

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroniky a informačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vyhodnocení přesnosti satelitního určování polohy z měření
na pseudonáhodných posloupnostech

Autor práce: **Ondřej Müller**
Vedoucí práce: **Ing. Ivo Veřtát, Ph.D.**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Ondřej MÜLLER**
Osobní číslo: **E18B0023P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Téma práce: **Vyhodnocení přesnosti satelitního určování polohy z měření na pseudonáhodných posloupnostech**
Zadávající katedra: **Katedra elektroniky a informačních technologií**

Zásady pro vypracování

Analyzujte přesnost satelitního určení polohy všech globálně dostupných systémů (GPS, Glonass, Galileo, Compass) pomocí přijímače UBlox.

1. Proveďte dlouhodobé sledování a statistické zpracování přesnosti určení polohy jednotlivě ze systémů GPS, Glonass, Galileo a Compass při měření na pseudonáhodných posloupnostech.
2. Proveďte dlouhodobé sledování a statistické zpracování přesnosti určení polohy různých kombinací systémů GPS, Glonass, Galileo a Compass při měření na pseudonáhodných posloupnostech.
3. V průběhu sledování zaznamenávejte doprovodné informace ze satelitního přijímače (počty viditelných satelitů, kvalita přijímaného signálu, zbytkovou chybovou vzdálenost,...) a zpracujte je.

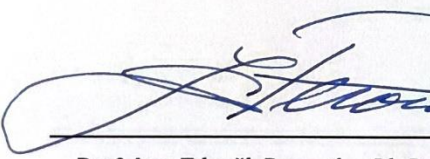
Rozsah bakalářské práce: **30 – 40**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**


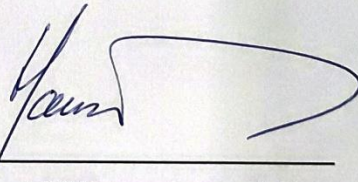
Seznam doporučené literatury:

1. Khomsin, Khomsin & Anjasmara, Ira & Pratomo, Danar & Ristanto, Wahyu. (2019). Accuracy Analysis of GNSS (GPS, GLONASS and BEIDOU) Observation For Positioning. E3S Web of Conferences. 94. 01019. 10.1051/e3sconf/20199401019.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ivo Veřtát, Ph.D.**
Katedra elektroniky a informačních technologií

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2022**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Určování přesné polohy daného předmětu na zemi je základem celosvětové sítě navigačních systémů pro civilní uživatele, dopravní infrastrukturu i armádní sektor. Dnes se pro sledování polohy přijímače využívá standard globálních navigačních satelitních systémů GNSS. Úkolem této závěrečné práce je přinést základní povědomí o funkci satelitních systémů a pomocí satelitního zařízení U-Blox změřit a vyhodnotit přesnosti standardů určených k získávání polohy (GPS, GLONASS, Galileo, Compass) z hlediska jednotlivých systémů, včetně jejich kombinací. Posuzování přesnosti je prováděno z měření na pseudonáhodných posloupnostech civilních signálů s otevřeným přístupem, jež jsou vyhodnocovány v softwaru MATLAB, dle několika kritérií. V textu lze nalézt základní informace o získávání a výpočtu polohy, jednotlivých technologiích GNSS, seznámení se softwarem pro zpracování měření, měřicím přijímačem a v neposlední řadě zpracované výsledky měření a z nich vyplývající systémy nejvhodnější k určení přesnosti polohy.

Klíčová slova

Multilaterace, MLAT, GPS, GLONASS, Galileo, Compass, BeiDou, pseudonáhodné posloupnosti, přesné určení polohy

Abstract

One of the basics of the worldwide system navigation in which belong civilians, traffic infrastructure and army sectors is the accurate identification of position of determined object. As for today, the global navigation systems called GNSS are used for finding the location of the receiver. The aim of the bachelor thesis is to introduce the reader to the systems used in satellite navigation systems and evaluate the accuracy of systems that use GNSS standards (GPS, GLONASS, Galileo, Compass) both as single standards and as combination of this standards. This evaluation is done by measuring of pseudorandom sequences with open approach at accuracy for civil signals. These signals are evaluated in MATLAB software by created scripts, based on determined criteria. This thesis contains basic information about computing and approaching the location, GNSS technologies, introduction of evaluation software, U-Blox receiver and last but not least outcoming measurement results which leads to find the best solution for identify the position.

Key Words

Multilateration, MLAT, GPS, GLONASS, Galileo, Compass, BeiDou, pseudorandom sequences, accurate identification of location

Poděkování

Tímto bych velmi rád poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Ivo Veřtátovi, Ph.D. za pomoc, odborné poznatky a nápady při zpracování této závěrečné práce a dále FEL ZČU za poskytnutý hardware a software.

Obsah

Úvod.....	- 1 -
Cíle práce	- 2 -
1 Princip určování polohy	- 3 -
1.1 Určování polohy objektu.....	- 3 -
1.1.1 Triangulace	- 4 -
1.1.2 Trilaterace	- 5 -
1.1.3 Multilaterace	- 6 -
1.2 Multilaterační určování polohy (MLAT)	- 6 -
1.2.1 Princip.....	- 7 -
1.2.2 Řešení dohledových systémů pro TDOA	- 8 -
1.2.3 Nalezení přijímače pomocí TDOA	- 9 -
1.2.4 Výhody a nevýhody systému MLAT.....	- 9 -
2 Novodobé systémy pro určování pozice na Zemi	- 11 -
2.1 Určování polohy pomocí satelitních systémů	- 11 -
2.1.1 Pseudonáhodný kód C / A systému GPS	- 12 -
2.1.2 Pseudonáhodný kód P (Y) systému GPS.....	- 12 -
2.1.3 Signály systému GLONASS.....	- 13 -
2.1.4 Navigační zprávy	- 13 -
2.2 Struktury satelitních systémů pro určování polohy.....	- 15 -
2.2.1 Kosmický segment.....	- 15 -
2.2.2 Řídicí segment	- 15 -
2.2.3 Uživatelský segment	- 16 -
2.3 Globální systémy pro určování polohy	- 17 -
2.3.1 GPS	- 17 -
2.3.2 Galileo.....	- 20 -
2.3.3 GLONASS	- 23 -
2.3.4 Compass.....	- 25 -
3 Pracoviště pro vyhodnocování satelitního měření polohy.....	- 28 -

3.1	Použitý hardware.....	- 28 -
3.1.1	Přijímač U-Blox.....	- 29 -
3.1.2	Technické parametry.....	- 30 -
3.2	Software pro měření dat.....	- 30 -
3.2.1	Uživatelské prostředí.....	- 31 -
3.2.2	Nastavení měřicího softwaru pro získání pozice.....	- 35 -
3.2.3	Parametry určené pro logování.....	- 36 -
4	Zpracování naměřených dat.....	- 38 -
4.1	Skripty pro zpracování dat.....	- 38 -
4.2	Vyhodnocování přesností jednotlivých standardů.....	- 43 -
4.3	Vyhodnocování přesností kombinací standardů.....	- 45 -
4.4	Ověření výsledků dle předpokladů.....	- 46 -
	Závěr.....	- 49 -
	Literatura.....	- 50 -
	Seznam obrázků a tabulek.....	- 52 -
	Přílohy.....	- 53 -

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
<i>GLONASS</i>	Globální navigační družicový systém Ruské federace	-
<i>GPS</i>	Globální poziční systém USA	-
<i>PSR</i>	Primární radiolokační radar	-
<i>SSR</i>	Sekundární radiolokační radar	-
<i>ATC</i>	Řízení letového provozu	-
<i>GNSS</i>	Globální družicový polohový systém	-
<i>IFF</i>	Druh identifikace cizí - vlastní	-
<i>MSSR</i>	Monopulsní sekundární radiolokační radar	-
<i>TCAS</i>	Palubní protisrážkový systém	-
<i>ADS-B</i>	Automatické sledování - vysílání	-
<i>TDOA</i>	Časový rozdíl příletu signálů	-
<i>MLAT</i>	Multilaterace	-
<i>C/A</i>	Kód využívající civilní signály GPS	-
<i>P (Y)</i>	Kód využívající vojenské signály GPS	-
<i>SP</i>	Standardní přesnost systému GLONASS	-
<i>HP</i>	Vysoká přesnost systému GLONASS	-
<i>MCS</i>	Řídící stanice	-
<i>ULS</i>	Stanice pro komunikaci s družicemi	-
<i>TT&C</i>	Stanice pro zprávu telemetrie a příkazů	-
θ, α, β	Úhel	°
<i>P</i>	Možná poloha bodu	-
<i>B1, B2</i>	Poloha vysílačů při výpočtu multilaterace	-
T_{Bi}	Doba šíření radiového signálu	<i>ms</i>
<i>c</i>	Rychlost šíření elektromagnetických vln	<i>km/s</i>
r_i	Poloměr trilaterálních koulí	<i>m, km</i>
<i>CS</i>	Komerční služba systému Galileo	-
<i>OS</i>	Otevřená služba systému Galileo	-
<i>SOL</i>	Služba Safety of Life	-
<i>PRS</i>	Šifrovaná služba pro bezpečnosti složky	-
<i>SBAS</i>	Monitorovací systémy pro upřesnění pozice	-
<i>GMDSS</i>	Globální námořní a tisňový bezpečnostní systém	-
<i>MEO</i>	Střední oběžná dráha	-
<i>IGSO</i>	Inklinovaná geosynchronní dráha	-
<i>GEO</i>	Geostacionární oběžná dráha	-
<i>WADS</i>	Služba diferenciální lokace	-
<i>SMS</i>	Short message service	-
<i>PDOP</i>	Kvalitativní hodnota viditelnosti satelitů	-
<i>VDOP</i>	Kvalitativní hodnota přesnosti vertikálních poloh	-
<i>HDOP</i>	Kvalitativní hodnota přesnosti horizontálních poloh	-
<i>RHCP</i>	Anténa s pravostrannou orientací polarizace	-
<i>EU</i>	Evropská unie	-

Úvod

Přesnost polohy představuje jeden ze základních pilířů určení umístění v prostoru a daná problematika se stala spolu s válečnými konflikty a přicházejícími novými typy standardů neustále vyvíjejícím se tématem.

Prvotní roli hrála při tomto úkonu tzv. primární radiolokace (Primary Surveillance Radar – dále jen PSR). Pro PSR platí, že svůj primární účel našel v řízení letového provozu (Air traffic control - dále jen ATC). Tento systém, již zastaralý, nicméně stále funkční, je dodnes používán jakožto doplňkový systém k sekundární radiolokaci (Secondary Surveillance Radar – dále jen SSR).

SSR je radarovým standardem, používaným v ATC, jehož hlavní výhodou je práce s cíli, jenž jsou vybavené radarem. I přesto, že je SSR kvalitní a zavedenou metodou pro získávání přehledu o vzdušné situaci, s nárůstem letového provozu se stává zastaralou. Hlavním problémem, který je nutné v současnosti řešit, je vytváření nových koncepcí a v rámci možností přecházet na projekty na bázi již vytvořených systémů.

Pro ATC není možné zavádět nové koncepce skokově, proto se nové koncepce přehledů o vzdušné situaci opírají o zavedený princip SSR, ale snaží se o to, aby byl z řetězce pro určení polohy postupně odebrán samotný radar, jenž je nejdražším a nejkomplicovanějším prvkem celého systému. V praxi by se mělo jednat o nahrazení pozemními přijímači, monitorujícími příchozí signály od jednotlivých cílů.

Výchozím bodem pro vytváření moderních GNSS systémů byl radiový polohový systém LORAN, využívaný ve vojenském sektoru pro letectví a námořnictví. Umístění emitörů na oběžnou dráhu země bylo zkoumáno na Univerzitě Johnse Hopkinse při disertační práci dvou postgraduálních studentů. Díky jejich práci s radiotechnikou bylo možné, po vypuštění první umělé družice Sputnik 1 (4. října 1957), lokalizovat pomocí Dopplerova posunu, získaného z radiových signálů, orbit daného vysílače. Tím vznikla myšlenka, zabývající se předvídatelností umístění umělých družic, díky čemuž by bylo možné lokalizovat přijímač na povrchu země.

Tento nápad byl základní stavebním kamenem globálního družicového polohového systému (dále jen GNSS), prvotně se jménem Transit. Systém vycházel z principu umístění několika známých družic na polárních drahách, vysílající signál na dvou stabilních frekvencích, spolu s daty o dráze družice. Projekt GNSS znamenal vypuštění 8 výzkumných a 15 navigačních družic, včetně rozsáhlého systému pro jejich sledování, bylo možné predikovat jejich orbit na 12 hodin dopředu a bylo umožněno určení polohy pomocí nově

vyvinutého softwaru. V roce 1964 byl tento projekt schválen k vojenskému použití pro námořnictvo USA. Rok 1967 znamenal posun tohoto pilotního systému pro komerční využití v civilním letectví či námořnictví státům spolupracujícím s USA.

Projekt Transit byl nahrazen systémem NAVSTAR GPS, začínající vývojem v roce 1973. Systém vycházel ze sloučení dvou projektů pro určování polohy a přesné určování času, přičemž byl projektován na 18 družic. V rozmezí let 1978 – 1985 došlo k vypuštění 11 vývojových družic a z důvodu předpokladu malé kapacity byl systém rozšířen na 24 orbitů. Kompletní sestava 24 satelitů byla umístěna na oběžnou dráhu 17. ledna 1994. Paralelně se systémem GPS byl vytvořen sovětský systém GLONASS projektovaný též na 24 satelitních zařízení. Toto období vývoje bylo označeno jako GNSS-1.

Následuje období označované GNSS-2, kdy se k těmto systémům přidává Evropský systém Galileo. Do této doby lze zařadit i systém BeiDou-1 a nástupce BeiDou-2, známý též jako Compass.

Přesnost každého z těchto systémů je závislá na několika faktorech, z nichž lze zmínit počet viditelných družic, jejich geometrické uspořádání, poměr signál / šum nebo typ přijímače a z něj vycházející způsoby měření a vyhodnocování získaných parametrů. V neposlední řadě je potřeba počítat s přesností atomových hodin na palubě satelitů, stejně jako s jejich korekcí a přesností modelování vlivu ionosféry.

Cíle práce

V této práci budou popsány důležité technické parametry nových standardů pro určování polohy, využívaných v každodenním životě, u kterých bude možné využít princip určování přesnosti na metodě pseudonáhodných posloupností, neboli principu multilaterace (dále MLAT), pracujícím na principu rozdílu času příchozích signálů.

Cílem bude aplikování MLAT na jednotlivé standardy GPS, Galileo, GLONASS a Compass, porovnání daných systémů a jejich kombinací. Výsledkem práce bude získání důležitých pozičních údajů, díky kterým získáme důležité poziční údaje jednotlivých systémů, což může vést k optimalizaci sestavení vícesystémových přijímačů. Výsledkem by měla být představa umožňující vhodnou substituci k výše zmíněným PSR a SSR s co nejmenší odchylkou měření.

Data potřebná pro měření (počty viditelných satelitů, umístění přijímače v prostoru, zeměpisné souřadnice) budou získávána z přijímače U-Blox pomocí softwaru pracujícího s tímto zařízením a vyhodnocována systémem MATLAB, přičemž z daných výsledků bude možné určit nejpřesnější kombinaci těchto systémů.

1 Princip určování polohy

Při bližším zkoumání PSR zjistíme, že základním principem zajišťujícím nepřetržitý dohled nad celosvětovým leteckým provozem, bylo detekování a hlášení polohy čehokoliv, co dokázalo odrážet jeho vysílané radiové signály. Prakticky se jednalo o vše včetně letadel, ptactva, počasí i vlastností země. Důležitou výhodou je fakt, že nebylo nutné, aby cíl spolupracoval, nýbrž jen uměl odrážet tyto radiové vlny. V době, kdy PSR byla jediným systémem pro určení polohy, byla zjevnou nevýhodou omezenost v identifikaci jednotlivých cílů. Korelace pro jednotlivé radarové odrazy byla řešena pozorováním změn směru letadel.

Následující standard v podobě SSR je systém založený na technologii identifikace vlastní – cizí (dále IFF), vyvinuté během druhé světové války. Transpondér cíle odpovídá na každý dotazovací signál vysláním zakódovaných dat, v nichž jsou ukryta výška, rychlost a další informace v závislosti na zvoleném režimu. Ze standardů dnes hojně využívaných lze vyjmenovat MSSR, TCAS nebo ADS-B. Hlavními nevýhodami jsou náklady na provoz a instalaci, omezené možnosti vývoje a limity v pokrytí a kapacitě obslužených letadel.

1.1 Určování polohy objektu

Princip určení polohy objektu dnes není ničím složitým. Avšak aby bylo možné vůbec uvažovat o sledování daných objektů, je potřeba začít vycházet z různých funkcí systémů, jež pro svou funkčnost využívají různé možnosti měření. V praxi se jedná o porovnávání svíraných úhlů s body, doby zpoždění mezi vysílačem a přijímačem nebo určování polohy na základě rozdílu časů příletu signálů (TDOA). Mezi tyto principy lze zařadit triangulaci, trilateraci a multilateraci.

