazit a exportovat konkrétní přijatá data před zpracováním. Komunikace mezi řídicím počítačem a přijímačem probíhá po sériovém rozhraní RS-232 [16].

3.2 Struktura kódu uBlox

Základním stavebním prvkem protokolu jsou 8-bitová slova pomocí nichž komunikuje. Ze slov jsou tvořeny zprávy nesoucí konkrétní informaci. Jednotlivé zprávy obsahují různý počet slov dle potřeb velikosti přenášené informace. Z těchto informačních zpráv je sestaven paket, který dále obsahuje dvoubytový identifikátor, dvoubytové synchronizační slovo a kontrolní matici na konci paketu.

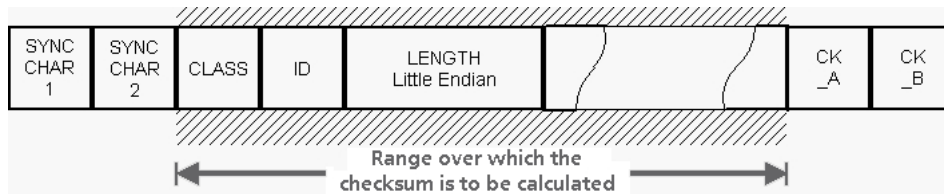
Synchronizační byty jsou pro všechny pakety stejné a určují v datovém toku počátek paketu. Jsou jimi znaky, jejichž reprezentace ve standardu ASCII [17] je μ a b . Identifikátor určuje druh zprávy a je složen z bytů CLASS a ID. Tím jsou rozlišeny



Obr. 3.1: Struktura paketu [12]

zprávy nesoucí různé informace. Korektní přenos informace je hlídán kontrolní maticí, respektive 8-bitovým kontrolním součtem. Ten je definován pomocí Fletcherova algoritmu (algoritmus využívaný k zabezpečení komunikace TCP).

Fletcher algorithm Fletcherův kontrolní algoritmus je počítán přes sekvenci přijatých binárních dat. Výsledkem kontrolního součtu je první doplněk. Pokud je kontrolní součet roven 0, je výpočet správný. Přesný popis algoritmu je popsán rovnicí (3.1), která je definována standardem pro přenos dat TCP [18].



Obr. 3.2: Část paketu, ze které se počítá kontrolní součet [12]

$$\begin{aligned}
 &CK_A = 0, CK_B = 0 \\
 &For(I = 0; I < N; I++) \\
 &(CK_A = CK_A + Buffer[I] \\
 &CK_B = CK_B + CK_A)
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

3.3 Dekódování informace z protokolu přijímače

Zprávy a pakety, které jsou přijímačem vysílány do počítače ke zpracování, nesou informace o signálu a o přijímači jako takovém. Dále jsou zde zprávy konfigurační,

díky nimž lze nastavovat a spravovat přijímač. Veškerá data jsou posílána ve výše popsané struktuře a pro úsporu datového toku jsou zprávy, které nenesou žádnou užitečnou informaci, respektive je část paketu nazvaná *payload* prázdná či poškozená, vynechány. Přehled všech zpráv využívaných UBX protokolem a jejich přesné definice jsou sepsány v dokumentu [12].

Pro potřebné měření a vyhodnocení přijímaného signálu nebylo zapotřebí kompletní datové zprávy. Vyhodnocení kvality parametrů záviselo na pseodonáhodné vzdálenosti, kterou po zpracování navigačního signálu přijímač uložil do zprávy RXM-RAW (Raw Measurement Data). Změřená data byla exportována v souboru s formátem definovaný výrobcem. Pro následné zpracování byl sepsán skript v programu MATLAB®.

RXM-RAW - Raw Measurement Data Paket obsahuje veškeré informace potřebné ke generování RINEX⁴ souboru v systémovém čase GPS a informaci o počtu viditelných družic, jejichž data jsou obsažena ve zprávě (zpráva v binárním kódu má proměnnou délku závislou právě na množství přijímané informace). Dále nese informaci o fázi signálu, vypočtené pseudozdálenosti mezi přijímačem a družicí, Dopplerův kmitočet dané družice a číslo, kterým je družice identifikována.

Skript načítá binární kód jako ASCII znaky a podle hlavičky vyhledává počátky jednotlivých paketů. Dále vybírá podle identifikátoru potřebné zprávy pro zpracování. Uvažuje různé datové typy, které se liší pro různé parametry uložené ve zprávě. Funkce pro zpracování dat jsou přiloženy v datové příloze práce.

⁴RINEX - Receiver Independent Exchange Format: Datový typ obsahující původní data, která uživateli umožní výpočet přesné polohy z observačních dat, navigačních zpráv a meteorologických dat.

4 Realizace měření a analýza vybraných parametrů

Ukažme nyní základní matematický aparát aproximace diskrétních měřených hodnot použitý ke zpracování měření v této práci. Data získávaná digitálním záznamem jsou zpravidla diskrétního charakteru a pro následující analýzu je vhodné vyjádřit jejich závislosti pomocí spojitých funkčních předpisů, jinými slovy chceme provést aproximaci a určit funkční předpis pro měřené veličiny.

Základním a velmi rozšířeným postupem pro aproximace je využití metody nejmenších čtverců (MNČ) [7, 8], která minimalizuje součet čtverců odchylek aproximovaných a původních měřených hodnot.