I přesto, že funkčnost daných systémů je rozdílná, a každý z nich pracuje s jinými signály, jejich koncepce je společná a lze ji rozdělit do dvou variant:

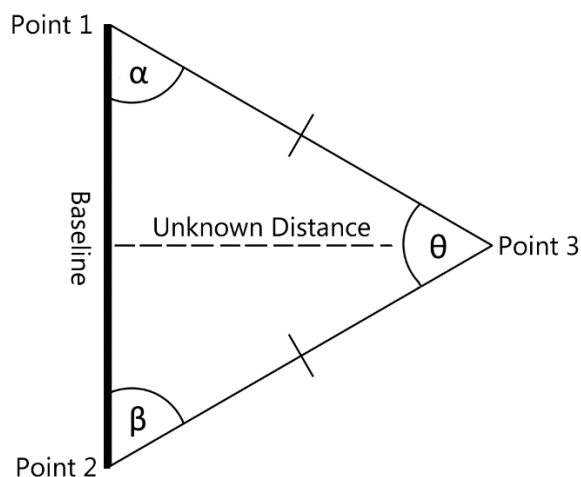
- Určení polohy vysílajícího objektu
- Určení polohy vlastního přijímače

Při určování polohy vysílajícího objektu, je neznámou hodnotou poloha radiového vysílače. Ten je v systému pouze jeden, nicméně dále zde pracujeme s přijímači na známé poloze, kterých je zde více. Abychom mohli správně vyhodnotit rozdíly zpoždění příchoďů signálů z vysílače do jednotlivých přijímačů, je nutné provést realizaci rozvedení přesného časového signálu, nebo pracovat s přesně stanoveným zpožděním mezi měřícím bodem a společným centrem pro vyhodnocování výpočtů.

Druhou variantou, se kterou je možné pracovat, je určování polohy daného přijímače. Systém pracuje na opačném principu, kdy neznámou je v dané situaci jeden radiový přijímač a o získávání dat ze signálů se stará sestava vysílačů rozmístěných v dohledu na známé poloze

1.1.1 Triangulace

Tento pojem, jak již název napovídá, bude v reálném provozu pracovat s úhly. V trigonometrii je triangulace způsob pro zjišťování souřadnic a vzdáleností. Důležitým prvkem je zde trigonometrický výpočet. Tuto funkci si lze představit jakožto trojúhelník (obr. 1), jehož jednu stranu tvoří strana již známého jiného trojúhelníku, představující spojení mezi dvěma referenčními body. Třetím bodem bude místo, jehož souřadnice jsou zjišťovány.



obr. 1 – Triangulační trojúhelník – vlastní zdroj

Princip funkce spočívá ve výpočtu úhlů v bodech č. 1 a č. 2, jenž jsou svírány se stranou, která je propojuje (v tomto případě úhly α a β). Výpočet lze provést pomocí známé vzdálenosti, označené jako *Baseline* a znalosti součtů vnitřních úhlů trojúhelníku (1).

$$\theta = 180^\circ - \alpha - \beta \quad (1)$$

Ke zjištění délek zbývajících stran trojúhelníku využijeme sinovu větu (2).

$$\frac{\sin(\alpha)}{a} = \frac{\sin(\beta)}{b} = \frac{\sin(\theta)}{\text{baseline}} \quad (2)$$

Nakonec lze podle definice goniometrické funkce sinus vypočítat vzdálenost označenou jako *unknown distance* (3).

$$\sin(\alpha) = \frac{d}{b} \text{ nebo } \sin(\beta) = \frac{d}{a} \quad (3)$$

Využití triangulace je známé zejména ve spojení s vysoce směrovými anténami, dříve mechanicky rotujícími, avšak bývá mechanická rotace nahrazena fázovanou anténní řadou.

1.1.2 Trilaterace

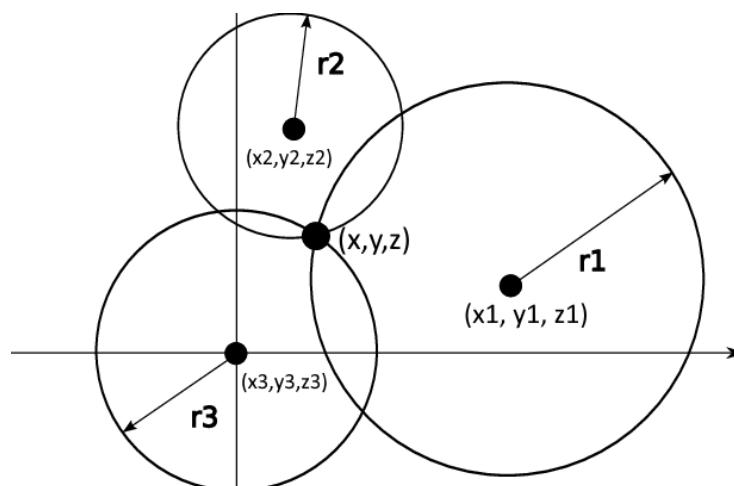
Trilaterační měření vychází z triangulace, ovšem namísto úhlů se pracuje s délkami. Zde tedy neprovádíme výpočet tří úhlů, nýbrž tří délek. Představme si bod, jenž má souřadnice (x, y, z) a kolem námi známých bodů B_1, B_2, B_3 jsou vytvořeny koule s poloměry r_1, r_2, r_3 o velikostech vzdáleností k hledanému bodu. Pro každou kouli je určena rovnice doby šíření radiového signálu a jejím řešením průsečík těchto rovnic (4).

$$T_{Bi} = \frac{1}{c} (\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}) \quad (4)$$

Kde index i označuje jednotlivé signály známých bodů B , souřadnice x, y, z jsou souřadnice neznámého bodu a proměnná c udává rychlost šíření elektromagnetických vln ve vakuu. Z tohoto vztahu lze získat rovnice koulí o poloměrech r_i (5) a souřadnicích středů x_i, y_i, z_i , kde je poloměr roven vzdálenosti vypočtené z rychlosti a doby šíření radiového signálu (6).

$$(cT_{Bi})^2 = r_i^2 \quad (5)$$

$$r_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 \quad (6)$$



obr. 2 - Trilaterační koule a hledaný bod se souřadnicemi x, y, z – vlastní zdroj

1.1.3 Multilaterace

Multilaterací lze označit systém pro určení polohy objektu využívající hyperbolického polohování, a to jak v rovině, tak v prostoru. Důležitým prvkem při provádění tohoto měření, je použití několika pozemních měřicích stanic. V následující podkapitole bude vysvětlen její základní princip využívající TDOA, řešení dohledových systémů a výhody či případné nevýhody daného systému.

1.2 Multilaterační určování polohy (MLAT)

Pod zkratkou MLAT lze nalézt pojem *pseudorange multilateration* nebo také hyperbolické umístění. Jádrem systému tvoří přijímače signálů, hledaný cíl a centrum pro výpočty. Tento systém pracující pomocí hyperbolické navigace slouží k určování polohy cíle, počítajícím rozdíl času příletu přichozích signálů energetických vln (TOA) s předem známým průběhem a rychlostí. V dané situaci, kdy je poloha měřicích stanic známá a známý je i čas příchodu signálů na dané stanice, je možné určit polohu objektu pomocí výpočtu. Při využívání TOA z více satelitů můžeme tyto signály označit jako TDOA a lze je využívat právě v hyperbolickém navigačním systému v prostoru.[1]

1.2.1 Princip

Při důkladném pozorování tohoto systému lze odvodit možné řešení daného problému. Uvažujeme možnou polohu daného objektu, označenou jako P , jež bude představovat skupinu bodů, tvořící možné umístění objektu. Rozdíl vzdáleností těchto bodů určíme jako konstantní vůči dvěma známým bodům B_1 a B_2 , představující přijímače na zemi. Z těchto poznatků lze vyvodit, jakou křivku bude tvořit možná poloha objektu (7). Důsledkem manipulace s dvěma známými body je možné nalézt polohu pouze na 2D ploše.

$$||B_1P|| - ||B_2P|| = konst. \quad (7)$$

Výsledkem tohoto zjištění je fakt, že křivkou, na které lze hledat dané umístění objektu, je hyperbola. Avšak z tohoto počtu známých bodů není možné provést důkladné zjištění umístění cíle, neboť pro jednoznačné určení polohy nelze provádět měření rozdílu zpoždění příjmu signálů pouze ze dvou známých bodů.

Přidání třetího bodu o známé poloze B_3 (v tomto případě opět přijímače) a provedení měření rozdílu zpoždění příjmu mezi ním a ostatními dvěma body, zapříčiní vytvoření 3D plochy, a tím dostáváme druhou hyperbolu (plocha), nebo hyperboloid (prostor). Pokud protneme dva hyperboloidy, výsledkem průsečíku bude opět křivka, tudíž jsme opět nedostali jednoznačné určení polohy, neboť nelze přesně určit výšku hledaného objektu.

Přidáním dalšího přijímače o známé poloze B_4 dosáhneme na možnost měřit i výšku objektu v prostoru. Důležitým poznatkem tedy je, že pro správné určení polohy daného cíle je zapotřebí 4 známých bodů. Jak tento princip funguje je popsáno níže (1.2.2). Ze vztahu (4) lze vyvodit dobu šíření radiového signálu od vysílače (neznámé hodnoty x , y , z), ke známým přijímačům B_i (známé hodnoty x_i , y_i , z_i). Pro vyšší přehlednost systému a lepší vyjádření rovnic umístíme bod B_4 do počátku souřadného systému ($x_4=0$, $y_4=0$, $z_4=0$).

Jelikož přesný čas vyslání signálu pomocí elektromagnetických vln není známý, pozemní stanice mohou měřit pouze rozdíly zpoždění signálů odpovídající rozdílu známých bodů od počátku (8).

$$\Delta t_i = T_{B_j} - T_{B_4} = \frac{1}{c} (\sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_j)^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}) \quad (8)$$

Pro hodnoty i a j platí následující:

$$i \in \{a, b, c\}, \quad j \in \{1, 2, 3\} \quad (9)$$

Lze tedy konstatovat, že hodnoty Δt_i jsou měřeny, souřadnice bodů B (x_j, y_j, z_j) jsou známé a neznámou polohu cíle je možné určit řešením soustavy tří rovnic o třech neznámých po dosazení indexů ze vztahu (9) do vztahu (8).

1.2.2 Řešení dohledových systémů pro TDOA

Multilaterace pro určení polohy je tedy založena na principu popsaném výše (1.2.1), rozdílem je, že vysílače umístěné na objektu vysílají signál a na přijímače nacházející se na zemi jsou časově synchronizované[2]. Pozemní přijímače přijímají signály z cíle s rozdílným časem, ze kterého je daná poloha vypočítávána.

Představme si neznámý cíl, jenž vysílá signál. Tento pulz dorazí k přijímačům B₁ a B₂, v různých časech, které jsou způsobeny rozdílem vzdáleností mezi cílem a právě těmito přijímači. Důležitou roli však hraje známá poloha přijímačů B₁ a B₂. Avšak věcí, která stojí za zmínku, je, že nepostradatelný je v tomto případě opravdu časový rozdíl příletu (TDOA), což znamená, že není potřeba znát absolutní čas vyslání daného signálu. Díky této poloze a získanému TDOA lze geometricky lokalizovat vysílač na jednom z hyperboloidů těchto přijímačů. Při této situaci je však nutné mít na paměti, že je potřeba přijímače časově synchronizovat vůči sobě (1 μ s může způsobit odchylku několika metrů).

Pokud k přijímačům B₁ a B₂ přidáme třetí přijímač B₃, vznikne nám nezávislý uzel pro měření doby příletu (TOA) a druhý uzel pro měření TDOA. Díky spojení těchto dvou bodů difference lze vytvořit křivku mezi hyperboloidy, na níž se daný objekt může nacházet. Díky tomu je již řešení velmi blízko, nicméně stále se jedná o velké množství bodů, které mohou označovat polohu cíle.

Zde přichází na řadu B₄, jehož cílem je vytvoření dalšího uzlu pro TDOA. Díky tomu je možné vytvořit další hyperboloid, který v určitém místě protíná křivku vytvořenou bodem B₃. Výsledkem je vytvoření jedné nebo dvou známých lokací, které mohou určovat polohu námi sledovaného cíle.

Takto synchronizované známé body vytváří tři nezávislé parametry TDOA a s tím i tři nezávislé parametry v prostoru (x, y, z). Díky většímu množství satelitních družic moderních systémů (přijímače) je možné tuto polohu dále upřesnit.

Při využití více než 4 satelitních přijímačů (více než 4 nezávislé TOA) je možné k odstranění chyb využít matematické metody, jako například metodu nejmenších čtverců.

1.2.3 Nalezení přijímače pomocí TDOA

Multilaterace nalezne své využití hlavně při hledání samotných přijímačů signálu (mobilní telefony, GPS přijímače, navigační systémy). U tohoto jevu je možné představit si přijímač pracující na neznámé poloze a vysílače emitující synchronní signály existující na již dané poloze. Jak již bylo popsáno v předchozí kapitole (1.2.2), princip je velmi podobný. Pro určení polohy přijímače v dvourozměrném podání (může se jednat o povrch země), je nutné využít spolupráce alespoň tří různých vysílačů. Při přechodu do trojrozměrného zobrazení je již nutné zajistit tři nezávislé uzly (čtyři vysílané signály).

V zjednodušené představě lze vnímat jednotlivé družice vysílající pulsy ve stejný čas, avšak na rozdílných frekvencích, čímž je zabráněno rušení. V tomto případě je přijímačem měřena doba příletu jednotlivých signálů. V TDOA systémech je pak možné dané TOA od emitorů diferencovat a násobením rychlosti šíření vln utvářet rozdíly vzdáleností.

1.2.4 Výhody a nevýhody systému MLAT

Systém multilaterace navzdory svému komplikovanějšímu řešení principu umožňuje uživatelům získat pozici zařízení s vysokou přesností i bez složitějších systémů. Pro kooperaci je zapotřebí vysílač na jedné straně, lze si jej představit jakožto soustavu časově synchronizovaných satelitů s atomovými hodinami na straně jedné a přijímač s jednoduchými hodinami na straně druhé. S tím souvisí i neomezený počet přijímaných zařízení, neboť uživatel pracuje pouze s přijímačem.

Využíváno je pouze výkonově i rozměrově malých stanic z hlediska přijímače i vysílače, tudíž je systémy možné umístit i do malých zařízení (mobilní telefony, GPS navigační systémy), avšak je možné využít nezávislého i nedetektovaného příjmu pozice.

Multilateraci je možné využít na velké vzdálenosti, tudíž je užívána pro satelitní navigaci včetně GNSS. V neposlední řadě multilaterační vývoj přinesl rozmach v technologiích šíření vln, neboť pro jednotlivé aplikace je využíváno elektromagnetického, vzduchového i podvodního a seismického šíření vln. V této době lze tedy velmi přesně lokalizovat zdroje výbuchů či zemětřesení.

MLAT systém ovšem také není dokonalý. Samotný princip je velmi fyzikálně i analyticky složitý. Pro určení pozice je nutné zajistit operativní režim vysílače v oblasti, ve které se nacházíme. Pro nalezení pozice ve 2D je potřeba alespoň 1 + 2 vysílačů (dnes je pozice určována ve 3D, tudíž je nutné zajistit alespoň 1 + 3 vysílačů), z nichž jeden vysílač tvoří referenci pro určení soustav neznámých o 2, resp. 3 neznámých.

Jednotlivé vysílače mohou vyžadovat napájení i komunikaci v místech, kde není možné tyto operace zařídit. Zjevnou nevýhodou lze charakterizovat nutnost zamezení rušení mezi jednotlivými uživateli při přijímání pulzu na podobných frekvencích, s tím souvisí i nutnost zajistit efektivní vysílání stanic, které se též nesmí rušit. Tato funkčnost je zajištěna frekvenčními (FDMA), časovými (TDMA) a kódovými (CDMA) modulacemi.

2 Novodobé systémy pro určování pozice na Zemi

2.1 Určování polohy pomocí satelitních systémů

Moderní satelitní systémy pro určování polohy (GPS, Glonass, Galileo, Compass), využívají technologii radiového přenosu, jenž pracuje s rozprostřeným spektrem signálů v následujícím uspořádáním:

- Kosmický segment
- Řídicí segment
- Uživatelský segment

Tyto segmenty budou objasněny později (2.2). Pracujeme tedy s přijímačem (uživatelská část), u něhož určujeme polohu ($P(x, y, z)$) pomocí výpočtů vycházejících z radiových měření vzdáleností jednotlivých vysílačů na orbitu (satelitů) – kosmická část. Vycházíme ze znalosti pozice satelitů (x_i, y_i, z_i). Vzdálenosti přijímače od těchto družic lze vyvodit, na základě rychlosti šíření radiových vln a znalosti doby, za kterou signál ze satelitů doputuje právě k přijímači. Tento vysílaný signál obsahuje kódovanou tzv. navigační zprávu (2.1.4), z níž je možné určit aktuální polohu přijímače.

Doba nutná k šíření signálu od vysílače k přijímači se měří pomocí časoměrného Pseudo Random Noise kódu (dále jen PRN). Jedná se o dlouhý řetězec jedniček a nul, jednoznačný pro každou družici satelitního systému (2.3). Tyto kódy jsou tvořeny krátkým (C/A) a dlouhým (P) kódem. Princip si lze vysvětlit na GPS systému, využívajícím kódového multiplexu (CDMA).

Díky tomu je možné použít pro všechny orbity stejnou nosnou frekvenci, neboť se předpokládá řádově stejná výkonová úroveň signálů všech vysílačů v místě přijímače. Lze využít vlastnosti přijímače, který zná PRN kódy všech satelitů. Detekování satelitu vychází ze správné fáze vnitřního generátoru PRN kódu přijímače vůči PRN kódu družice a to tím způsobem, že hledáme maximum korelační funkce. Lze říci, že detekování satelitu je řešením korelace třídimenzionálního problému:

- Změna nosného kmitočtu dle Dopplerova efektu
- Kódový posun PRN konkrétního satelitu
- Počet viditelných satelitů a určení jejich správného PRN kódu

Při tomto určování polohy je nutné vypočítávat korelace všech satelitů současně, je tedy nutné zajistit synchronizaci hodin, avšak víme, že vlivem různých problémů k tomu

nedochází. Synchronizace je tedy nutné dosáhnout jinak. Jak již bylo zmíněno výše, pro přesné určení polohy je potřeba získat informace od čtyř satelitů (1.2.2). Pracujeme se souřadnicemi přijímače (x, y, z) a se souřadnicemi i -tého satelitu (x_i, y_i, z_i), t_i je doba šíření signálu změřená od i -tého vysílače k přijímači a Δt odchylka časové základny přijímače od systémového času. Pro vzdálenost i -té družice od hledaného přijímače potom platí vztah:

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} = (t_i + \Delta t) * c = D_i + b \quad (10)$$

Tímto způsobem lze získat soustavu čtyř rovnic o čtyřech neznámých x, y, z a Δt . Výsledná D_i je pseudovzdálenost (pseudorange) a díky získanému údaji Δt může přijímač synchronizovat hodiny.

2.1.1 Pseudonáhodný kód C / A systému GPS

Kód používaný hlavně systémem GPS, avšak podporující modulaci i na frekvencích systému Galileo je označován jako Coarse / Acquisition code (C / A kód). Je složen z pseudonáhodné posloupnosti 1023 nul a jedniček, a má charakter šumu (PRN kód). Z této posloupnosti je možné vytvořit 2^{1023} kombinací. Využíváno je však určených 37 z nich, u kterých je zajištěna co nejmenší korelace čísel, jedná se o tzv. Goldovy posloupnosti. Výhodou těchto posloupností je nejen malá korelace, ale i vedlejší maxima autokorelační funkce. Rychlost C/A kódu se pohybuje okolo 1,023 Mbit/s, opakuje se tedy každou milisekundu (10^{-3} s). Pro každou družici platí, že má přidělenou svoji vlastní posloupnost nul a jedniček (vlastní C/A kód), čímž jsou družice jednoznačně identifikovány. Tento kód je využíván pro civilní operace a služby, neboť rovnice pro dekodování C/A kódu jsou všeobecně známé [8].

2.1.2 Pseudonáhodný kód P (Y) systému GPS

Pod pojmem Precision code (P (Y) kód) je ukryt název vojenského PRN kódu. Prakticky se jedná o asymetricky šifrovaný P - kód, k jehož čtení je využíváno dešifrovacího klíče. Šifrování je označováno pod pojmem AntiSpoofing (A-S) a účelem je ověřit, zda signál opravdu přichází od daných družic. Šifrování je modulováno Y kódem jako $P \times Y = P (Y)$. Dešifrování je určeno pouze autorizovaným uživatelům, pro něž je k dispozici W kód $P = P (Y) \times W$. P (Y) modulován na obě nosné frekvence L1 (1575,42 MHz) a L2 (1227,62 MHz). Jak již bylo zmíněno výše, jedná se v podstatě o PRN kód přibližné délky

$2,35 \cdot 10^{14}$ bitů. Je složen s 38 sekvencí, kde 32 je vyhrazeno družicím a 6 rezervováno pro jiné účely. Délka jedné sekvence pro jednu družici je $6,19 \cdot 10^{12}$ bitů a datová rychlost je 10 krát větší než u C / A kódu (10,23 Mbit/s). Díky tomu je u Precision kódu zajištěna nízká korelace a možnost lépe identifikovat jednotlivé satelity.

Po vypuštění modernizovaných družic pracuje GPS též s tzv. C (Civilian) a M (Military) kódy. Jedná se o PRN kódy rozdělené na L2C, L1M a L2M (v názvu se objevuje nosná frekvence, na které kód pracuje).

L2C civilní kód funguje jako náhrada C / A kódu a je na rozdíl od původního P (Y) kódu postaven tak, aby na počátku výpočtu polohy bylo nutné používat civilní signál pro synchronizaci hodin. Svou charakteristikou by měl zajistit vyšší ochranu přenosu, lepší korelovatelnost a vyšší vysílací výkon.

Kódy L1M a L2M nahrazují stávající P (Y) kód a pracují na obou nosných frekvencích. Signály jsou vysílány širokopásmovou anténou pro rovnoměrné pokrytí celé hemisféry země a využívají též směrových antén pro regionální zvýšení síly signálu o 20 dB [8].

2.1.3 Signály systému GLONASS

Důležitým prvkem tohoto navigačního systému jsou signály Standard Precision (SP) a High Precision (HP). Signály SP jsou přenášeny na nosné frekvenci L1 a jsou obdobou C s/ A kódu pro GPS pro ruský GLONASS. Jedná se o posloupnost 511 nul a jedniček na frekvenci 511 kHz. Sekvence stejná pro všechny družice se tedy opakuje každou milisekundu.

HP signál pracuje na frekvencích L1 a L2, obdobně jako P-kód u GPS. V podstatě je to SP signál určený pro autorizované uživatele, vytvořený jako pseudonáhodná posloupnost nul a jedniček s frekvencí 5,11 MHz se sekvencí délky $5,11 \cdot 10^6$ bitů stejnou pro všechny družice, čímž je uzpůsobena k opakování každou vteřinu [8].

2.1.4 Navigační zprávy

Z dřívějšího povídání již víme, že jednotlivé družice vysílají tzv. navigační zprávy, pomocí kterých je možné určit přesnou pozici (souřadnice) družice v době odesílání dálkoměrného kódu. Touto zprávou jsou posílány parametry určené k výpočtu této pozice. Navigační zpráva pro GPS obsahuje jak parametry oběžné dráhy družice, ale i údaje jako:

- Čas vysílání počátku zprávy
- Přesné kepleriánské efmeridy družice
- Údaje umožňující korigovat čas vyslání signálu družice

- Almanach (důležitý prvek pro určení viditelných satelitů)
- Koeficient ionosférického modelu
- Stav družic

Zpráva je vysílána v 25 rámcích s dobou odeslání 12 minut 30 vteřin[8]. Každý z těchto rámců obsahuje 5 podrámců. První podrámec obsahuje údaje pro korekci hodin družic, následující dva podrámcce efemeridy dané družice, čtvrtý a pátý podrámec v sobě uchovávají almanach a informace o stavu všech družic.

U modelu GLONASS je využíváno navigačních zpráv s podobnou strukturou jako u GPS:

- Číslo družice
- Stav družice
- Kalendářní číslo dne v rámci čtyř let, počátek je nastaven na přestupný rok
- Korekce družicového času na čas GLONASS
- Posun hodin vzhledem k systémovému času
- Almanach
- Efemeridy jednotlivých družic

Zprávy jsou rozděleny na 5 rámců a každý z nich na 15 podrámců. Pro efemeridy a almanach platí, že jsou k nim připojeny dva příznaky stavu dané družice, nastavované jak automatickou diagnostikou, tak pozemním řídicím střediskem. Almanach je aktualizován jednou za 24 hodin, u efemerid platí obnovování každých 30 minut.

Systém Galileo využívá pro komunikaci 4 druhy navigačních zpráv v závislosti na typu služby:

- F / NAV – volně přístupné navigační zprávy
- I / NAV – navigační zprávy integrity systému
- C / NAV – komerční navigační zprávy
- G / NAV – vládní navigační zprávy

Volně přístupné zprávy obsahují efemeridy a almanach nutné k základnímu určení polohy. I / NAV zprávy obsahují parametry pro určení integrity systému. Zprávy pro komerci využívají korekce pro vysoce přesné určení pozice, informace o počasí a důležitá data o provozu celého systému. G / NAV obsahuje všechny předešlé informace i další data, veřejně nepřístupná civilním uživatelům[6][8][9].

2.2 Struktury satelitních systémů pro určování polohy

V rámci GNSS lze celou jeho funkci od vyslání signálu až po jeho zpracování rozdělit na kosmický, řídicí a uživatelský segment. Každá z těchto částí je tvořena specifickými zařízeními a bloky, nutnými pro správné fungování navigačních systémů.

2.2.1 Kosmický segment

Jedná se o část, jenž je tvořena konstelací umělých družic Země, pohybujících se po předem určených drahách. Tyto konstelace jsou dány:

- Počtem družic na orbitech
- Počtem orbitálních rovin
- Počtem slotů v orbitální rovině
- Tvarem a výškou jednotlivých orbit
- Inklinací orbit
- Orientací orbit vůči Zemi
- Oběžnou dobou družice

Důležitým prvkem satelitů jsou tzv. efemeridy, s jejichž pomocí je možné určit polohu družice v definovaném čase. Signály vysílané satelity mají různou skladbu a jsou vysílané v různých počtech pro jednotlivé systémy GNSS. Rozdíly těchto systémů jsou dále dané počtem družic a jinými oběžnými drahami jednotlivých vysílačů.

Družice dle několika kritérií, jako jsou nastavené parametry a instrukce, generuje nosnou vlnu spolu s pseudokódem (2.1) pro pilotní signály. Vyslaný signál může mít tzv. datovou formu, což je forma navigační zprávy s uloženými daty, nahané řídicím segmentem.

2.2.2 Řídicí segment

Podstatnou část řídicího segmentu tvoří pozemní stanice, zajišťující provoz celého navigačního systému GNSS. Jejich povinností je splnění následujících bodů:

- Monitorování konstelace družic
- Monitorování signálů družic
- Sestavování navigačních zpráv družic
- Udržování systémového času GNSS
- Zajišťování komunikace s družicemi

Tato část úzce spolupracuje s uživatelským segmentem a též částí kosmickou. V praxi se jedná o informační kanály poskytující nepřehledné množství informací o plánovaném stavu kosmického segmentu. S tím souvisí i garance stanovených standardů a s tím související deklarované výkonnostní parametry služeb pro uživatelský segment.

V úvodu této podkapitoly bylo zmíněno, jak je tento systém tvořený. Jedná se o pozemní stanice a komplexní komunikační infrastruktury. Právě stanice lze rozdělit do několika skupin dle nutných kritérií a činností, jež plní:

- Řídicí stanice (Main Control Station – dále MCS) je centrální uzel této části, plánující provoz systému a jeho údržbu spolu s řízením. Zpracovává data získaná od ostatních typů stanic v tomto segmentu, díky čemuž je možné vytvořit navigační zprávy distribuované přes ULS k daným vysílačům. Důležitým úkolem těchto stanic je spravování systémového času GNSS.
- Stanice pro systémový čas GNSS odvozuje systémový čas GNSS v případě, pokud danou úlohu nemůže provést MCS.
- Stanice pro komunikaci s družicemi (Up-link Stations – dále ULS) nahrává datové zprávy k satelitům.
- Povelové stanice a stanice pro telemetrické sledování družic (Tracking, Telemetry & Command / Control – dále TT&C) získávají telemetrická data družic a předávají povely do MCS. Ta díky těmto informacím dokáže řídit konstelaci všech družic.
- Monitorovací stanice (Monitoring Station – dále MS) získává vysílané signály ze satelitů různých systémů GNSS a předává je do MCS.
- Komunikační infrastruktura zajišťuje komunikaci mezi jednotlivými stanicemi řídicího segmentu a tvoří rozhraní mezi řídicí a kosmickou částí. Samotná komunikace je pak zajišťována vyhrazenými stanicemi (TT&C a ULS).

2.2.3 Uživatelský segment

Poslední část je tvořena velmi důležitými přijímači GNSS signálů, jenž mohou určovat svou polohu, čas či rychlost. Pro uživatele je důležité kromě určení jejich polohy a času také možnost využití integrity GNSS systémů. Systémy rozdělují dané uživatele do dvou typů:

- Autorizovaní uživatelé
- Neautorizovaní uživatelé

Autorizace je řešena na úrovni signálů družic, jejichž kombinací je možné vytvořit síť různých typů služeb, určených pro jednu či druhou skupinu uživatelů. Tím je zajištěna možnost pracovat na několika úrovních oprávnění pomocí vhodných GNSS přijímačů a s tím související přesnost lokalizace, závisující též na druhu využití služby. Primární účel tohoto segmentu je tedy zajištění různé míry přesnosti lokalizace pro různé typy využití daných služeb.

2.3 Globální systémy pro určování polohy

K určování polohy různých zařízení využíváme standardy ze systému GNSS. Tento systém se od počátku 21. století díky výraznému zvýšení zájmu u civilních zařízení rozšířil na celosvětové pokrytí službami Global Positioning System (GPS) provozovaným USA, ruským GLONASS, systémem Galileo provozovaným Evropou a čínským BeiDou 2. generace, známým též jako COMPASS. Navigační systémy je možné použít na širokou škálu aplikací, jako jsou sledovací systémy, pěší a mobilní navigace nebo dopravní systémy využívající umělé inteligence.

Díky tomu, že systémy prošly v posledních 20 letech velkým technologickým krokem vpřed, je možné využívat zpřesnění současných systémů pomocí tzv. SBAS systémů. Ty využívají geostacionární družice, přičemž pozemní stanice z těchto informačních dat utvářejí data korekční a pomocí družic jsou tyto informace vysílány k přijímačům (2.2.2).

Systémy GNSS se skládají ze tří segmentů (2.1), jenž jsou společné pro GPS, GLONASS a Galileo, přičemž systém Compass pracuje s lehce odlišným konceptem. Přínos těchto informací spočívá v korekci a přesnějším určení polohy daných systémů, a to hlavně v případě problému některé z družic daného systému.

2.3.1 GPS

Tento americký systém lze považovat za pilotní program moderních navigačních systémů. Původní název tohoto systému byl NAVSTAR GPS a byl vyvíjen od roku 1973 pro potřeby ozbrojených sil USA. Plná provozuschopnost systému i pro civilní účely byla ověřena 17. ledna 1994 při umístění kompletní sestavy 24 družic na oběžnou dráhu. Dnes je k chodu systému využíváno 32 družic ve stavu operační pohotovosti, přičemž alespoň 24 z nich je nutné mít v plné operační dostupnosti. Provozování systému spadá pod Vesmírné síly Spojených států amerických (United States Space Force) a pomocí elektronického přijímače je možné určit přesnou polohu kdekoliv na zemi [9].

- Kosmický segment

Tento segment tvoří satelitní družice GPS. Systém byl projektován na 24 družic, dnes je však využíván v mezním počtu 32. Družice obíhají Zemi na 6 kruhových orbitách ve výšce 20 200 – 20 350 km nad jejím povrchem. Sklon těchto drah je 55° vůči rovině rovníku, přičemž družice jsou vzájemně na kružnici posunuté o 60° . Z toho plyne množství pozic na dané orbitě, nastavené původně na 4 pravidelné pozice, později upravené na 5 - 6 nepravidelných pozic. Díky tomu je dosaženo podmínky minima 4 viditelných satelitů pro přesné zajištění polohy (1.2.2). I přes toto pravidlo jsou satelity rozmístěny asymetricky tak, aby byla zajištěna větší odolnost vůči chybám [6] [9].

Samotné družice váží asi 1.8 tuny a rychlost pohybu je přibližně 3.8 km/s. Z toho plyne doba oběhu kolem země 11 hodin a 58 minut. Každá z družic NAVSTAR obsahuje:

- Přesné atomové hodiny s rubidiovým oscilátorem s přesností 10^{-13} sekundy
- 12 RHCP antén pro vysílání radiových kódů v pásmu L
- Antény pro komunikaci s pozemními družicemi v pásmu S
- Antény pro vzájemnou komunikaci družic v pásmu UKV
- Optické, rentgenové a pulzní detektory odhalující balistické střely a jaderné výbuchy
- Solární panely a baterie jako zdroje energie

Satelitní zařízení několikrát do roka podléhají plánovaným odstávkám kvůli údržbě atomových hodin a korekci jejich dráhy. Tato údržba trvá přibližně 12 - 24 hodin. Průměrná životnost družic je asi 10 let, přičemž celková obměna kosmického segmentu probíhá přibližně 20 let [6] [7] [9].

- Řídicí segment

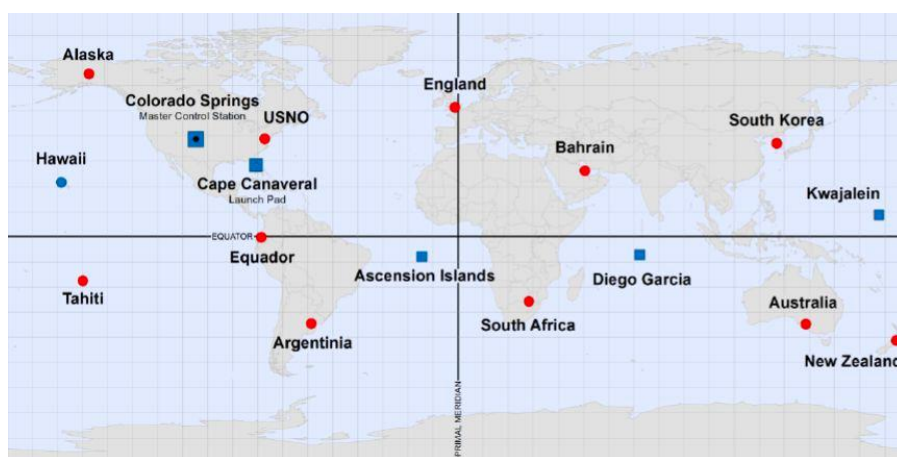
Tato část je složena z několika pozičně odstupňovaných stanic (*obr. 3*), z nichž ty nejdůležitější jsou:

- Velitelství – Navstar Headquarters Los Angeles, California, USA
- Řídicí středisko (Master Control Station) na Schrieverově letecké základně USAF, Colorado Springs, Colorado, USA
- 4 povelové stanice (Ground Antennas)
- 18 monitorovacích stanic umístěných na různých světových základnách USAF

Jedná se o řídicí a kontrolní část monitorující kosmický segment využívaný k vysílání povelů družicím, provádění manévrů a k údržbě. Výsledky monitorování satelitů jsou zveřejňovány v každé navigační zprávě a jejich platnost se pohybuje v řádech jednotek hodin. Tento monitoring obsahuje informace důležité pro určování polohy jako:

- data pro model ionosférické refrakce
- predikce dráhy družice
- korekce atomových hodin
- přibližná pozice ostatních družic

Tento segment komunikuje též s tím uživatelským pomocí Notice Advisory to NAVSTAR Users (GPS NANU), zobrazující plánované odstávky družic a informace o jejich zdravotním stavu. Při vytváření tohoto segmentu byla zavedena myšlenka i pro zálohu těchto segmentů. Ta spočívá v tzv. Autonomous Navigation Mode (AUTONAV), ve kterém spolu družice mohou komunikovat a porovnávat mezi sebou své efemeridy (predikování jednotlivých drah) a stav palubních hodin. Výsledky je možné dále poskytnout uživatelskému segmentu v navigační zprávě [6].



obr. 3 – Řídící segment systému GPS – převzato ze zdroje [6]

- Uživatelský segment

Hlavním stavebním kamenem tohoto segmentu jsou právě GPS přijímače, jež přijímají signály z jednotlivých viditelných satelitů (přijímač je v tomto ohledu pasivní pozorovatel). Na základě těchto dat (časové značky, znalost polohy vysílače) a předem definovaných parametrů je možné, aby přijímač vypočítal polohu antény, nadmořskou výšku, přesné datum a čas, ve kterých byla poloha určena. Přijímače lze rozdělit dle pásma [9]:

- Jednofrekvenční
- Dvoufrekvenční
- Vícefrekvenční (pásma L5 družic)

Rozdělením lze dále pokračovat dle počtu kanálů:

- jednokanálové (využívané v rané fázi vývoje GPS)
- vícekanálové

Každý z těchto přijímačů může také využívat jiný princip výpočtu polohy:

- kódový
- fázový + kódový

Přijímače určené pro amatérské využití (nevojenské a negeodetické) lze popsat jako *jednofrekvenční*, *vícekanálové* a *kódové* zařízení sestavené z těchto částí:

- anténa
- předzesilovač
- procesor
- časová základna
- komunikační rozhraní

Jak již bylo zmíněno výše (2.2.3), je nutné rozdělit jednotlivé uživatele na tzv. *autorizované* a *ostatní (neautorizované)*. Autorizovaným uživatelům, využívajícím službu Precise Positioning Service (PPS), pracujícím s dekódovacími klíči k P (Y) kódu na frekvencích L1 a L2, je zajištěna větší přesnost systému (přesný čas $< 10^{-7}$ sekundy) pro účely podpory velení v boji, zajištění přepravy vojenských záležitostí, navádění zbraňových systémů, vojenské geodézie a mapování [7].