Uvažujme n měřených diskrétních hodnot y_i , které mají teoreticky představovat funkční hodnoty závislé na nezávislých proměnných x_i a parametrech p_j ($j = 0, \dots, m$), jinými slovy můžeme psát [7, 8]

$$y_i = f(x_i, p_0, \dots, p_m), \quad i = 1, \dots, n. \quad (4.1)$$

Předpokládejme dále, že měření bude obsahovat pouze náhodné chyby, a tedy skutečnou odchylku ϵ_i můžeme vyjádřit jako

$$\epsilon_i = f(x_i, p_0, \dots, p_m) - y_i, \quad i = 1, \dots, n. \quad (4.2)$$

Naším cílem je nalézt hodnoty parametrů p_j takové, aby byla splněna podmínka MNČ daná vztahem [7, 8]

$$M = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n [f(x_i, p_0, \dots, p_m) - y_i]^2 = \min. \quad (4.3)$$

Pro výpočet odhadu parametrů p_j je vhodné vztah (4.3) vyjádřit vektorově, a tedy s využitím zápisu

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(x_1, p_0, \dots, p_m) - y_1 \\ f(x_2, p_0, \dots, p_m) - y_2 \\ \vdots \\ f(x_n, p_0, \dots, p_m) - y_n \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

plnit podmínku MNČ danou jako

$$M = \boldsymbol{\epsilon}^T \boldsymbol{\epsilon} = \min. \quad (4.5)$$

Předpokládejme nyní, že závislost (4.1) je lineární kombinací parametrů p_j . Poté ji můžeme snadno převést do maticového zápisu pro n měření, platí

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{p}, \quad (4.6)$$

kde \mathbf{y} je sloupcový vektor měřených hodnot y_i , \mathbf{p} je sloupcový vektor hledaných parametrů p_j a \mathbf{A} je matice soustavy (4.1). Dosazením (4.6) do (4.5) dostáváme

$$M = (\mathbf{A}\mathbf{p} - \mathbf{y})^T (\mathbf{A}\mathbf{p} - \mathbf{y}) = \min. \quad (4.7)$$

Jak je známo z funkcionální analýzy, lokální minimum funkce bude v těch místech, kde je první derivace rovna nule, a tedy derivací funkce (4.7) podle jednotlivých parametrů vektoru \mathbf{p} , kterou dále položíme rovnu nule, dostáváme soustavu rovnic, po jejímž řešení lze vyjádřit odhad parametrů $\hat{\mathbf{p}}$ ve smyslu metody nejmenších čtverců jako [7, 8]

$$\hat{\mathbf{p}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{y}. \quad (4.8)$$

Bude-li předpokládaná závislost (4.1) nelineární, poté výpočet pokračuje tzv. *linearizací*, kdy využitím Taylorova rozvoje [7] a zanedbáním členů stupně vyššího než jedna převedeme (4.1) na lineární kombinaci parametrů p_j . Následnou úpravou a postupem obdobným výše popsanému získáme odhad hledaných parametrů. Je-li v tomto případě využit Taylorův rozvoj, musíme pro vyčíslení rovnic znát počáteční hodnoty hledaných parametrů.

Aplikujeme-li výše popsané vztahy na aproximaci polynomickým rozvojem stupně m , dostáváme soustavu rovnic

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_1^1 & \dots & x_1^m \\ 1 & x_2^1 & \dots & x_2^m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n^1 & \dots & x_n^m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ \vdots \\ p_m \end{pmatrix}. \quad (4.9)$$

Užitím (4.8) nyní jednoduše získáme exaktní odhad parametrů $\hat{\mathbf{p}}$ ve smyslu nejmenších čtverců.

Chybu aproximace můžeme snadno vypočítat dosazením vyrovnaných hodnot parametrů do původního modelu měřených dat (4.9), a tedy můžeme psát pro odchylky aproximovaných hodnot od původních

$$\hat{\boldsymbol{\epsilon}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{p}} - \mathbf{y} . \quad (4.10)$$

Kvalitativní hodnocení aproximace polynomickým rozvojem nyní můžeme vyjádřit RMS hodnotou (z angl. root-mean-square), která je dána jako kvadratický průměr odchylek, a tedy platí

$$\text{RMS} = \sqrt{\hat{\boldsymbol{\epsilon}}^T \hat{\boldsymbol{\epsilon}} / n} . \quad (4.11)$$

Dalším kritériem aproximace je tzv. PV hodnota (z angl. peak-to-valley) daná jako

$$\text{PV} = \max(\hat{\boldsymbol{\epsilon}}) - \min(\hat{\boldsymbol{\epsilon}}) . \quad (4.12)$$

4.1 Chyba zdánlivé vzdálenosti způsobená mnohacestným šířením signálu

V tomto pokusu byl sledován vliv mnohacestného šíření navigačního signálu na vypočtenou pseudovzdálenost přijímačem GNSS signálu. Podle teoretického předpokladu má pokus smysl pro nízké hodnoty zpoždění odražené vlny (řádově 10-100 ns). Nepřímo odražené vlny či vlny vzniklé difrakcí na vzdálených objektech a přijaté spolu s přímou vlnou je přijímač schopen filtrovat.