Ostatním uživatelům je k dispozici služba Standard Positioning Service (SPS) a C/A kód na frekvencích L1. Typickými odvětvími pro tento systém jsou pozemní doprava, letectví, námořnictvo a kosmické lety, geologie a geofyzika, geodézie a geografické informační systémy, archeologie, lesnictví, zemědělství, turistika a zábava. Přesnost systému se pohybuje v čase $< 10^{-6}$ sekundy [9].

2.3.2 Galileo

Prvotní plány pro systém nezávislý na GPS a ruském GLONASSu vznikly již v roce 1999. Vývoj systému Galileo, jenž se potýkal kvůli problémům s investicemi ze soukromého sektoru se značným zpožděním, začal v roce 2003. O dva roky později byl do vesmíru

vypuštěn první satelit určený k testování tohoto systému. Financování projektu bylo nakonec zajištěno díky podpoře Evropské unie. Standard je v operačním režimu již od roku 2019 a pracuje s 24 satelitními objekty. Podporu systému zajišťuje EGNOS, což je systém pozemních stanic a geostacionárních družic, sloužící ke zdokonalení určení přesnosti polohy v Evropě. Galileo umožňuje poskytovat služby jako Open Service (OS), což jsou dvoupásmové signály, pracující na 1164 – 1214, resp. 1563 – 1591 MHz [6], zajišťující horizontální a vertikální přesnost s uváděnou požadovanou maximální odchylkou do 7 metrů. Dále jsou to Commercial Service (CS), jakožto zpoplatněná služba přesnější než OS, Safety of Life Service (SOL), neboli kódovaná služba pro nasazení v letovém provozu a v neposlední řadě také Public Regulated Service (PRS), pracující jako zašifrovaná služba určená pro armády a bezpečnost složky států Evropy. Program je projektován jakožto civilní, díky čemuž je zde výhoda funkčnosti i při vyhrocených mezinárodních situacích.

- Kosmický segment

Systém je momentálně tvořen 24 družicemi, z nichž 22 standardně operuje a 2 slouží k testování. Koncepce systému plánuje operační dostupnost 30 satelitů (27 plně operativních, 3 záložní).

Družice obíhají zemský povrch po třech orbitách se sklonem 56° vůči rovině rovníku [6], ve výšce 23 200 km a se vzájemným posunem 120° . Každá dráha má 10 pozic pro umístění jednotlivých družic (1 záložní pro rychlé nahrazení jiným satelitem), tudíž jsou vůči sobě posunuty o 40° . Doba oběhu Země je stanovena na 14 hodin a 7 minut. Je tedy možné využívat systém až na 75° zeměpisné šířky. Díky tomu je zajištěno vyšší pokrytí než u GPS. Každý ze satelitů obsahuje:

- 4 atomové hodiny (vodíkové a rubidiové)
- Generátor navigačních signálů
- Antény pro vysílání těchto signálů a příjem povelů
- Antény pro pátrání a záchranu
- Infračervený senzor, senzory viditelného světla a gyroskop

Každý z vysílačů váží 700 – 750 kg a jejich životnost se pohybuje kolem 12 let. Frekvence využívané OS, nastavené jako nejvhodnější pro systémy radiokomunikace a navigace, jsou využívány k vysílání 10 navigačních zpráv od každé družice [6] [7].

- Řídicí segment

Stejně jako GPS i řídicí segment Galilea se stará o propojení komunikace mezi kosmickým a uživatelským segmentem. Hlavní řídicí střediska Galileo Control Center (GCC) se nachází v italském Fucinu a rakouském Oberpfaffenhofenu. Segment je pak dále tvořen 6 sledovacími stanovišti pro telemetrii, sledování a předávání povelů družicím a 11 monitorovacími stanicemi (Sensor stations) [6] [7].



obr. 4 – Řídicí segment systému Galileo (2018) – převzato ze zdroje [13]

- Uživatelský segment

I přesto, že Galileo je nový standard, v posledních letech se počet zařízení využívajících tento systém zněkolikanásobil. Přijímače, schopné detekovat stanice, byly dříve jen profesionální zařízení pro určování polohy. Dnes si tento systém našel domov v zařízeních civilních zákazníků, jako je nositelná elektronika, mobilní telefony, GPS navigace a tento standard lze nalézt v každém vozidle vyrobeném po roce 2018 a schváleném Evropskou unií.

Služby pro uživatele jsou závislé na typu navigačních zpráv pro tento standard. F / NAV jsou určené neautorizovaným uživatelům a obsahují jen data nezbytná pro určení polohy. Zprávy I / NAV jsou schopné autorizovaným uživatelům dodat informace o nesplnění některého z garantovaných limitů systému a jsou součástí Safety-of-Life služeb jako je vyhledávací a záchranná služba SAR. Zprávy C / NAV jsou určeny pro komerční sféru autorizovaných uživatelů, stejně jako šifrované G / NAV zprávy pro veřejnou regulovanou službu PRS [7] [8].

2.3.3 GLONASS

Pod zkratkou tohoto systému *Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistema* si lze představit globální polohový systém vytvořený Ruskem (původně Sovětským svazem), jehož vývoj započal v roce 1976. Podobně jako u jiných navigačních systémů i zde je možnost využití části služeb pro civilní uživatele. Pro dosažení plné operační dostupnosti je zapotřebí 24 družic, podobně jako u GPS [7]. Tato dostupnost byla zajištěna již v roce 1995, nicméně kvůli krátké životnosti stanic se do roku 2011 vystříдалo již téměř 130 satelitů. I přesto, že projekt spadá pod ruskou Federální kosmickou agenturu se o vývoj, údržbu a provoz systému stará ruská armáda.

Hlavním rozdílem mezi GPS a GLONASS je způsob vícenásobného přístupu. GPS využívá CDMA multiplex spočívající ve stejné frekvenci pro všechny družice různým kódem pro modulaci. Na druhou stranu GLONASS pracuje s FDMA multiplexem vysílajícím stejné zprávy, ovšem na jiných frekvencích než družice opodál.

- Kosmický segment

Až do rozpadu Sovětského svazu se o provoz staraly družice URAGAN (první generace), jejichž životnost se pohybovala v řádu jednotek let. Plné operační dostupnosti dosáhl systém v roce 1996, kdy bylo na orbitách usazeno 24 družic GLONASS. Tyto satelity vysílaly civilní navigační signál na frekvenci L1 a dva totožné vojenské signály na frekvencích L1 a L2[6].

Kvůli špatnému stavu družic byly programem na obnovu od roku 2006 vynášeny do znovu budované konstelace družice URAGAN-M (druhá generace) vyznačující se zvýšenou přesností atomových hodin, delší životností stanic a novými informacemi v signálech a navigační zprávě.

URAGAN-M jsou rozmístěny na třech orbitách se sklonem $64,8^\circ$ k rovině rovníku a vzájemným posunem 120° . Satelity obíhající ve výšce 19 100 km jsou uloženy po 8 na jednotlivých drahách a posunuté vůči sousední družici o 45° . Díky nízké výšce umístění je jeden oběh okolo Země kratší než u GPS – 11 hodin 15 minut, s rychlostí 3.9 km/s. Každá družice nese:

- Atomové hodiny s oscilátorem (cesiový, přesnost $< 10^{-13}$ sekundy)
- 12 antén pro vysílání navigačních signálů
- Antény pro komunikaci s pozemními stanicemi
- Solární panely a akumulátorové baterie

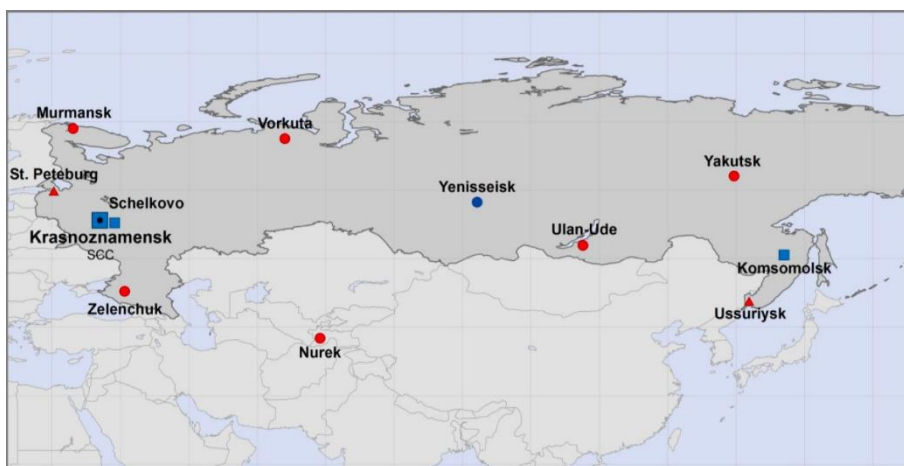
- Laserová měřidla a odrazová pole

Hlavním úkolem kosmického segmentu je v navigačních zprávách zajistit informace o poloze družic pro uživatelský segment, přičemž na základě charakteristik signálů, jenž se během cesty mění, lze spolu s dodatečnými informacemi určit přesnou polohu přijímače [6] [7].

- Řídicí segment

Hlavním úkolem této části, podobně jako u předešlých systémů, je zjišťování stavu, polohy, zrychlení družic, provádění manévru a seřizování atomových hodin. V neposlední řadě jsou družicím zasílány informace potřebné pro navigaci. Konstelace těchto hodnot je společně s polohou každé z družic, frekvencí a informacemi zaslána právě jednotlivým satelitům a ve formě navigační zprávy dodána uživatelskému segmentu. Stanice jsou rozmístěny následovně:

- Řídicí středisko – Krasnoznamensk
- 3 povelové a monitorovací stanice – Šelkovo, Jenisejsk a Komsomolsk
- 2 samostatné povelové stanice – Petrohrad a Ussurijsk
- 6 samostatných monitorovacích stanic



obr. 5 – Řídicí segment systému GLONASS – převzato ze zdroje [6]

Tím, že se jedná o ruský systém, je řídicí segment rozmístěn výhradně na ruském území.

- Uživatelský segment

Stejně jako u GPS i zde tvoří jádro funkce pasivní přijímače signálu z 24 družic systému GLONASS. Tyto přijímače jsou na rozdíl od amerického standardu o něco konstrukčně

složitější, což je zapříčiněno nutností přijímat více frekvencí kvůli rozlišení rozdílných satelitů, neboť systému pracuje FDMA multiplexem. Pro zařízení podporující GLONASS platí, že od obnovení plné operační dostupnosti v roce 2011 se prodej elektroniky s těmito přijímači velmi rozrostl.

Místo samostatných přijímačů se však výrobci navigačních systémů a čipů soustředí především na kombinované přijímače (GPS / GLONASS), díky čemuž lze čerpat výhodou obou systémů. Jednou z výhod je dosažení viditelnosti dvojnásobného počtu satelitů a z toho plynoucí přesnější určení polohy.

Její určování probíhá stejně jako u GPS pomocí polohy družic a časových značek. Pro určení správné nadmořské výšky, zeměpisné šířky a délky a přesného času je tedy nutné přijímat signál alespoň od čtyř viditelných satelitů v dostatečné kvalitě.

Jako u systému Galileo pracujeme dle využívaných služeb s různými standardy:

- Standardní přesnost (Standard Precision) určená pro neautorizované uživatele a pro civilní účely, přesnost v jednotkách metrů
- Vysoká přesnost (High Precision) určená autorizovaným uživatelům s přesností desítek centimetrů.

Pro představu uživateli HP systému jsou Ruská armáda a vysoké státní instituce Ruské federace[6], pro práci těchto organizací přijde vhod i zašifrování signálů[6].

2.3.4 Compass

Systém označovaný jako Compass, známý též pod názvem BeiDou-2, je navigačním systémem Čínské lidově demokratické republiky a nástupce BeiDou-1. Systém první generace byl budován se záměrem vytvořit navigační systém pro lokální potřeby domovské Číny a jejího okolí. První myšlenka jeho vytvoření se objevila v roce 1980, z čehož plyne i plný název projektu BeiDou Satellite Navigation Experimental System. První satelity vynesené na orbity byly BeiDou-1A, BeiDou-1B, BeiDou-1C v rozmezí let 2000 – 2003 [6]. Tyto satelity jsou na rozdíl od předchozích standardů umístěny jako geostacionární. V roce 2004 byl systém zpřístupněn pro civilní použití.

Systém BeiDou-2 nastoupil v roce 2012 po ukončení projektu BeiDou-1 [5]. Prioritou nebylo pouze systém rozšířit, nýbrž vytvořit úplně nový model, využívající kombinace umístění družic (viz *Kosmický segment*). Komplexní struktura systému je podobná Galileu a GPS, neboť využívá podobné frekvence, resp. pracuje s CDMA multiplexem. Podobně jako u předchozích standardů i zde nalezneme služby pro neautorizované, resp. autorizované

uživatelé. Hlavním designérem modelu je čínský inženýr pro letectví Sun Jiadong, který se podílel i na první generaci systému.

23. června 2020 se na orbity dostala kompletní sestava družic[4], včetně nového systému BeiDou-3, umožňující komunikaci SBAS (upřesňování polohy) spolu s Globálním námořním tísňovým a bezpečnostním systémem (GMDSS).

- Kosmický segment

Tato část je lehce odlišná od předchozích systémů, neboť využívá tři různé dráhy pro různé stanice. Konstelace třech orbit se skládá z 5 geostacionárních družic (GEO), obíhajících zemi ve výšce 35 800 km, 3 satelitů na nakloněných geosynchronních drahách (IGSO) a 27 MEO družic ve výšce přibližně 21 500 km nad zemí.

Tyto družice jsou umístěny na třech drahách po osmi pozicích posunutých vzájemně o 45° s jedním záložním místem. Systémový výkon tedy spojuje práci s 35 satelity. Družice se liší v závislosti na drahách hlavně hmotností (GEO – 3050 kg, MEO – 2160 kg, IGSO – 2300kg) [5]. Družice systému BeiDou-3 jsou tvořeny z následujících prvků:

- Vodíkové a rubidiové hodiny (přesnost 10^{-15} sekundy)
- Mezisatelitní antény určené pro zvýšení přesnosti
- Antény pro komunikaci s pozemními stanicemi
- Výkonový S-Band transpondér
- L-Band zesilovač a frekvenční generátor
- Družicový přijímač a laserové měřidlo

Doba životnosti se pohybuje okolo 8 let. BeiDou-3 nabízí horizontální a vertikální přesnost okolo 10 metrů v civilním prostředí a časovou přesnost 0.2 m/s resp. 20 ns. V asijských zemích se přesnost pohybuje okolo 5 metrů pro horizontální a vertikální přesnost [6].

- Řídicí segment

Tato část systému je podobně jako u předešlých složena z hlavního kontrolního centra (MCS), určeného pro kontrolu konstelace a zpracování měření získaných od monitorovacích stanic pro generování navigační zprávy. Dvě povelové stanice mají za úkol donést informace o korekcích a navigační zprávy daným satelitům a 30 monitorovacích stanic získává z družic potřebná data pro generování těchto zpráv. Uživatelé si mohou od řídicí části vyžádat informace o jednotlivých satelitech pomocí krátké zprávy [6] [7].

- Uživatelský segment

System pracuje na principu obousměrné komunikace uživatelských zařízení se satelitem. Nejedná se tudíž pouze o pasivní přijímač, ale je nutné, aby vysílal své žádosti o lokalizaci. Z toho plynou vyšší nároky na velikost, výkon a s tím související kapacitu baterií a cenu.

Princip spočívá v poslání dotazovacího signálu od řídicí stanice přes dva satelity až k uživateli. Uživatelský přijímač odešle oběma satelitům odpověď a řídicí stanice pomocí časového rozdílu příchodu těchto zpráv vypočte 2D pozici uživatele. Za pomoci mapové databáze je získána 3D poloha a ta je odeslána šifrovaným kanálem k uživateli [5].

Compass podporuje služby globální i regionální. Globální služby tvoří služby otevřené (OS) a služby pro autorizované uživatele. OS služba bude poskytovat informace o poloze stejně jako jiné navigační standardy. Jak již bylo zmíněno výše, obecně platí garantovaná přesnost do 10 metrů v horizontálním i vertikálním směru. Služba autorizovaným uživatelům je dostupná pouze schváleným subjektům. Díky tomu dosáhnou vyšší přesnosti a je jim umožněno využívat satelity pro komunikaci mezi uživateli.

Regionální služby jsou rozděleny následovně:

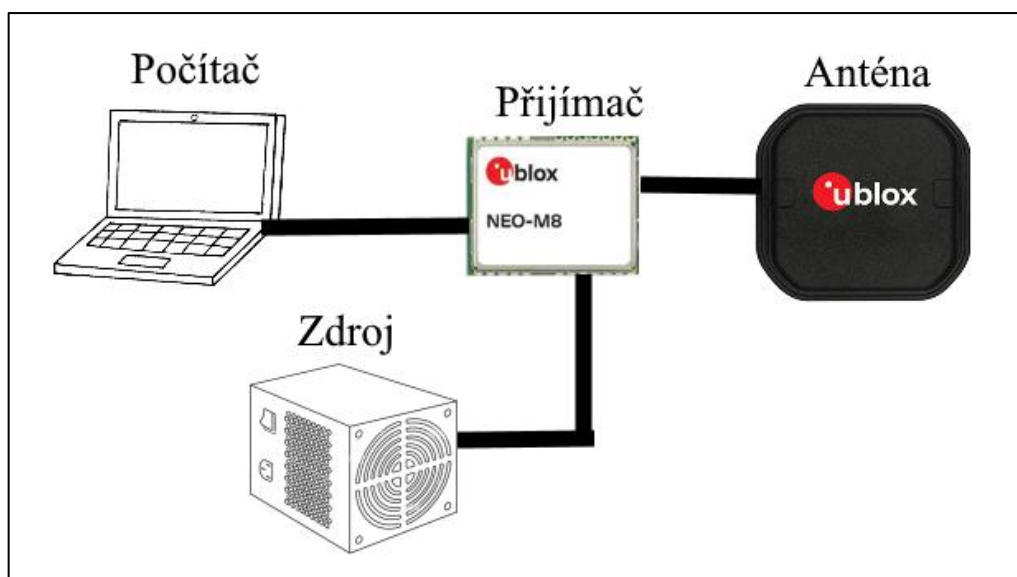
- Wide Area Differential System – WADS – služba diferenciální lokalizace
- Short Message Service – SMS – služba přenosu krátkých zpráv

Diferenciální lokalizace využívá monitorovacích stanic, vysílajících korekční signály družicím GEO. Díky tomu je možné dosáhnout přesnosti lokalizace až 1 metr. SMS byly zajištěny již v první generaci a prakticky se jednalo o maximálně 120 znakové zprávy pro výměnu dat mezi segmenty. Dnes jsou prodlouženy a je možné získat informace nad rámce týkající se lokalizace (stav hodin, zdraví družic) [6] [7].

3 Pracoviště pro vyhodnocování satelitního měření polohy

3.1 Použitý hardware

K získání polohy přijímače bylo využito zařízení nacházející se v budově FEL ZČU. Součástí nainstalované měřicí soustavy (*Příloha 11*) byl počítač s nainstalovaným softwarem U-Center pro měření dat, přijímač U-Blox ve verzi M8N a na střechu vyvedený koaxiální kabel s anténou (*obr. 6*).



obr. 6 – zapojení měřicí stanice pro získávání polohy – vlastní zdroj

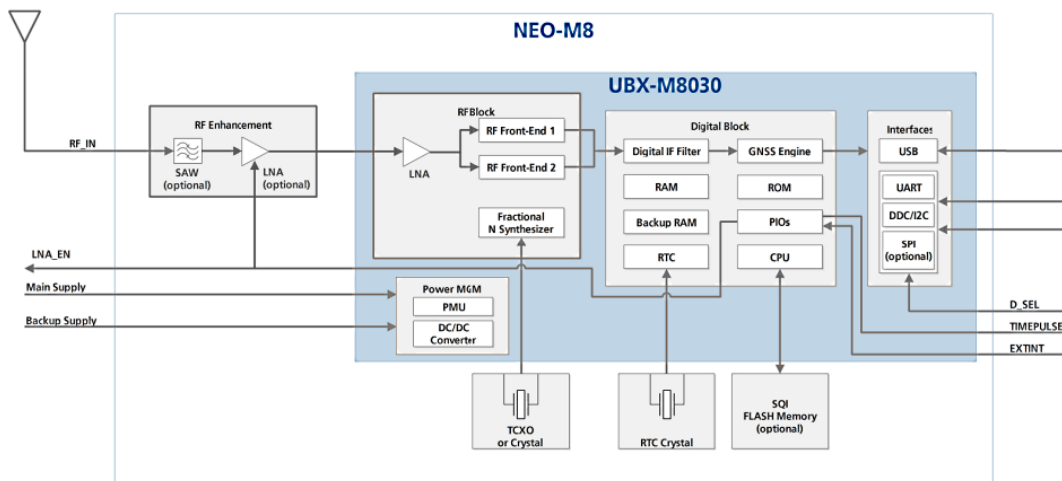
Přijímač byl napájen z 5V zdroje pomocí USB kabelu zapojeného v PC s upraveným konvertorem v přijímači, neboť maximální napětí vnitřních obvodů je 3.6 V. Napájení antény (*Příloha 13*) probíhalo pomocí přijímače. Její minimální zisk musí být 15 dB, aby bylo možné pokrýt ztráty zapříčiněné koaxiálním kabelem vedoucím k anténě. Anténa též podporuje multiband technologie využívající následující standardy:

- L1/CA pro GPS
- E1 pro Galileo
- L10F pro GLONASS
- B1 pro Compass.

Pro námi provedené měření nebylo tedy možné využít služeb s přesnějším určením polohy, tudíž k měření bylo využíváno přijímání satelitních dat s přesností otevřených služeb.

3.1.1 Přijímač U-Blox

Satelitní přijímač U-Blox ve verzi M8N (*Příloha 12*) je zařízení složené z několika prvků, které lze vidět v blokovém diagramu (*obr. 7*). Důležitou roli zde hraje radiofrekvenční blok, číslicový blok a blok rozhraní.



obr. 7 – Blokové schéma U-Blox M8N přijímače – převzato ze zdroje

Napájecí obvod je vylepšen o DC – DC konvertor sloužící k vylepšení účinnosti při napájení z více než 2.5 V zdroje. Před radiofrekvenční část je možné volitelně zařadit blok pro vylepšení přijímaného signálu z antény. Pověštinou je složen z pásmové propusti, omezující blokování signálu silným pozemním vysíláním a LNA předzesilovače, jež odstraňuje zvětšený šum zanesený právě pásmovou propustí pro co nejmenší zkreslení získaného signálu.

V radiofrekvenčním bloku je opět předzesilovač rozdělující signál na dvě cesty RF Front End. Jedná se o obvody posílající data v přesně daném pásmu a v přesně určený čas, což je zajištěno oscilátorem s hodinami.

V číslicovém bloku jsou data zpracovávána pomocí GNSS Engine procesoru pracujícím s 32 kHz RTC oscilátorem. Data jsou pro rychlejší zpracování ukládána do RAM. Výhoda zde vzniká při napájení přijímače ze záložního zdroje, neboť výpočtový obvod je sice odpojen, avšak RTC základna stále běží v tzv. *backup mode*, což umožní uložit veškerá přijatá data do záložní RAM před obnovením napájení [14].

Výsledná data uložená v ROM putují přes podporovaná rozhraní (*interface*) do zpracujícího softwaru, v našem případě se jedná o software U-Center.

3.1.2 Technické parametry

Jak již bylo zmíněno výše, přijímač U-Blox M8N pracuje s napájením do maximální hodnoty 3.6 V a to jak s hlavním, tak záložní napájecí zdroj. Typickou hodnotou je 2.7 V a v klidovém režimu prochází obvodem proud 10 mA. Při pohledu na operativní teplotu RAM a ROM paměti zjistíme, že s daty je možné pracovat při teplotě úložiště od -40 do 85 °C.

Pokud přejdeme k parametrům pro GNSS signály zjistíme, že se jedná o 72 kanálový přijímač podporující pásma GPS L1C/A, SBAS L1C/A, QZSS L1C/A, QZSS L1 SAIF, GLONASS L1OF, BeiDou B1I, Galileo E1B/C, zvládající přijímat pulsy v rozmezí 30 – 60 ns. Frekvenci jednotlivých pulsů je možné nastavit od 0.25 Hz do 10 MHz. Přístroj je možné používat do výšky 50 km při rychlosti 500 m/s.

Největší roli pro nás však hraje přesnost přístroje při určování polohy pomocí GNSS. V datasheetu lze vyčíst garantované odchylky horizontálních hodnot, pro něž platí:

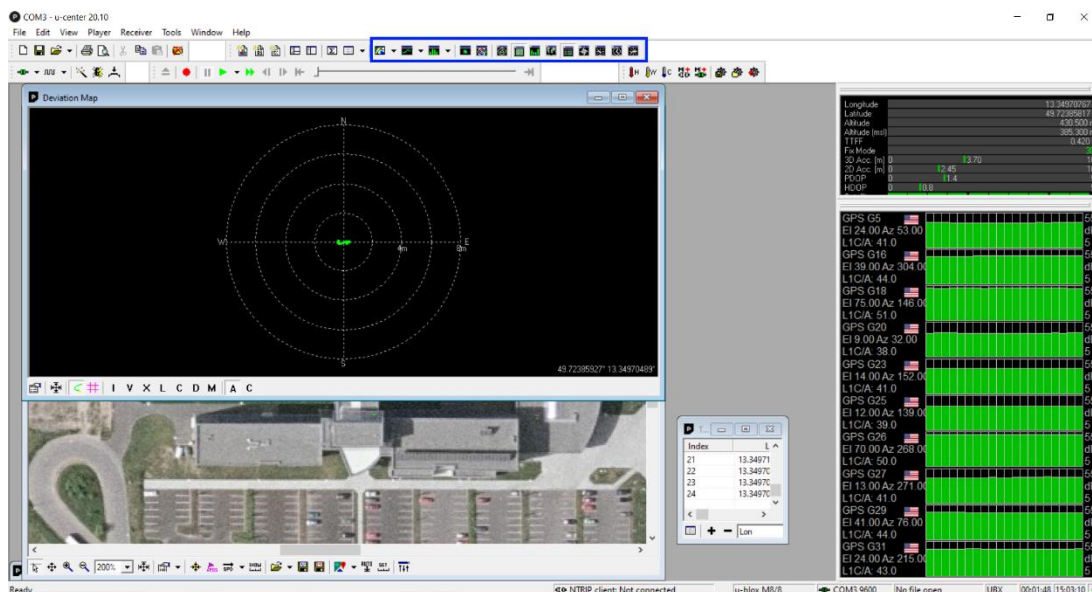
- GPS – 2.5 metru
- GLONASS – 4.5 metru
- BeiDou – 3 metry
- Galileo – 3 metry

Hodnoty dané datovým listem budou v závěru práce porovnávány s námi naměřenými hodnotami a také oficiálními výsledkovými dokumenty (4.4).

Každou novou pozici je možné pomocí podporovaných GNSS standardů obnovovat s maximální frekvencí 10 Hz. Pokud je přijímač odpojen od napájení, pak platí tzv. *time-to-first-fix* v rozmezí 29 – 45 sekund. V podstatě se jedná o dobu, než je zachycena přesná pozice přijímače. Pokud přijímač pracuje ve stand-by režimu, je garantováno zachycení pozice do 1 vteřiny. Veškeré parametry lze nalézt v příloze (*Příloha 10*).

3.2 Software pro měření dat

Pro získávání dat z měřicího přijímače U-Blox slouží software U-Center. Jedná se o uživatelský program od stejnojmenné společnosti, pracující s přijímačem a vybavený širokou škálou nastavení různých parametrů pro přijímání GNSS signálů. Prostředí programu je možné plně personalizovat, čímž je zajištěno efektivní zobrazení důležitých parametrů pro měření různých systémů.



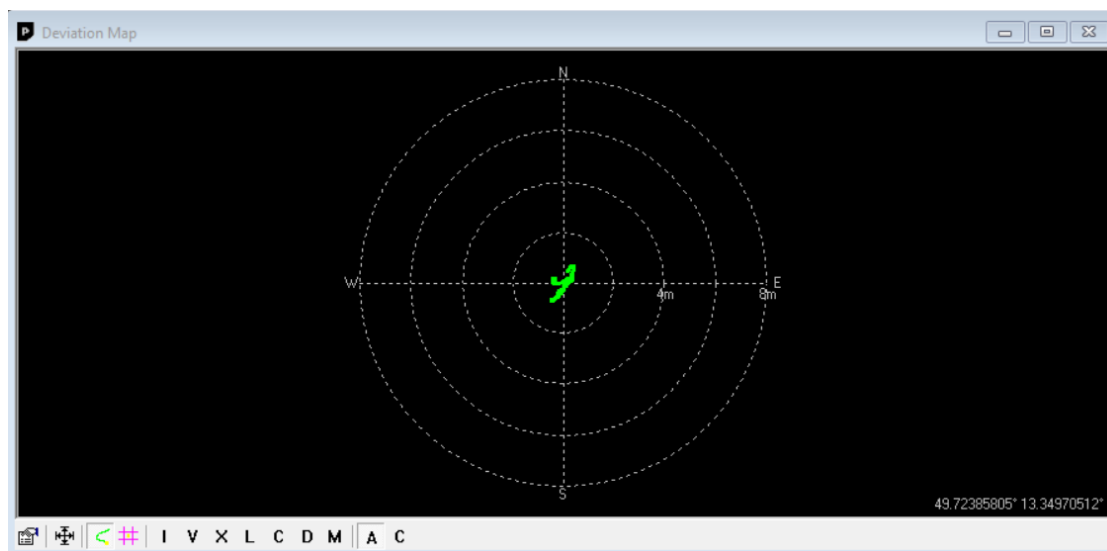
obr. 8 – Prostředí programu U-Center – vlastní zdroj

3.2.1 Uživatelské prostředí

Pro účely naší práce budeme pracovat s jediným modelem zobrazení, který nám poskytne zobrazení důležitých dat a požadovaných informací. Po otevření programu lze pomocí ikon v toolbaru (obr. 8 – modře zvýrazněná lišta) navolit zobrazení námi požadovaných informací. V našem případě budeme k přehledné orientaci potřebovat následující položky k zobrazení:

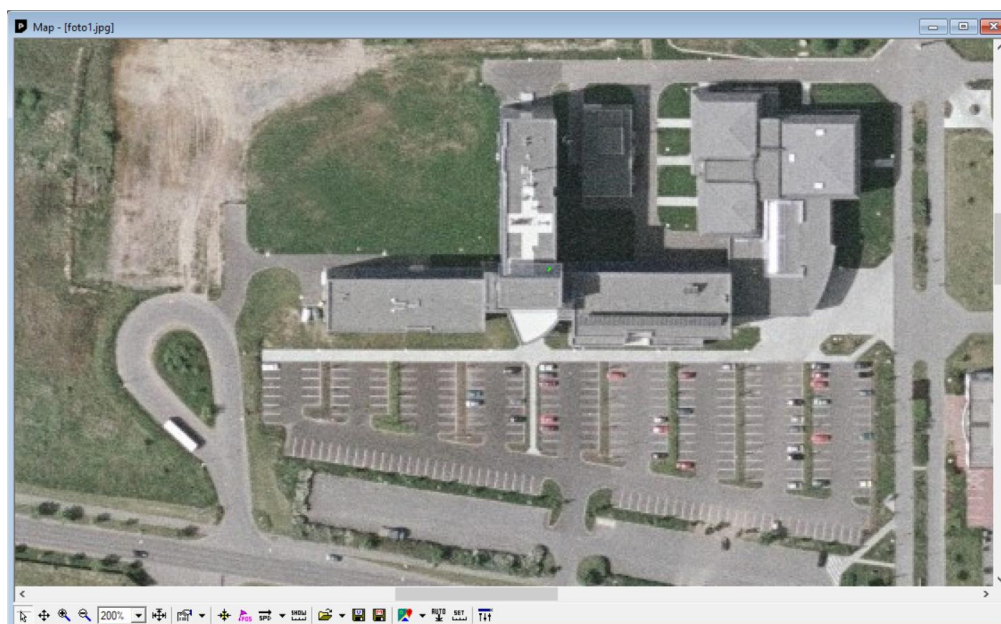
- Deviation Map
- Map
- Table
- Satellite List
- Receiver Information

Pod pojmem *Deviation Map* (obr. 9) se ukrývá telemetrické zobrazení pozice přijímače U-blox, jenž je umístěn jako středový bod několika soustředných kružnic. Jednotlivé kružnice zobrazují odchylky měření od přijímače, označené zelenými body. Vzdálenost i počet kružnic lze manuálně navolit, nebo podle počtu nasbíraných signálů lze nechat software automaticky pracovat, přičemž počet kružnic je dynamicky volený v závislosti na rozdílu minimální a maximální odchylky měření. Tento zobrazovací modul nabízí několik možností zobrazení, z nichž je například možné využít zobrazení pozice aktuální odchylky nebo zobrazení všech odchylek. Vzhledem k vysokému počtu nasbíraných dat využíváme plně automatický režim v kombinaci se zobrazením všech naměřených odchylek.



obr. 9 – Podokno Deviation Map programu U-Center – vlastní zdroj

Okno s názvem *Map* (obr. 10) zobrazuje podobné informace jako *Deviation Map*, s tím rozdílem, že nevyužívá soustředných kružnic, ale jako podklad slouží satelitní snímek místa s umístěným přijímačem (pro podklad jsou využívány Google Maps). Toto okno umožňuje pracovat s naměřenými vzorky v několika různých módech. Lze jej využít pro pozorování odchylek od přijímače (použito v této práci), pro manuální měření vzdálenosti jednotlivých odchylek s následnou možností exportu dat nebo je možné procházet historii celého měření a sběrů dat v čase a zjistit například, v jakém časovém úseku bylo měření dat nejpřesnější.



obr. 10 – Podokno Map programu U-Center – vlastní zdroj

Pro tuto práci nejdůležitější okno *Table* slouží k ukládání naměřených parametrů, důležitých pro vyhodnocování měření a odchylek měření. Nastavení samotného okna

je specifické pro každý ze standardů (3.2.2), stejně tak jako výběr jednotlivých parametrů (3.2.3).