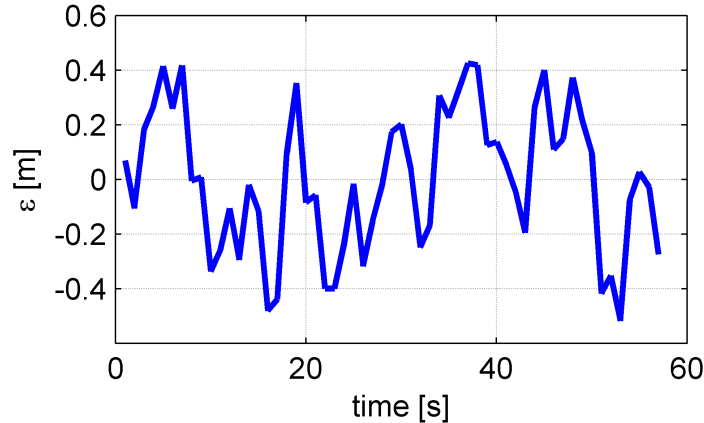
Pro měření byl použit generátor (R&S® SMBV100A Vector Signal Generator [15]) umožňující simulaci takového malého zpoždění.

Postup měření byl následovný. Na generátoru bylo nastavováno zpoždění v jednotkách chipu ($t_{chip} = 1/1023$ ms). Byl vybrán interval $\langle 1; 20 \rangle$ chip. Dále byla nastavena minimální viditelná konstelace satelitů potřebná k výpočtu pozice, tou jsou čtyři viditelné satelity. U jednoho ze satelitů bylo postupně nastavováno každé zpoždění z intervalu. Amplituda odražené vlny byla nastavena na 60% hodnoty přímé vlny. Po nastavení a spuštění generátoru byl přijímaný signál po šedesát sekund zaznamenáván.

Měření bylo rozšířeno o vliv Dopplerova kmitočtu vyvolaného pohybem družice. Dopplerův kmitočet a jeho vliv na příjem signálu je definován a popsán v literatuře [1, 2]. Byly vybrány hodnoty Dopplerova kmitočtu 0,1 Hz, 1 Hz a 10 Hz. Během měření se ukázalo, že pro hodnotu Dopplerova posunu 10 Hz již přijímač nevykazuje sledovatelnou chybu v měření. Dle teoretického předpokladu vliv Dopplerova kmitočtu díky filtračním algoritmům v přijímači klesá. Měření tedy bylo upraveno a zopakováno pro deset hodnot Dopplerova kmitočtu v intervalu $\langle 0, 1; 1 \rangle$ Hz.

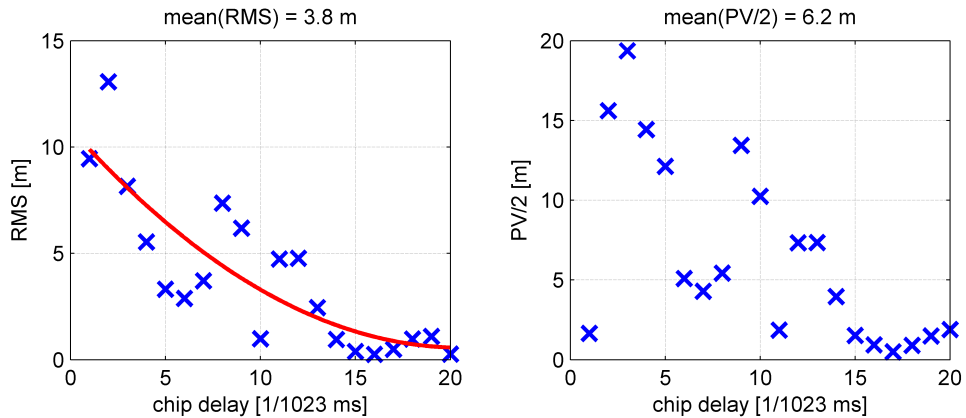
Zaznamenané hodnoty z každého měření byly z přijímače exportovány a dále zpracovávány v programu MATLAB®. Zpracování získaných dat z UBX protokolu je popsáno v kapitole 3.1.

Pro vyhodnocení naměřených dat byla ze záznamu vzata data pseudovzdáleností získané výpočtem přijímače. Tato data byla aproximována polynomem druhého stupně (popsáno viz kapitola 4). Rozdíl naměřených a aproximovaných dat je odchylka jednoho záznamu při jednom zpoždění a jednom nastavení Dopplerova kmitočtu. Výsledek zobrazuje příkladový obr. 4.1.



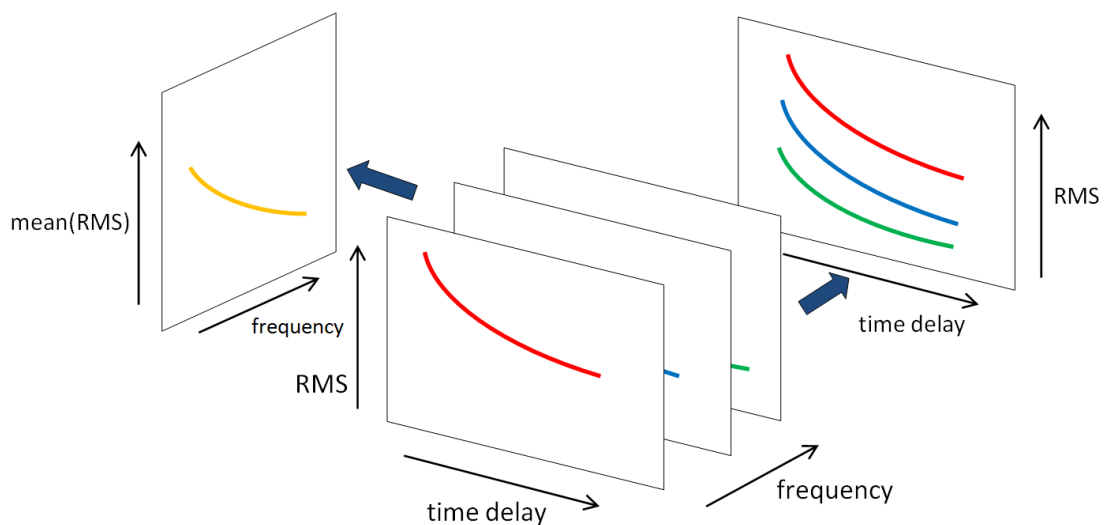
Obr. 4.1: Odchylka aproximace pro zpoždění 5 chipů a Dopplerův kmitočet 0,7 Hz