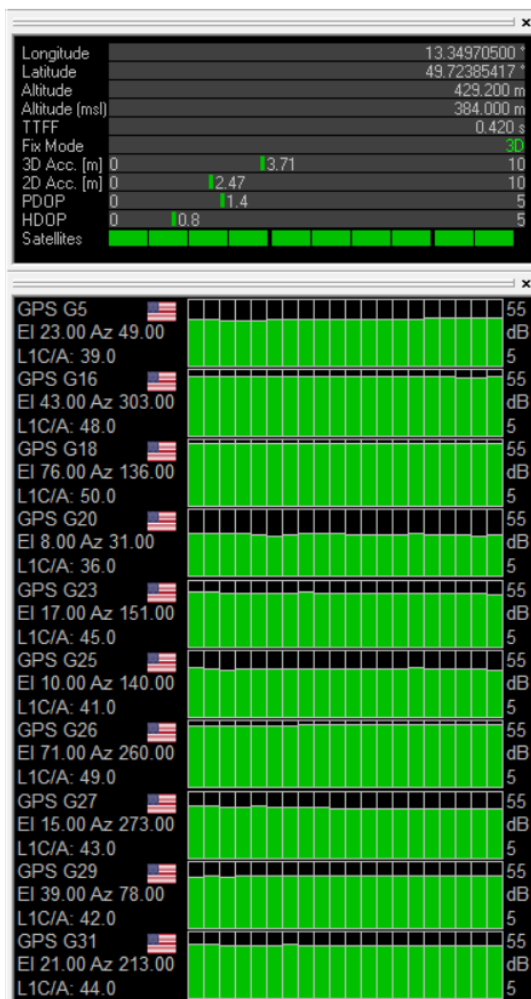
Zobrazení *Satellite List* slouží k zobrazení právě přijímaných družic pro náš přijímač. Na obrázku (*obr. 11*) je uveden příklad pro měření GPS signálů. V tomto okně jsou zobrazeny viditelné satelity, jejich azimut (úhel sevřený vůči skutečnému severu), vlajka státu, jemuž družice (systém) patří, dále pak elevace a v neposlední řadě jedinečný C/A kód daného satelitu. Pro uživatele je k dispozici zobrazení výkonové úrovně signálu satelitu, kdy je rozděleno zobrazení pro několik úrovní:

- Satelit je v operačním režimu a viditelný (zelená)
- Satelit není viditelný (červená)
- Satelit je viditelný, ale nebyl použitý pro získání pozice (modrá)

Poslední z použitých oken je *Receiver information*. Toto zobrazení slouží k zobrazení kombinovaných dat z přijímače, sesbíraných dat a vysílačů. Lze na něm zobrazit vypočtené souřadnice umístění přijímače, nadmořskou výšku, dobu zjištění polohy, přesnost z dvojdimenzionálního či trojdimenzionálního měření a hodnoty Position Dilution of Precision (PDOP) a Horizontal Dilution of Precision (HDOP).

Proměnná DOP může nabývat hodnot 0 – 30, kdy hodnota kolem čísla 1 značí velmi kvalitní příjem signálu. Obě hodnoty, zmíněné výše, určují kvalitu přijímaného signálu. PDOP je kvalitativní hodnota vycházející z počtu viditelných satelitů a jejich polohy vůči lokalizačnímu cíli. Čím více viditelných satelitů je v daný okamžik nad přijímačem a méně se jich pohybuje k horizontu, tím je hodnota DOP blíže ideálu.

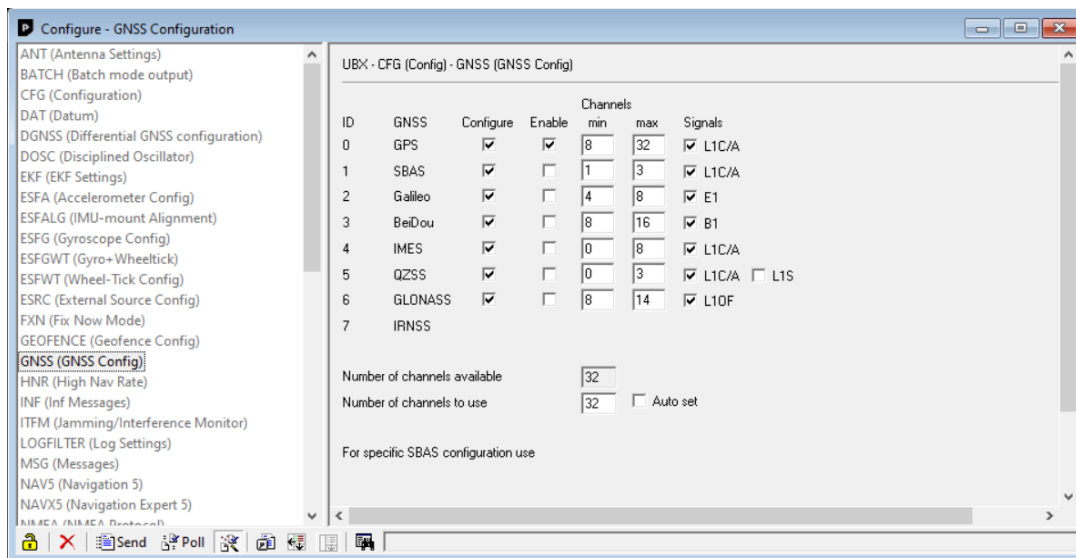
Hodnota HDOP nám určuje kvalitu určení horizontálních hodnot (zeměpisná šířka a délka), přičemž platí, že čím více je viditelných satelitů, tím přesnější je určení daných parametrů. Analogicky lze k této proměnné zavést Vertical Dilution of Precision (VDOP), určující kvalitu zeměpisné výšky.



obr. 11 – Podokna Satellite List a Receiver information programu U-Center – vlastní zdroj

3.2.2 Nastavení měřičiho softwaru pro získání pozice

Jak již bylo zmíněno v předchozí podkapitole, nastavení měření probíhá pro různé GNSS systémy individuálně. Přes software U-Center je nutné přijímači zadat, přes který z GNSS standardů chceme v daný moment získat pozici.



obr. 12 – Konfigurace jednotlivých standardů GNSS – vlastní zdroj

Pro nastavení daných parametrů je potřeba v toolbaru kliknout na ikonu *Configure*, tím se dostaneme do nastavení programu. Pro konfiguraci je nutné najít v seznamu v levém podokně záložku *GNSS (GNSS Config)*. Po označení záložky se otevře podokno nastavení GNSS (obr. 12).

Každý ze standardů má přidělené své *ID* číslo a checkbox *Configure* umožňuje danému přijímači nechat jednotlivé standardy v pohotovosti. Druhý checkbox v poli *Enable* je důležitým pro získávání pozice, neboť jen standardy, jejichž políčko je zaškrtnuté, jsou přijímačem přijímány. V praxi jde tedy kromě navolení jednotlivých systémů použít i různé kombinace používaných GNSS systémů. Pole *Channels* určuje minimální a maximální možný počet přijímaných družic a u pole *Signals* je možné vidět, které pseudonáhodné kódy je nám dovoleno používat. Pro nastavení je nutné kliknout na tlačítko *Send* v levé dolní části okna. Pro uložení tohoto nastavení pro budoucí použití je nutné přejít do záložky *CFG (Configuration)*, označit položku *Save* a opět kliknout na tlačítko *Send*.

Pro účely této práce budeme pracovat se sestavami GNSS standardů v následujících konfiguracích:

- GPS
- Galileo
- GLONASS
- Compass
- Compass + GPS
- Compass + Galileo
- Galileo + GLONASS
- GPS + GLONASS
- GPS + Galileo

Z těchto sestav budou zpracována naměřená data, jejichž výsledek bude porovnáván za účelem získání co nejpřesnějšího systému pro určení pozice našeho přijímače. Důvod zvolení kombinací systémů je vysvětlen v kapitole vyhodnocování výsledků kombinací GNSS (4.3).

3.2.3 Parametry určené pro logování

Důležitým prvkem pro naše měření je logovací tabulka *Table (obr. 13)*. Pomocí této tabulky je možné uložit parametry získané z naměřených hodnot a využít je k následujícímu zpracování. Pro každý ze systémů je před každým měřením nutné nakonfigurovat tabulku zvlášť tak, aby uložené parametry odpovídali danému standardu GNSS. Parametry, které budeme do tabulky ukládat, jsou:

- Index
- Longitude
- Latitude
- X, Y, Z coordinates
- SVs Received
- Used SVs
- SV Residual

Parametr *Index* slouží k získání celkového počtu naměřených určení pozice. Pro získání určitých informací ohledně jednotlivých systémů bylo nutné provést určení pozice při získávání dat více než 50000 krát pro každé měření.

Hodnoty *Longitude* a *Latitude* určují zeměpisné souřadnice pozice přijímače. Ve sloupci *Altitude (MSL)* je schována nadmořská výška přijímače v metrech a pod stejnými jednotkami lze nalézt souřadnice *X, Y, Z*, které udávají absolutní polohu ve 3D prostoru.

K přehledu informací o satelitech slouží sloupce *SVs Received* a *Used SVs*. První jmenovaná záložka zobrazuje počet družic, ze kterých jsou signály přijímány, druhý sloupec zobrazuje názvy právě přijímaných viditelných satelitů.

Specifickou konfigurací pro každý ze systémů GNSS je nastavení *SV Residual*, což jsou sloupce zobrazující odchylku určení pozice přijímače. U každé z družic je tato položka zobrazena jako číslo znamenající odchylku v metrech. Pro každý ze standardů bylo nutné nastavit tyto sloupce jinak:

- *GPS SV Residual G1 – G32 (LIC/A)*
- *GLONASS SV Residual R1 – R31 (L10F)*
- *Galileo SV Residual E1 – E36 (E1C)*
- *BeiDou SV Residual B1 – B37 (B1D1)*

Poté, co byl získán větší počet naměřených pozic, byly výsledky pro každý ze systémů exportovány ve formátu *.csv* k dalšímu zpracování (4).

Index	Lon	Lat	Alt (MSL)	X	Y	Z	SVs Received	Used SVs	SV G1 Re...	SV G2 Re...	SV G3 Re...	SV G4 Re...
76	13.34970...	49.72386...	383.400	4019980...	953966.270	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
77	13.34970...	49.72386...	383.400	4019980...	953966.250	4843317...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
78	13.34970...	49.72386...	383.400	4019980...	953966.190	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
79	13.34970...	49.72386...	383.300	4019980...	953966.140	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
80	13.34970...	49.72386...	383.200	4019980...	953966.100	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
81	13.34970...	49.72386...	383.200	4019980...	953966.050	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
82	13.34970...	49.72386...	383.200	4019980...	953966.000	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
83	13.34970...	49.72386...	383.200	4019980...	953965.940	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
84	13.34970...	49.72386...	383.300	4019980...	953965.910	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
85	13.34970...	49.72386...	383.300	4019980...	953965.890	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
86	13.34969...	49.72386...	383.300	4019981...	953965.880	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
87	13.34969...	49.72386...	383.300	4019981...	953965.860	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
88	13.34969...	49.72385...	383.300	4019981...	953965.900	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
89	13.34970...	49.72385...	383.300	4019981...	953965.950	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
90	13.34970...	49.72385...	383.300	4019981...	953966.000	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
91	13.34970...	49.72385...	383.400	4019981...	953966.060	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
92	13.34970...	49.72385...	383.500	4019981...	953966.100	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
93	13.34970...	49.72385...	383.500	4019981...	953966.140	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
94	13.34970...	49.72385...	383.600	4019981...	953966.210	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
95	13.34970...	49.72385...	383.700	4019981...	953966.250	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
96	13.34970...	49.72385...	383.700	4019981...	953966.320	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
97	13.34970...	49.72385...	383.800	4019981...	953966.400	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
98	13.34970...	49.72385...	383.900	4019981...	953966.450	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
99	13.34970...	49.72385...	384.000	4019981...	953966.480	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
100	13.34970...	49.72385...	384.000	4019981...	953966.550	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
101	13.34970...	49.72385...	384.100	4019981...	953966.580	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
102	13.34970...	49.72385...	384.100	4019981...	953966.620	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
103	13.34970...	49.72385...	384.100	4019981...	953966.610	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
104	13.34970...	49.72385...	384.100	4019982...	953966.590	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
105	13.34970...	49.72385...	384.100	4019982...	953966.550	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
106	13.34970...	49.72385...	384.100	4019982...	953966.540	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00
107	13.34970...	49.72385...	384.100	4019982...	953966.530	4843316...	10	G5 G16 G18 G20 G23 G25 G26 G27 G29 G31	0.00	0.00	0.00	0.00

obr. 13 – Podokno Table programu U-Center – vlastní zdroj

4 Zpracování naměřených dat

4.1 Skripty pro zpracování dat

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, naměřená data, exportovaná v souboru ve formátu *.csv*, bylo nutné ve vhodné formě zpracovat. K tomuto účelu byl použitý skriptovací software MATLAB, umožňující práci s vektory a maticemi, zobrazování 2D a 3D grafů, implementaci algoritmů, či analyzování a prezentování dat. V tomto softwaru byly vytvořeny skripty se vzorci, na jejichž základě bylo možné objemné množství získaných informací přehledně zpracovat do grafů.

U každého ze standardů GNSS bylo nutné vytvořit z exportovaných dat soubor s vektory hodnot a dále skript pro výpočty, díky čemuž dosáhneme zobrazení grafů s pravděpodobnostmi a histogramu, což umožní získat poznatky o přesnostech systémů GNSS. Vzorce se dle použitých standardů lišily parametry získanými tabulkou (3.2.3).

Správně provedené načtení dat bylo základem pro budoucí výpočty. V MATLABu slouží k této akci vestavěná funkce *Import Data*, přičemž po kliknutí na toto tlačítko se zobrazí dialogové okno zobrazující veškeré podporované datové formáty. Průchodem přes adresáře v tomto okně nalezneme daný *.csv* soubor, jenž chceme načíst a kliknutím na tlačítko *Otevřít data* načteme.

V nově zobrazeném okně (*obr. 14*) jsou zobrazena všechna data, která se v datovém souboru nachází. V horní části okna je pak možné upravit parametry načtení dat.

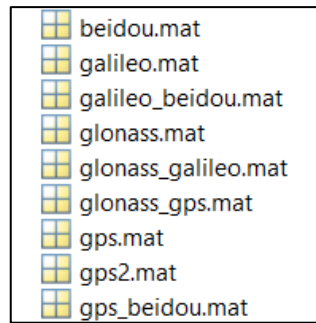
tableview_211123_Galileo.csv														
tableview211123Galileo														
Index	Lat	Lon	AltMSL	X	Y	Z	SVsReceived	UsedSVs	SVE1Resid...	SVE2Resid...	SVE3Resid...	SVE4Resid...	SVE5R	
Number	Number	Number	Number	Number	Number	Number	Number	Categorical	Number	Number	Number	Number	Number	Number
1	Index	Lat	Lon	Alt (MSL)	X	Y	Z	SVs Received	Used SVs	SV E1 Resid...	SV E2 Resid...	SV E3 Resid...	SV E4 Resid...	SV E5 R
2	0	49.72385383	13.34971367	381.200	4019980.030	953966.680	4843314.730	8	E2 E11 E12 ...	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	1	49.72385500	13.34971400	381.300	4019979.990	953966.700	4843314.860	8	E2 E11 E12 ...	0.00	-0.20	0.00	0.00	0.00
4	2	49.72385617	13.34971400	381.400	4019979.960	953966.700	4843315.060	8	E2 E11 E12 ...	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	3	49.72385750	13.34971500	381.600	4019979.920	953966.760	4843315.230	8	E2 E11 E12 ...	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00
6	4	49.72385933	13.34971617	381.700	4019979.810	953966.810	4843315.440	8	E2 E11 E12 ...	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00
7	5	49.72386050	13.34971667	381.700	4019979.710	953966.830	4843315.540	8	E2 E11 E12 ...	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00
8	6	49.72386217	13.34971733	381.800	4019979.620	953966.860	4843315.730	8	E2 E11 E12 ...	0.00	-0.10	0.00	0.00	0.00
9	7	49.72386317	13.34971800	381.700	4019979.500	953966.880	4843315.730	8	E2 E11 E12 ...	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00
10	8	49.72386417	13.34971850	381.600	4019979.360	953966.880	4843315.770	8	E2 E11 E12 ...	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00
11	9	49.72386450	13.34971900	381.800	4019979.410	953966.920	4843315.910	8	E2 E11 E12 ...	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00
12	10	49.72386567	13.34972200	382.200	4019979.530	953967.180	4843316.320	8	E2 E11 E12 ...	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00
13	11	49.72386633	13.34972450	382.600	4019979.690	953967.410	4843316.680	8	E2 E11 E12 ...	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	12	49.72386617	13.34972667	383.300	4019980.100	953967.660	4843317.190	8	E2 E11 E12 ...	0.00	-0.10	0.00	0.00	0.00
15	13	49.72386683	13.34972933	383.800	4019980.300	953967.910	4843317.610	8	E2 E11 E12 ...	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	14	49.72386800	13.34973200	384.400	4019980.540	953968.170	4843318.150	8	E2 E11 E12 ...	0.00	-0.10	0.00	0.00	0.00
17	15	49.72386933	13.34973550	384.400	4019980.380	953968.380	4843318.250	8	E2 E11 E12 ...	0.00	-0.40	0.00	0.00	0.00
18	16	49.72387050	13.34973733	384.500	4019980.320	953968.500	4843318.420	8	E2 E11 E12 ...	0.00	-0.50	0.00	0.00	0.00
19	17	49.72387200	13.34973800	384.600	4019980.220	953968.530	4843318.560	8	E2 E11 E12 ...	0.00	-0.20	0.00	0.00	0.00
20	18	49.72387267	13.34973867	384.600	4019980.210	953968.570	4843318.680	8	E2 E11 E12 ...	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

obr. 14 – Importování dat z exportovaného souboru do MATLABu – vlastní zdroj

Výběrem přes jednotlivé buňky je možné vybírat sloupce a řádky, které chceme k importu použít. Pro naše účely necháme zaškrtnuté políčko *Delimited*, což zaručuje oddělení jednotlivých sloupců pomocí oddělovače a z menu *Column Delimiter* zvolíme správný oddělovač odpovídající našemu souboru. Vybereme tedy položku *Comma*, a tím umožníme MATLABu oddělit jednotlivá data pomocí čárky.