Z každého takto získaného průběhu byla vypočtena hodnota RMS viz kapitola 4 a vynesena do grafu v závislosti na intervalu zpoždění při jednom nastavení Dopplerova kmitočtu viz obr. 4.2. Pro porovnání je ze záznamu vypočtena i hodnota PV a vynesena její polovina jako reprezentace absolutní odchylky od střední hodnoty. Nad grafy je zobrazena střední hodnota pro daný průběh RMS v závislosti na zpoždění a střední hodnota $PV/2$.



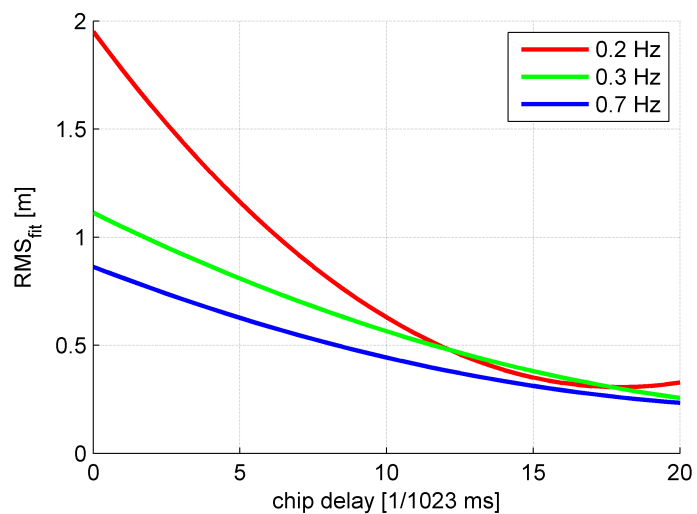
Obr. 4.2: Závislost RMS a PV/2 na časovém zpoždění chip delay

Takto vypočtené průběhy lze řadit za sebe a vyhodnotit vzájemnou závislost chyby způsobené mnohacestným šířením na nárůstu zpoždění vlny odražené, a ve druhém zpracování poté závislost chyby způsobené mnohacestným šířením na nárůstu Dopplerova kmitočtu. Na obr. 4.3 je schematicky znázorněno, jak byly vytvářeny jednotlivé průměty závislostí použité v této analýze.

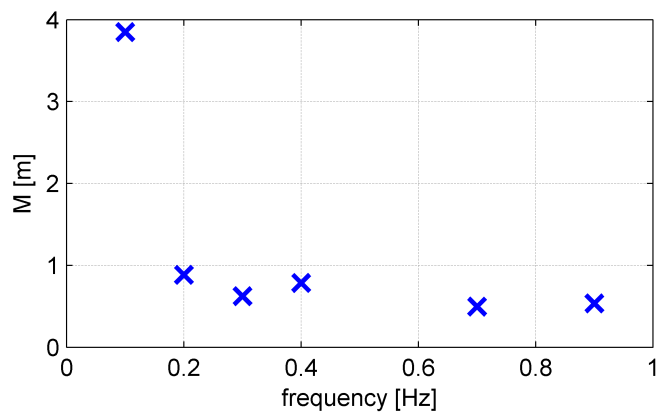


Obr. 4.3: Schematické znázornění odečtu závislostí

Obr. 4.4 představuje chybu způsobenou mnohacestným šířením v závislosti na zpoždění odražené vlny a obr. 4.5 poté chybu způsobenou mnohacestným šířením v závislosti na Dopplerově kmitočtu, kde M reprezentuje střední hodnotu RMS vypočtenou pro jednotné nastavení Dopplerova kmitočtu (data viz obr. 4.2).



Obr. 4.4: Chyba způsobená mnohacestným šířením v závislosti na zpoždění odražené vlny



Obr. 4.5: Chyba způsobená mnohacestným šířením v závislosti na Dopplerově kmitočtu

Oba výsledné průběhy s nárůstem veličiny, na které je chyba závislá, klesají dle teoretických předpokladů. Kritickou hodnotou pro použití GNSS navigace tedy mohou být nízké hodnoty zpoždění odražené vlny. Zde se měřením a následným zpracováním dostáváme pro zpoždění jednotek chipu ($1/1023$ ms) na chybu v řádech jednotek metrů.

Pro závislost na Dopplerově kmitočtu je kritická hodnota pro chybu pseudovzdálenosti okolo 0,1 Hz. Při měření byla vyhodnocena střední hodnota RMS chyby v jednotkách metrů [0,1 Hz; 3,8 m]. Tento trend velmi rychle klesá a empiricky bylo ověřeno, že pro hodnoty Dopplerova kmitočtu blíží se 10 Hz je vliv chyby způsoben tímto parametrem danou použitou metodou neměřitelný v porovnání s vlivem ostatních nepřesností.

4.2 Akvizice a citlivost přijímače

Cílem tohoto měření bylo proměřit dobu akvizice přijímače a dále vliv citlivosti přijímače na změnu doby akvizice. Pro měření byla navržena metoda, kdy se přijímač před každým měřením uvedl do výchozího stavu. Tento stav je podrobně popsán v kapitole 2.1 jako *cold start*. Tento stav splňuje nároky na požadavky změřit mezní dobu akvizice signálu. Dle teoretických předpokladů je doba akvizice z takového stavu nejdéle trvající. Výsledky jsou zobrazeny jako distribuční funkce akviziční doby v závislosti na čase.

Citlivost přijímače signálu je další parametr, který velmi ovlivňuje čas akvizice. Změnou úrovně signálu lze sledovat změnu doby akvizice v závislosti na úrovni přijímaného signálu. Výsledkem je pak pravděpodobnostní rozložení ze statistického měření akvizice.

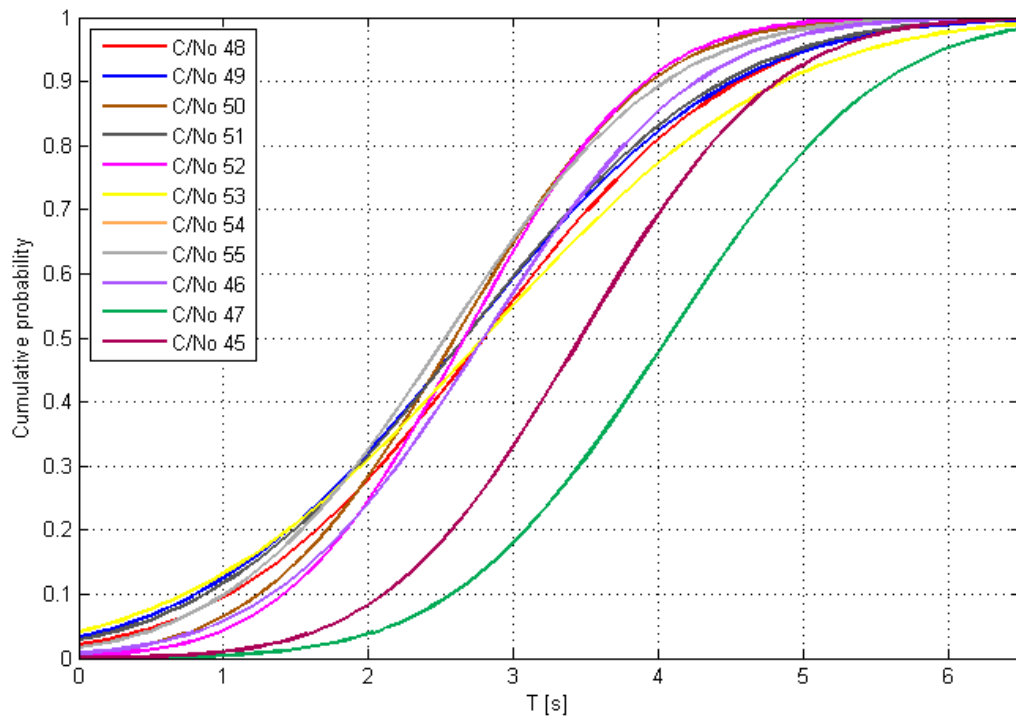
Postup měření byl následovný. Na generátoru signálu (R&S® SMBV100A Vector Signal Generator [15]) byl nastaven výstup pouze z jediné družice, tudíž se přijímač nedostane do fáze výpočtu polohy a nevyužívá tak navigační zprávy pro zjištění poloh dalších družic, čímž se prakticky zkracuje čas akvizice ostatních družic. Pro měření byly použity dvě metody.

- **Metoda A** vychází ze sledování jediné družice. Restart zařízení byl simulován odepnutím signálu z generátoru. Během měření se ukázalo, že takový postup je nedostatečný a naměřená data postrádají vypovídací hodnotu, a proto bylo další měření tímto způsobem ukončeno. První komplikací bylo správné měření času. Nelze přesně určit, kdy se signál opět reálně vyšle z výstupu generátoru. Měření času akvizice je tím zatíženo značnou nejistotou. Takto naměřené časy byly dále závislé na době odepnutí. Po krátkém odepnutí se zachycení signálu podařilo značně rychleji. Z tohoto důvodu byl postup vyhodnocen jako nevhodný.
- Pro měření **metodou B** byl restart přijímače řízen softwarem dodaného výrobcem přístroje. Zde byl přímo změřen čas akvizice. Software umožňuje zaznamenávat čas pouze s přesností na vteřiny, ale pro účely tohoto měření byla tato přesnost dostatečná.