Nastavení *Variable Names Row* určuje, kolik řádků z načteného souboru tvoří názvy jednotlivých sloupců. Výběr *Output Type* slouží k formátování výstupního souboru. Naším účelům nejlépe vyhovuje položka *Column Vectors*, zaručující vytvoření vektorů pro každý načtený sloupec oddělený oddělovačem.

Tlačítkem *Import Selection* jsou data načtena v námi stanoveném formátu do prostředí *Workspace*, potřebně uspořádaném pro následující zpracování. Pro uložení tohoto prostředí klikneme na tlačítko *Save Workspace* a potvrzením dialogového okna uložíme výsledný soubor do datového formátu *.mat*.



obr. 15 – uložené vektorové soubory s daty naměřených hodnot – vlastní zdroj

Ke zpracování výsledků bude nutné vytvořit skript, v němž budou zpracovávána data z *.mat* souboru. Nejdříve je nutné pomocí příkazu *close* zavřít všechny načtené skripty a *Workspace* prostředí, abychom zamezili případným chybám a zkreslení výsledků. Pomocí funkce *load* načítáme *.mat* soubory a s tím i data nutná k uložení do proměnných v MATLABu. Pro výpočet skutečné polohy přijímače využijeme střední hodnotu získanou funkcí *mean* z hodnot *AltMSL*, *Lat*, *Lon* (obr. 16). Pro výpočet polohy začneme indexem pole číslo 3 a končíme indexem číslo 41000, čímž zamezíme chybám vznikajícím na začátku měření. Tyto hodnoty nám určí přibližný medián polohy přijímače a budou užité k výpočtu chyb.

```
% receiver location based on average value
true_Alt=mean(AltMSL(3:41000))
true_Lat=mean(Lat(3:41000))
true_Lon=mean(Lon(3:41000))
```

obr. 16 – Výpočet polohy přijímače pomocí průměrné hodnoty – vlastní zdroj

Další část kódu tvoří podmínky pro přijímače jednotlivých standardů, jenž odfiltrují hodnoty s diferencí více než 100 metrů. Tyto chyby mohou vzniknout při opakovaném startu měření, proto s nimi nepracujeme. Pro zpracování odchylek z jednotlivých satelitů pracujeme s vektorem *res_xxx_range* a proměnnou *res_xxx_nnz* (*xxx* označuje GNSS standard, pro který je skript určený). Vektor *res_xxx_range* vypočteme jako součet absolutních hodnot odchylek každého satelitu pro indexy vektoru ve stejném rozsahu jako určenou polohu přijímače. Dále se nám bude hodit proměnná *res_xxx_nnz*, jež vrací celé číslo tvořené součtem nenulových indexů každé z odchylek (obr. 17). Tím jsou odfiltrovány přijímače, od nichž není v daný moment přijímaný signál.

```

% res_gps_nnz function return number of non zero elements
% res_gps_range return vectors with residual range error for each position
res_gps_nnz = abs(nnz(SVG1ResidualL1CA(3:41000)))+nnz(SVG2ResidualL1CA(3:41000));
res_gps_range=((abs(SVG1ResidualL1CA(3:41000))+abs(SVG2ResidualL1CA(3:41000)))+a

```

obr. 17 – Výpočet vektoru chybové vzdálenosti a nenulových hodnot jednotlivých satelitů – vlastní zdroj

Pokud skript využíváme pro kombinaci standardů, jsou využity součty těchto proměnných pro jednotlivé standardy a uložené do proměnných *res_comb_range* a *res_comb_nnz*.

Abychom mohli vykreslit grafy a vyčítat správné hodnoty pravděpodobností, je nutné vypočítat data pro zobrazení os jednotlivých grafů. Pro grafy, pracující s těmito vektory *AltMSL*, *Lat*, *Lon*, *SVXXResidualYYYY*, *X*, *Y*, *Z*, zvolíme statický rozsah pro osu *x* v rozsahu 0 – 30 metrů s krokem 1 cm, čímž zaručíme přibližně stejné křivky pro každý z GNSS systému (obr. 18).

```

%vectors for X axes
meters_coordinates = 0:0.01:30;
meters_altitude = 0:0.01:30;
meters_residual_range = 0:0.01:30;

```

obr. 18 – Určení osy *x* pro zobrazení grafů – vlastní zdroj

Pro určení pravděpodobností z důležitých dat v našem souboru je nutné zpracovat data na ose *y*. Vytvoříme proměnné *hist_error_3D* (vektor chyb v 3D prostoru), *hist_error_Alt* (vektor chyb naměřené nadmořské výšky) a *hist_res_range* (vektor odchylek jednotlivých satelitů). Pro odchylku ve 3D prostoru *hist_error_3D* využijeme vektorového součtu získaných dat, tedy odmocniny součtu druhých mocnin souřadnic *X*, *Y*, *Z* odečtených od středních hodnot těchto souřadnic. Pro výpočet chybového vektoru *hist_error_Alt* využijeme absolutní hodnoty (kvůli měření absolutní odchylky není relevantní, zda byl přijímač výše nebo níže než střední hodnota) odečtené od střední hodnoty nadmořské výšky. Pro výpočet celkové odchylky satelitů *hist_res_range* využijeme již vypočtené proměnné *res_xxx_range* (obr. 17). Každou z vypočtených hodnot uvedeme do histogramu pomocí funkce *hist* a za účelem získání pole hodnot, následně získaná data vydělíme celkovým součtem indexů v daném poli (obr. 19).

```
%counting vectors with error values for each type of data (coordinates, latitude, longitude, altitude)
hist_error_3D=hist(((X(3:41000)-mean(X(3:41000))).^2)+(Y(3:41000)-mean(Y(3:41000))).^2)+(Z(3:41000)-mean(Z(3:41000))).^2)
hist_error_Alt=hist(abs(AltMSL(3:41000)-mean(AltMSL(3:41000))), (meters_altitude))/length(AltMSL(3:41000));
hist_res_range=hist((res_gps_range-mean(res_gps_range)), (meters_residual_range))/length(res_gps_range);
```

obr. 19 – výpočet histogramů pro získání pravděpodobností z naměřených dat – vlastní zdroj

Pro výpočet odchylek zeměpisné šířky a délky je nutné vypočítat jednotlivé chyby. Ty uložíme do vektorů *error_Lat* a *error_Lon*. Výslednou chybovost *hist_error_2D* uložíme opět do histogramu jako vektorový součet těchto proměnných. Ten následně opět vydělíme celkovou velikostí vektoru (obr. 20).

```
error_Lat=(Lat(3:41000)-true_Lat)*111317.1;
error_Lon=(Lon(3:41000)-true_Lon)*71968.6;

hist_error_2D=hist((error_Lat.^2+error_Lon.^2).^0.5, (meters_coordinates))/length(Lat(3:41000));
```

obr. 20 – Výpočet odchylky zeměpisné šířky a výšky – vlastní zdroj

Pro získání souřadnic osy *y* pro grafy pravděpodobnosti je nutné nasčítat data a uložit do proměnných, fungujících jako vektor pro každý index z již získaných chybovostí. Pro tento účel využijeme jednoduchý *for* cyklus, pracující od indexu pole č.1, až po hodnotu maximálního indexu pole chybového vektoru. Hodnotu pro každou položku vektoru získáme jako sumarizovaný součet chybovostí od první uložené hodnoty postupně nasčítaný o další indexy (obr. 21).

```
for i=1:length(hist_error_2D)
    distr_error_3D(i)=sum(hist_error_3D(1:i));
    distr_error_2D(i)=sum(hist_error_2D(1:i));
end;

for i=1:length(hist_error_Alt)
    distr_error_Alt(i)=sum(hist_error_Alt(1:i));
end;

for i=1:length(hist_res_range)
    distr_res_range(i)=sum(hist_res_range(1:i));
end;
```

obr. 21 – Cykly pro vytvoření *y* souřadnice pravděpodobnosti odchylek – vlastní zdroj

Díky těmto výpočtům získáme data pro osy *x* a *y* a nyní už jednoduše výsledné grafy vykreslíme. K zobrazení dat využijeme společné okno *Probability* a čtyři jednotlivé grafy zobrazující na ose *y* pravděpodobnosti odchylek a odchylku v metrech na ose *x*. U každého z grafů je uveden titulek pro lepší orientaci v grafech. Obě osy mají nastavené limitní

hodnoty, přičemž pro osu y je nastavena limitně 1, neboť tuto hodnotu z principu pravděpodobnosti nikdy nepřekona. Osa x je limitována maximální odchylkou v metrech určenou staticky (obr. 22).

```
%graph of the probability
figure("Name","Probability")
subplot(2,2,1);
first = plot((meters_coordinates),distr_error_3D);
title("Probability of GPS distortion - coordinates X,Y,Z");
xlabel("meters_coordinates");
ylabel("Probability");
xlim([0 max(meters_coordinates)]);
ylim([0 1]);
```

obr. 22 – Kód pro zobrazení pravděpodobnosti souřadnic X, Y, Z – vlastní zdroj

4.2 Vyhodnocování přesnosti jednotlivých standardů

Důležitým bodem pro vyhodnocení přesnosti standardů GNSS a jejich kombinací (4.3) bylo nalezení výsledné hodnoty odchylky v určeném procentuálním bodě. Jako tuto hranici jsme zvolili 95% na zobrazené ose y , která odpovídá standardizovanému bodu pro interval spolehlivosti.

K tomuto účelu využijeme funkci grafů v MATLABu zvanou *DataTips* (Příloha 14), jež nám umožní zobrazit přibližnou hodnotu pro daný procentuální bod osy y . Pro tento interval budeme pracovat s odchylkami měření v zeměpisné šířce a délce (chyba ve 2D), chybou v souřadnicích X, Y, Z (chyba ve 3D), odchylkou v naměřené nadmořské výšce (výšková chyba) a s odchylkami měření satelitů (chyba v RRE).

Tabulka 1 – Odchylky měření standardů GNSS (v metrech)

GNSS	<i>Chyba ve 2D</i>	<i>Chyba ve 3D</i>	<i>Výšková chyba</i>	<i>Chyba v RRE</i>
GPS ¹	1.97	3.82	3.66	1.68
GLONASS	10.68	16.64	15.36	3.34
Galileo	1.71	3.19	2.9	2.01
Compass ²	3.17	7.13	6.66	2.48

¹ Při měření standardu GPS bylo kvůli špatnému nastavení programu nutné odstranit satelit G4

² Při měření standardu BeiDou bylo kvůli špatnému nastavení programu nutné odstranit satelity B1 – B5

Zpracované výsledky (*Tabulka 1*) ukazují jak očekávané, tak překvapivé výsledky. Velmi dobře si vedl standard GPS, jenž se v intervalu spolehlivosti vešel v zeměpisných souřadnicích do vzdálenosti 2 metrů od reálné pozice přijímače, stejně tak proběhlo měření v osách X, Y, Z při dané pravděpodobnosti s odchylkou do 3.9 metru. Rozdíl v nadmořské výšce se průměrně pohyboval okolo 3.7 metru od správného umístění přijímače a chybovost jednotlivých satelitů se pro 95 procentní bod zastavila na hodnotě okolo 1.7 metru.

V porovnání s GPS systémem si ještě lépe vedl evropský standard Galileo, což může být způsobeno správnou kalibrací družic, jejichž dráhy jsou přece jen uzpůsobeny pro nalezení pozice v Evropě. Galileo ukázal vyšší přesnost jak v zeměpisných souřadnicích délky a šířky, 3D prostoru i v nadmořské výšce. Jediná kategorie, ve které nastala mírně větší odchylka než u amerického standardu, byla v průměrných odchylkách jednotlivých satelitů, přičemž tato hodnota se zastavila na 2 metrech od přesné pozice přijímače.

Na opačném konci nalezneme čínský standard BeiDou / Compass. Ve 2D prostoru bylo možné dosáhnout odchylky 3.2 metru při daném intervalu spolehlivosti, avšak hodnoty odchylek ve 3D i pro nadmořskou výšku dosahovaly odchylek kolem 7 metrů. Pro 95% interval platí, že chybovost jednotlivých satelitů pracovala s průměrnou odchylkou 2.5 metru.

Každý z výše zmíněných standardů splnil svou garantovanou přesnost pro otevřené služby, čímž bylo naplněno předpokladů pro použitelnost v zařízeních pro určení polohy.

Ruský systém GLONASS disponoval v určování pozice největšími odchylkami. Překvapením bylo, že dokázal udržet garantovanou přesnost pro civilní režim pouze v případě odchylek satelitů (3.3 metru). Ve 2D prostoru se odchylka pohybovala okolo 10.7 metru, 3D pozicování pracovalo s průměrnou chybou 16.7 metru a nadmořská výška se v průměru lišila o 15.4 metru. Při kontrole skriptů či naměřených dat nebyl zjištěn žádný problém ve zpracování, neboť data byla zpracovávána obdobně jako u jiných standardů.

Při porovnání histogramů využití satelitů lze konstatovat, že systémy GLONASS (*Příloha 3*), Galileo (*Příloha 2*) i Compass (*Příloha 1*) využívali k určení pozice v nejvíce případech vzorkování 9 až 10 družic. U evropského a ruského standardu bylo využito toto množství téměř v polovině získaných pozic měření a u čínského systému byl tento počet nalezen u 33 % výsledků. Systém GPS (*Příloha 4*) využíval ve svých vzorcích nejvíce 10 až 11 satelitních zařízení a to u 27 % výsledků.

Z výsledků měření lze vyhodnotit velmi dobré operační vlastnosti systémů Galileo a GPS, a to ve všech kategoriích určování přesné pozice. Systém BeiDou i přes vyšší odchylky od reálné polohy pracoval též v mezích garantovaných civilními službami, avšak při

získávání pozice systémem GLONASS nebylo těchto garancí při našem intervalu spolehlivosti dosaženo. Výsledné grafy spolehlivosti je možné vidět a porovnat v příloze (*Příloha 15*)

4.3 Vyhodnocování přesností kombinací standardů

Získání výsledků kombinací systémů GNSS probíhá obdobně jako vyhodnocování jednotlivých standardů (4.2). Pomocí funkce *DataTips* v MATLABu nalezneme hodnotu odchylek osy x v intervalu spolehlivosti zvoleném na ose y jako 95 % pravděpodobnost.

Pokud budeme výsledkově vycházet z kapitoly výše, určitě bychom předpokládali, že pro kombinace GNSS systémů, obsahující buď standard GPS nebo Galileo, bude nalezená pozice upřesňována (menší odchylka) a při použití kombinací se systémem GLONASS bude nalezená pozice pracovat s větší odchylkou. Pro naše kombinace jsme zvolili následující standardy:

- kombinace nejpřesnějších systémů z individuálního měření standardů
- kombinace amerického systému s ruským
- kombinace nejpřesnějšího systému s nevyhovujícím
- kombinace amerického systému s čínským
- kombinace čínského systému s evropským

Tabulka 2 – Odchyly kombinací standardů GNSS (v metrech)

GNSS	<i>Chyba ve 2D</i>	<i>Chyba ve 3D</i>	<i>Výšková chyba</i>	<i>Chyba v RRE</i>
GPS a Galileo	1.74	3.54	3.35	3.25
GPS ³ a GLONASS	3.17	6.32	5.92	3.29
Galileo a GLONASS	5.24	8.94	7.7	3.66
Compass ⁴ a GPS ³	1.78	3.67	3.47	1.98
Compass ⁴ a Galileo	2.02	4.78	4.56	3.61

Dle zjištěných výsledků (*Tabulka 2*) lze vyvodit následující závěr. Dle předpokladů pracuje kombinace systému Galileo s americkým GPS velmi kvalitně. Chybovost v zeměpisných souřadnicích se zastavila na průměrné hodnotě kolem 1.7 metru, přičemž

³ Při měření standardu GPS bylo kvůli špatnému nastavení přijímače nutné odstranit satelit G4

⁴ Při měření standardu BeiDou bylo kvůli špatnému nastavení přijímače nutné odstranit satelity B1 – B5

prostorová chyba se v průměru zastavila na hranici 3.5 metru. Odchylka naměřené nadmořské výšky dosahovala podobných hodnot, konkrétně 3.3 metru a stejně tak tomu bylo u odhadu pozice jednotlivých družic.