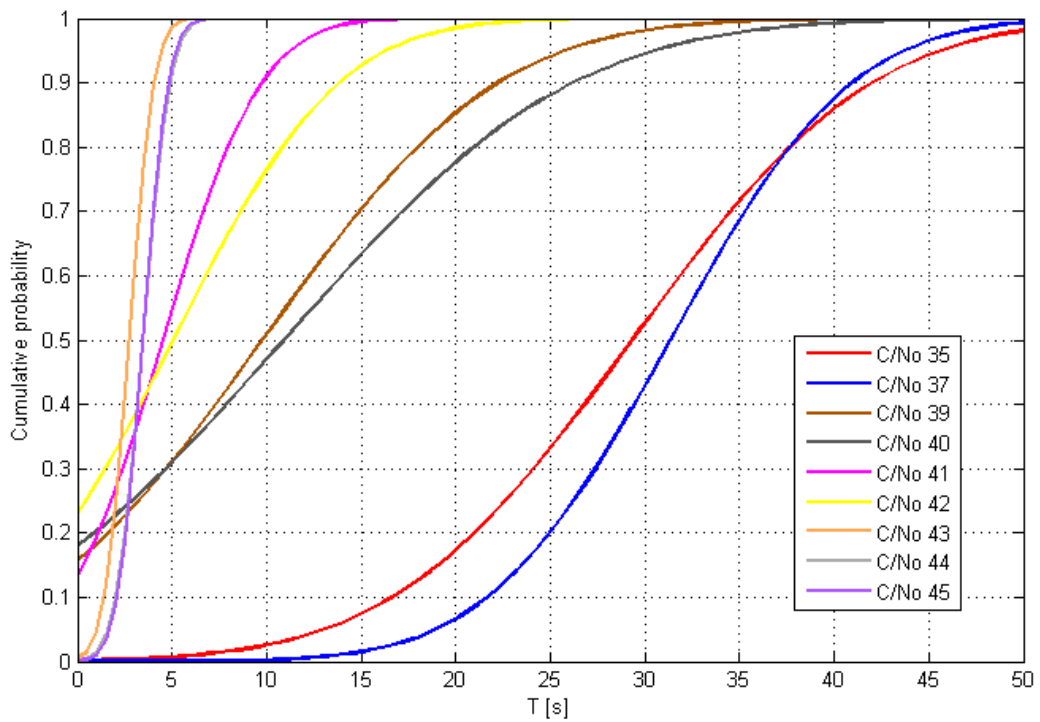
Výsledkem měření akvizice byla data měřená pro citlivost signálu v rozmezí C/No 35-55 dB/Hz. Každá nastavená hodnota citlivosti byla změřena pro 15 pokusů. Pro statistické vyhodnocení je zřejmě tento počet nedostatečný, avšak pro slabší signály akvizice trvala řádově desítky sekund. Z časových důvodů byl pokus ukončen tehdy, když se nepodařilo přijímačem zachytit signál do 180 s po restartu.

Výsledky mají smysl pro hodnoty signálu při citlivosti nad 45 dB/Hz. Zde se čas akvizice pohybuje v řádu jednotek sekund. Pro slabší signály nelze z takto naměřených výsledků určit pravděpodobnost akvizice, vhodných výsledků by se zde dalo dosáhnout zvýšením četnosti pokusů. Pro zobrazení výsledků byla distribuční funkce rozdělení aproximována vztahy pro normální rozdělení [7, 8], viz obr. 4.6 a 4.7.

Doba akvizice Podle výsledků byly křivky rozděleny na signály s vyšší (obr. 4.6) a nižší (obr. 4.7) citlivostí. Jejich zobrazení pohromadě nebylo názorné. Měření tedy bylo rozděleno na signály s úrovní signálu vyšší než 45 dB/Hz a nižší než je tato hranice. Pro srovnání obou grafů byla jako referenční hodnota úrovně signálu ponechána v obou grafech.



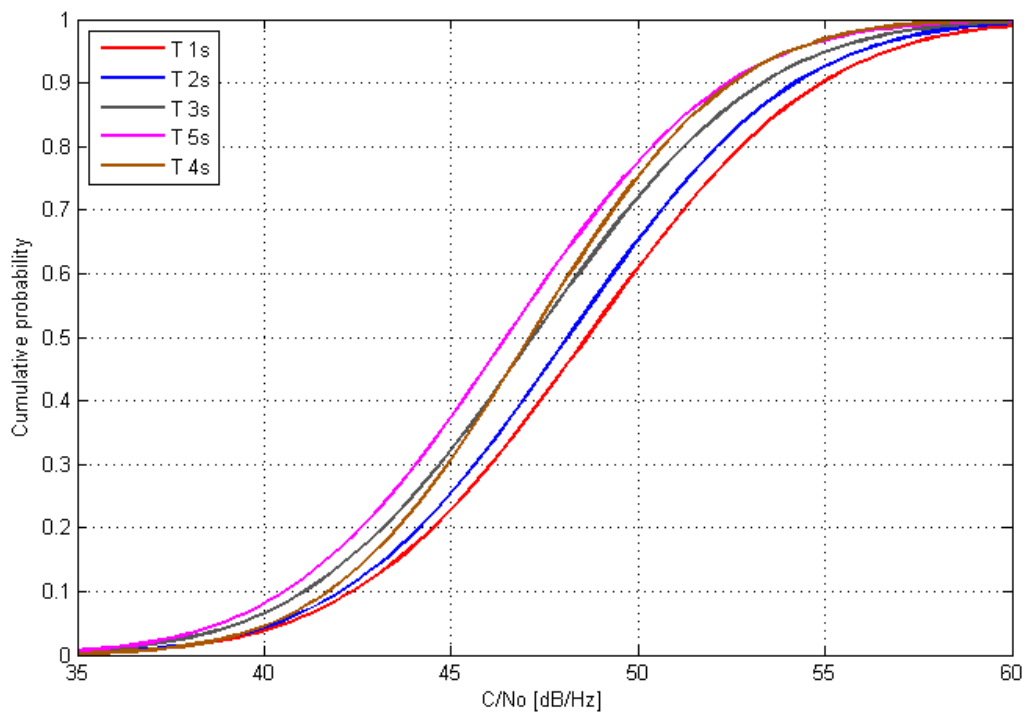
Obr. 4.6: Distribuční funkce akvizice v závislosti na čase



Obr. 4.7: Distribuční funkce akvizice v závislosti na čase

U signálu s dobrým výkonem nemá další zvyšování úrovně veliký vliv na dobu akvizice. Zatímco vliv se velmi projeví s dalším klesáním úrovně signálu, slabé signály (cca pod 38 dB/Hz) zvyšují dobu měření. Signály pod 35 dB/Hz nebyly do výsledků zahrnuty z důvodu překročení doby pokusu (180 s), a tak jejich hodnocení nebylo korektní. Pro měření takových signálů by bylo třeba pokus nechat trvat značně delší dobu.

Citlivost, rozložení úrovní citlivosti Byly zobrazeny pouze časové křivky s dostatečným počtem hodnot. Čas akvizice se pohyboval v intervalu $\langle 1; 180 \rangle$ s. Pro ostatní doby akvizice byla četnost nalezených pokusů nízká či dokonce nulová. Při zvýšení četnosti pokusů má smysl takovéto měření provádět v rozsahu jednotek sekund. Distribuční funkce citlivosti v závislosti na čase je zobrazena na obr. 4.8.



Obr. 4.8: Distribuční funkce citlivosti v závislosti na čase

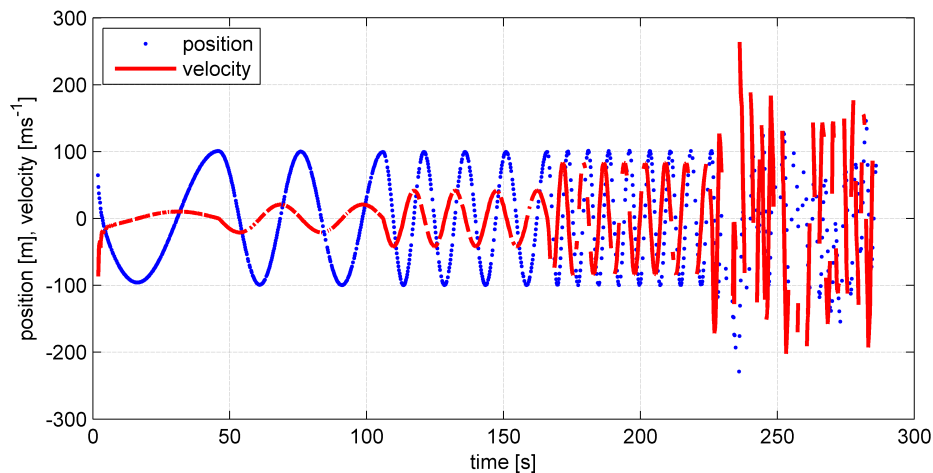
4.3 Vliv dynamických změn polohy přijímače na kvalitu polohové informace

Jako zdroj GNSS signálu byl použit vektorový generátor (R&S® SMBV100A Vector Signal Generator [15]), který umožňuje nastavení libovolné konstelace družic na oběžných dráhách. Cílem pokusu bylo změřeni vlivu dynamických změn pohybu přijímače na sledování signálu přijímačem až do mezní hodnoty, kdy přijímač nezvládne přijímaný signál zpracovat.

Generátor byl nastaven tak, aby simuloval pohyb přijímače po kružnici s poloměrem 100 m. Pro simulaci byl vybrán pohyb po kružnici z důvodu jednoduché opakovatelnosti pokusu. Taková dráha je dostatečně náročná na dynamickou změnu směru a rychlosti přijímače, zároveň je však jednoduše popsatelná matematicky pro případné další zpracování pokusu a naměření dat. Rozměr kružnice byl volen empiricky s ohledem na přesnost systému. Kružnice s takovýmto poloměrem je dostatečně velká, takže i při zhoršení určení polohové informace je výsledný pohyb stále rozeznatelný.

Obvodová rychlost se vždy po časovém intervalu s délkou 50 s zdvojnásobila až do doby, kdy přijímač nebyl schopen z přijímaných dat určit polohovou informaci.

Simulace počítá s pohybem pouze v jedné rovině. Výsledný graf na obr. 4.9 zobrazuje průmět pozice do jedné souřadnicové osy systému. V závislosti na čase lze první derivací (resp. diferencí pro diskrétní data) dráhy vypočítat rychlost. Tímto výpočtem byla ověřena shoda výsledků vypočtených z exportovaných dat se zpracováním signálu přijímačem.



Obr. 4.9: Pozice a rychlost přijímače v závislosti na čase

Při kruhovém pohybu GNSS přijímač zvládal udávat informaci o pohybu do hodnoty $v_o = 80 \text{ ms}^{-1}$. Dle nastavení generátoru se obvodová rychlost opět zdvojnásobila na $v_o = 160 \text{ ms}^{-1}$, zde již přijímač nedokázal z přijímaného signálu určit polohovou informaci. Výpočet polohy se stal nedostatečným, stále však přijímač sledoval signál. V době posledního zdvojnásobení obvodové rychlosti přestal přijímač udávat jakoukoliv informaci o poloze. Bohužel tento stav nelze s dostupným přijímačem ověřit.

Mezní hodnota dynamického pohybu, reprezentovaná v tomto pokusu obvodovou rychlostí při pohybu po kružnici, leží v intervalu $\langle 80; 160 \rangle \text{ ms}^{-1}$. Pro přesnější určení lze výše popsany postup opakovat a nárůst veličiny rychlosti zvyšovat s jemnějším krokem. Pro ověření chování přijímače s ohledem na rychlostní podmínky stanovených v železniční dopravě popsanych v [6] je zjištěná mez rychlosti $v_o = 80 \text{ ms}^{-1}$ pro vlakovou dopravu dostatečná.

Závěr

V práci byly shrnuty možnosti využití přijímače GNSS, zejména pak GPS, jako součásti systému pro určování polohy v provozu na železnici. Byly studovány parametry navigačního systému a bylo provedeno vytipování parametrů, které zásadně ovlivňují kvalitu získané polohové informace z navigačního přijímače. Dále byly studovány bezpečnostní podmínky, za kterých může být železniční přeprava provozována s České republiky a Evropě. Normy železniční přepravy pro Českou republiku jsou v některých svých částech těm evropským velmi podobné, nikoliv však shodné. Pro sjednocení železniční dopravy mezi státy a dosažení integrity systému je třeba vybudovat železniční infrastrukturu odpovídající evropské úrovni.

Co se týče vytipovaných parametrů a možnosti použití GNSS systému pro určení polohy vlaku, je systém s rezervami dostačující jak pro podmínky železnice provozované na území České republiky, tak i na mezinárodní úrovni. Lze tedy se zkoumaným systémem GPS dosáhnout interoperability s železničními systémy.

V práci je navržena metodika měření vytipovaných parametrů. V případech dostatečného přístrojového vybavení byla metodika otestována při získávání měřených dat a jejich analýze. Během měření a vyhodnocení dat nebyla nalezena žádná další klíčová vlastnost GNSS přijímače, která by nebyla definována v dostupné literatuře ustáleným parametrem.

V poslední části práce jsou zhodnocena realizovaná měření na GPS modulu uBlox EVK-6T. Byla analyzována chyba zdánlivé vzdálenosti způsobená mnohacestným šířením a prokázáno, že RMS odchylka pseudovzdálenosti od kvadratického trendu klesá s nárůstem zpoždění odražené vlny v rámci mnohacestného šíření a s nárůstem Dopplerova kmitočtu. Dále byly vytipovány podmínky pro měření akvizice signálu v závislosti na citlivosti přijímače a určena doba trvání procesu výpočtu polohy. Výsledky jsou prezentovány pravděpodobnostním rozložením v závislosti na úrovni přijímaného signálu. Posledním výstupem je zhodnocení chování daného GNSS přijímače v průběhu simulovaných dynamických změn. Z důvodů časové náročnosti všech experimentálních měření nebyla prozatím získána data pro analýzu

vlivu elektromagnetického rušení signálu, ke kterému může dojít při použití na vlakové soupravě v reálném provozu.

Použité zdroje

- [1] MISRA, P.; ENGE, P.: *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*. Second Edition, Massachusetts, Ganga-Jamuna Press. Copyright 2001, 2004, 2006.
- [2] Kaplan, D. E.; Hegarty, Ch. J.: *Understanding GPS, Principles and Application* Second Edition 2006.
- [3] MOHINDER S. G., LAWRENCE R.: *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. Second Edition Hoboken, 2007
- [4] Seventh Framework Programme *Next Generation Train Control - D7.2 Definition and quantification of GNSS parameters relevant for the signalling application in railway environment*
- [5] ICD-GPS-200H, *Global Positioning System - Interface Control Document*, 2013.
- [6] Vyhláška Ministerstva dopravy č. 177/1995 Sb. *Vyhláška Ministerstva dopravy č. 177/1995 Sb., kterou se vydává stavební a technický řád drah.*, 2014.
Dostupné z URL: <http://www.mdcrcz.cz/NR/rdonlyres/A4713CCF-D791-4632-9423-1CCF3CDE06CA/0/17795uplzneni142013.pdf>.
- [7] REKTORYS, K.: *Přehled užití matematiky I a II díl*. Praha, 1995
- [8] KOCH, K. R.: *Parameter estimation and hypothesis testing in linear models*. Second Edition Berlin: Springer, 1999
- [9] KOUBA J., HÉROUX P.: *Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. GPS Solutions*. 2001
- [10] HRDINA, Z.; PÁNEK, P.; VEJRAŽKA, F.: *Rádiové určování polohy (Družicový systém GPS)*. [Skriptum]. Praha, ČVUT-FEL 1995.
- [11] UHLÍŘ, J.; SOVKA, P.: *Číslíkové zpracování signálu*. Praha, ČVUT 2002

- [12] Receiver Description - u-blox 6, *Including Protocol Specification* , 2014.
 Dostupné z URL: <<http://www.u-blox.com/>>.
- [13] International Union of Railways, 2014.
 Dostupné z URL: <<http://www.uic.org>>.
- [14] The European Rail Traffic Management System, 2014.
 Dostupné z URL: <<http://www.ertms.net>>.
- [15] R&S® SMBV100A RF and Microwave Signal Generator, 2014.
 Dostupné z URL: <http://http://www.rohde-schwarz.com/en/product/smb100a-productstartpage_63493-9379.html>.
- [16] RS232 Specifications and standard, *RS232 Specifications and standard* , 2014.
 Dostupné z URL: <http://www.lammertbies.nl/comm/info/RS-232_specs.html>.
- [17] ASCII standard, *American Standard Code for Information Interchange* , 2014.
 Dostupné z URL: <<http://www.theasciicode.com.ar/>>.
- [18] Network Working Group - TCP-IP, *TCP Alternate Checksum Options* , 2014.
 Dostupné z URL: <<http://www.ietf.org/rfc/rfc1145.txt>>.
- [19] Comparison of GNSS *Comparison of GPS, GLONASS, Galileo and Compass...* , 2014.
 Dostupné z URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_navigation#mediaviewer/File:Comparison_satellite_navigation_orbits.svg>.
- [20] The Smithsonian National Air and Space Museum: *Artist rendition of the GPS Constellation - Image Number: WEB12798-2013* , 2014.
 Dostupné z URL: <<http://airandspace.si.edu/explore-and-learn/multimedia/detail.cfm?id=4637>>.