Kombinace GPS se systémem GLONASS ukazuje odchylku 2D prostoru v rozsahu 3.2 metru. Odchylka v souřadnicích 3D prostoru již narostla na 6.3 metru, přičemž v podobném rozsahu se pohybuje taktéž chybovost nadmořské výšky. Odchylky satelitů se zastavily na podobné hodnotě jako chyba u předchozí sestavy.

Sestava evropského a ruského standardu se od přesné pozice překvapivě odchylovala nejvíce, a to i přes kvalitu systému Galileo, jakožto samotného standardu. Ve 2D prostoru se chybovost zastavila na 5.2 metru, avšak ještě hůře dopadlo vyhodnocení souřadnice X, Y, Z, neboť zde se odchylka blížila 9 metrům. Nadmořská výška se oproti reálné pozici lišila o 7.7 metru a družice míjely přesné umístění přijímače v průměru o 3.7 metru.

Kombinace amerického GPS s čínským Compassem dopadla velmi dobře, neboť výsledné určení polohy byl v některých případech až o 75% přesnější než u jiných kombinací. Odchylka zeměpisné délky a šířky činila pouze 1.8 metru, chybovost ve 3D prostoru se v průměru zastavila na 3.7 metru a do 3.5 metru průměrné vzdálenosti od cíle se vešlo i určování nadmořské výšky. Chybovost jednotlivých satelitů mířila těsně pod hranici 2 metrů.

Podobně přesně si v kombinaci s čínským protějškem vedl i evropský Galileo. Chybovost ve 3D prostoru a nadmořské výšce se pohybovala okolo 4.6 – 4.8 metru a odchylky 2D prostoru a nepřesnosti satelitů byly naměřeny v okolí 2, respektive 3.6 metru.

Při pohledu do histogramů těchto sestav lze vyzorovat, že sestavy využívající GPS v kombinaci ať už s čínským (*Příloha 6*), či ruským systémem, využívaly v 35%, respektive 39% počet 21 satelitů pro každou naměřenou hodnotu. Sestava Compassu s evropským Galileem (*Příloha 5*) využívala téměř ve čtvrtině naměřených pozic 19 družic. Ruský GLONASS v kombinaci se standardem Galileo (*Příloha 7*) měřil pozici přijímače v třetině případů s počtem 18 družic. Při hledání polohy pomocí GPS spolu s Galileo, bylo u více než 43% případů využito 20 družic (*Příloha 8*). Výsledné grafy pravděpodobnosti je možné opět najít v příloze (*Příloha 16*).

4.4 Ověření výsledků dle předpokladů

Určování polohy multilaterační metodou, jenž využívá námi používaný přijímač U-Blox M8, bylo provedeno dle zadání pomocí jednotlivých GNSS standardů, ale také jejich

kombinacemi. V odborných pracích i tzv. *performance report* dokumentech lze povětšinou nalézt pouze výsledky zabývající se chybou RRE.

Při porovnání systému GPS s oficiálními daty provedenými Texaskou univerzitou v Austinu lze vyčíst, že splnění požadavku 95% intervalu spolehlivosti proběhlo při měření chybovosti RRE s průměrnou hodnotou 1.17 metru.

Při pohledu do našich výsledků naměřených převážně v zimních měsících lze konstatovat, že odchylka 1.67 metru se nepatrně liší od zimních měsíců ve výzkumné práci [10], avšak nicméně plně vyhovuje standardnímu 7 metrovému standardu odchylky. U ostatních naměřených odchylek lze konstatovat, že obecná chybovost ve 3D prostoru 2 - 3.7 metru je pro systém pracující v civilním L1 pásmu dostatečný.

Pro systém Galileo byl zvolen výsledkový dokument od EU, porovnávající výsledky za poslední čtvrtletí roku 2021 v pásmu E1/E5. Z tohoto dokumentu lze vyčíst všechny i námi naměřené hodnoty. Při pohledu do výsledků lze říci, že požadavek byl kladen pro 95% interval do chybovosti RRE 2 metry. V tomto intervalu byly naměřené výsledky s průměrnou odchylkou 0.71 metru, což je 3x přesnější, než co se podařilo při měření v této práci. Pro horizontální a vertikální odchylky platilo v oficiálním výsledkovém měření rozmezí 1.93 – 2.74 metru, přičemž námi naměřené hodnoty se pohybovali od 2 – 3.2 metru. Všechny naše naměřené hodnoty však plně odpovídaly službě OS, u níž je nutné dodržet 7.5 metru [11].

Ruský standard GLONASS bohužel výsledkové hodnoty nenabízí, avšak standardem pro 95% spolehlivost bývá u tohoto standardu 6.5 – 10 metrů pro SP službu. Z námi naměřených hodnot však tuto hranici pokořila pouze RRE chyba s hodnotou 3.3 metru, nicméně chyby ve 3D prostoru se pohybovali v rozmezí 10 – 17 metrů, a proto byl považován za nevyhovující.

Podobně jako GLONASS výsledky standardu Compass za dané časové období není možné získat oficiálně. K dobrému přehledu nám poslouží výzkumný dokument z německého výzkumného centra Springer-Verlag GmbH, v němž jsou poskytnuté informace o chybovosti RRE, jejichž hodnoty se pohybovali v rozmezí 0.55 metru. Námi naměřené hodnoty této odchylky lze i přes téměř pětinasobný nárůst považovat za vyhovující. Tuto domněnku potvrzují i chyby ve 3D prostoru zabírající rozmezí 2.6 – 7 metrů. Upřesňující informace lze nalézt výše (4.2).

Měření kombinací standardů bylo provedeno za zjištěním, zda a jak je ovlivňována přesnost přístrojů využívající pro nalezení polohy více systémů (dnes zpravidla mobilní telefony, GPS navigace, radary). Z naměřených výsledků lze usoudit, že kombinace

nejpřesnějších standardů z měření jednotlivých systémů (GPS a Galileo) má, i přes mírně vyšší chybovost RRE 3.3 metru, odchylku ve 3D prostoru v hodnotách 1.7 – 3.3 metru.

Podobně přesný systém lze nalézt i v kombinaci amerického GPS s Compassem. Chybovost ve 3D prostoru se opět pohybuje v hodnotách 1.7 – 3.7 metru, avšak chyba RRE klesla na hodnotu odchylky okolo necelých 2 metrů. Mírně vyšší odchylku vidíme při kombinaci čínského standardu s evropským, kdy prostorové chyby nabývají hodnot 2 - 4.8 metru. Chybovost RRE je srovnatelná s kombinací GPS a právě Galileo.

I přesto, že jsme z důvodu nepřesnosti systému GLONASS pro naše účely složili kombinaci s oběma nejpreciznějšími standardy, zařadily se tyto sestavy opět na poslední příčky v žebříčku určení přesnosti polohy, s chybovostí 3.1 – 8.9 metru. Odchylka RRE se zastavila v rozmezí 3.1 – 3.5 metru. Výsledné hodnoty lze nalézt v předchozí kapitole (4.3).

Pokud budeme porovnávat námi naměřená data s informacemi z datového listu, pak zjistíme, že odchylky zeměpisné šířky a délky pro standardy GPS a Galileo opravdu odpovídají hodnotám, které lze v dokumentu najít. Čínský Compass nedokázal hodnotu z listu pokořit o necelých 20 cm, avšak nejhůře dopadl ruský GLONASS, neboť námi naměřená hodnota se lišila téměř o více než 6.6 metru oproti hodnotě garantované datasheetem.

Závěr

Tato závěrečná práce poskytla čtenáři informace o vývoji historie určování polohy a ukázala principy jejího výpočtu s pomocí moderních systémů, přičemž mezi nejdůležitější z nich se řadí multilaterce. V teoretické části je dále možné získat základní znalosti komplexní struktury systémů spadajících pod GNSS včetně obecných poznatků o jednotlivých segmentech a také přiblížení principů vysílaných radiových signálů (kódů). V textu je možné dále najít popis měřicí stanice s přijímačem U-Blox M8N z hlediska hardwaru, detailní popis využitého softwaru pro měření a exportování výsledků U-Center a postup vytvoření skriptů pro zpracování dat vytvořených v softwaru MATLAB.

Z výsledného zpracování dat, získaných informacích o jednotlivých standardech GNSS a dalších nabytých poznatků lze usoudit, že pro přesné určení polohy pomocí pseudonáhodných posloupností multilateračním principem je vhodné využít přístroje vhodně podporující nalezení polohy pouze jedním ze standardů, nikoliv jejich kombinací.

Z těchto systémů se jako nejvhodnější jeví evropský standard Galileo nebo americký GPS, jenž splňují garantované normy s velkou rezervou. Lze konstatovat, že i přes relativně krátkou dobu, jež uplynula od spuštění evropského standardu, je systém velmi přesný a v některých parametrech překonává i právě americký standard. Do mezí spolehlivosti se svými odchylkami vešel i čínský Compass (BeiDou), avšak jeho hlavní síla spočívá v kombinaci s přesným evropským a americkým standardem. Na opačném konci se co do určení přesnosti polohy nachází ruský GLONASS. I přes různé zkoumání naměřených hodnot se nepodařilo přijít na to, co je příčinou daných chyb, způsobujících dané odchylky.

Východiskem je nevyhovující ruský standard, avšak i u tohoto systému opět platí, že v kombinaci s přesnými standardy bylo následně možné odchylku nalezené polohy vylepšit. Z těchto poznatků a při pohledu do grafických příloh lze usoudit, že primárním cílem práce různých kombinací GNSS systémů je snižovat odchylky nalezených pozic nepřesnými systémy a posunout je do garantovaných hodnot v intervalu spolehlivosti.

Literatura

- [1] *Hyperbolic Radionavigation Systems* [online]. Ontario: Sympatico, 2001 [cit. 2022-03-01]. Dostupné z: <http://www.jproc.ca/hyperbolic/>
- [2] ABEL, J. S. a J. W. CHAFFEE. Existence and uniqueness of GPS solutions. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1991, **1991**(27), 952-956. ISSN 1557-9603. Dostupné z: doi:10.1109/7.104271
- [3] GUSTAFSSON, F. a F. GUNNARSSON. Mobile positioning using wireless networks: possibilities and fundamental limitations based on available wireless network measurements. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2005, **2005**(22), 41-53. ISSN 1558-0792. Dostupné z: doi:10.1109/MSP.2005.1458284
- [4] China's GPS rival BeiDou is now fully operational after final satellite launched. *CNN Business* [online]. Hong Kong: Warner Media Company, 2020, 24. 06. 2020 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://edition.cnn.com/2020/06/24/tech/china-BeiDou-satellite-gps-intl-hnk/index.html>
- [5] CNSS (Compass/BeiDou Navigation Satellite System) / BDS (BeiDou Navigation System). *EoPortal - Earth Observation Directory & News* [online]. Paris: ESA, 2020 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/cnss>
- [6] BEZPALEC, Pavel. *Lokalizace a navigace: Nové trendy v elektronických komunikacích* [online]. Praha, 2019 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/231/Cover.html>. Studijní materiály. České vysoké učení technické v Praze.
- [7] Satellite navigation. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 26. 02. 2022 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_navigation#Global_navigation_satellite_systems
- [8] KUČERA, Tomáš. *Algoritmy výpočtu polohy, rychlosti a času z GNSS signálu* [online]. Brno, 2013 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65122. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Lenka Tejmlová.
- [9] Global Positioning System. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 11. 03. 2022 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System

- [10] A. RENFRO, Brent, Miquela STEIN, Emery B. REED a Eduardo J. VILLALBA. *An Analysis of Global Positioning System Standard Positioning Service Performance for 2020* [online]. Austin, 2021 [cit. 2022-05-05]. Applied Laboratory Research. The University of Texas at Austin. Vedoucí práce NAVSEA USA. Dostupné z: <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/2020-GPS-SPS-performance-analysis.pdf>
- [11] European Union. Open Service Performance Report October - December 2021. *Www.gsc-europa.eu* [online]. Brusel, 2022 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-Quarterly-Performance_Report-Q4-2021.pdf
- [12] XUE, Bing, Yunbin YUAN a Haitao WANG. *Performance of BeiDou-3 signal-in-space ranging errors: accuracy and distribution* [online]. Berlin, 2021 [cit. 2022-05-05]. Research. Springer-Verlag GmbH Germany. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/348161504_Performance_of_BeiDou-3_signal-in-space_ranging_errors_accuracy_and_distribution.
- [13] GMV. Galileo Ground Segment. In: *Navipedia* [online]. Navipedia ESA, 2011 [cit. 2022-05-06].
Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Ground_Segment
- [14] U-blox Technologies. [online katalogový list]. *NEO-M8*. ©2021 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://content.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8-FW3_DataSheet_UBX-15031086.pdf

Seznam obrázků a tabulek

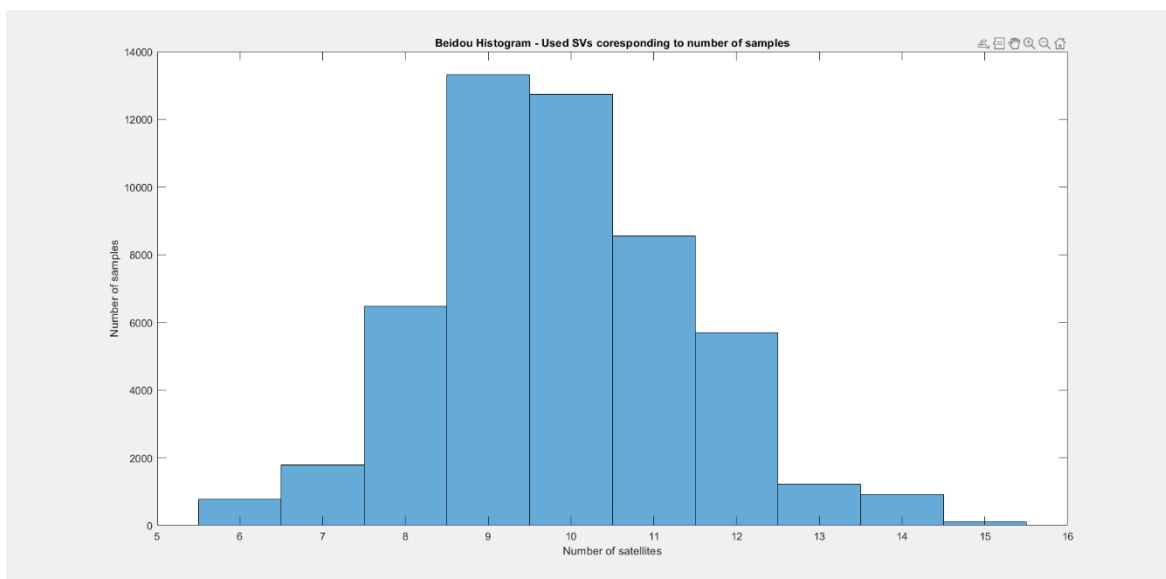
Seznam obrázků

<i>obr. 1 – Triangulační trojúhelník – vlastní zdroj.....</i>	<i>- 4 -</i>
<i>obr. 2 - Trilaterační koule a hledaný bod se souřadnicemi x, y, z – vlastní zdroj.....</i>	<i>- 6 -</i>
<i>obr. 3 – Řídící segment systému GPS – převzato ze zdroje [6]</i>	<i>- 19 -</i>
<i>obr. 4 – Řídící segment systému Galileo (2018) – převzato ze zdroje [13].....</i>	<i>- 22 -</i>
<i>obr. 5 – Řídící segment systému GLONASS – převzato ze zdroje [6]</i>	<i>- 24 -</i>
<i>obr. 6 – zapojení měřicí stanice pro získávání polohy – vlastní zdroj.....</i>	<i>- 28 -</i>
<i>obr. 7 – Blokové schéma U-Blox M8N přijímače</i>	<i>- 29 -</i>
<i>obr. 8 – Prostředí programu U-Center – vlastní zdroj.....</i>	<i>- 31 -</i>
<i>obr. 9 – Podokno Deviation Map programu U-Center – vlastní zdroj.....</i>	<i>- 32 -</i>
<i>obr. 10 – Podokno Map programu U-Center – vlastní zdroj</i>	<i>- 32 -</i>
<i>obr. 11 – Podokna Satellite List a Receiver information programu U-Center – vlastní zdroj</i>	<i>- 34 -</i>
<i>obr. 12 – Konfigurace jednotlivých standardů GNSS – vlastní zdroj.....</i>	<i>- 35 -</i>
<i>obr. 13 – Podokno Table programu U-Center – vlastní zdroj.....</i>	<i>- 37 -</i>
<i>obr. 14 – Importování dat z exportovaného souboru do MATLABu – vlastní zdroj..</i>	<i>- 39 -</i>
<i>obr. 15 – uložené vektorové soubory s daty naměřených hodnot – vlastní zdroj</i>	<i>- 40 -</i>
<i>obr. 16 – Výpočet polohy přijímače pomocí průměrné hodnoty – vlastní zdroj.....</i>	<i>- 40 -</i>
<i>obr. 17 – Výpočet vektoru chybové vzdálenosti a nenulových hodnot jednotlivých satelitů – vlastní zdroj</i>	<i>- 41 -</i>
<i>obr. 18 – Určení osy x pro zobrazení grafů – vlastní zdroj</i>	<i>- 41 -</i>
<i>obr. 19 – výpočet histogramů pro získání pravděpodobností z naměřených dat – vlastní zdroj</i>	<i>- 42 -</i>
<i>obr. 20 – Výpočet odchylky zeměpisné šířky a výšky – vlastní zdroj</i>	<i>- 42 -</i>
<i>obr. 21 – Cykly pro vytvoření y souřadnice pravděpodobnosti odchylek.....</i>	<i>- 42 -</i>
<i>obr. 22 – Kód pro zobrazení pravděpodobnosti souřadnic X, Y, Z – vlastní zdroj ...</i>	<i>- 43 -</i>

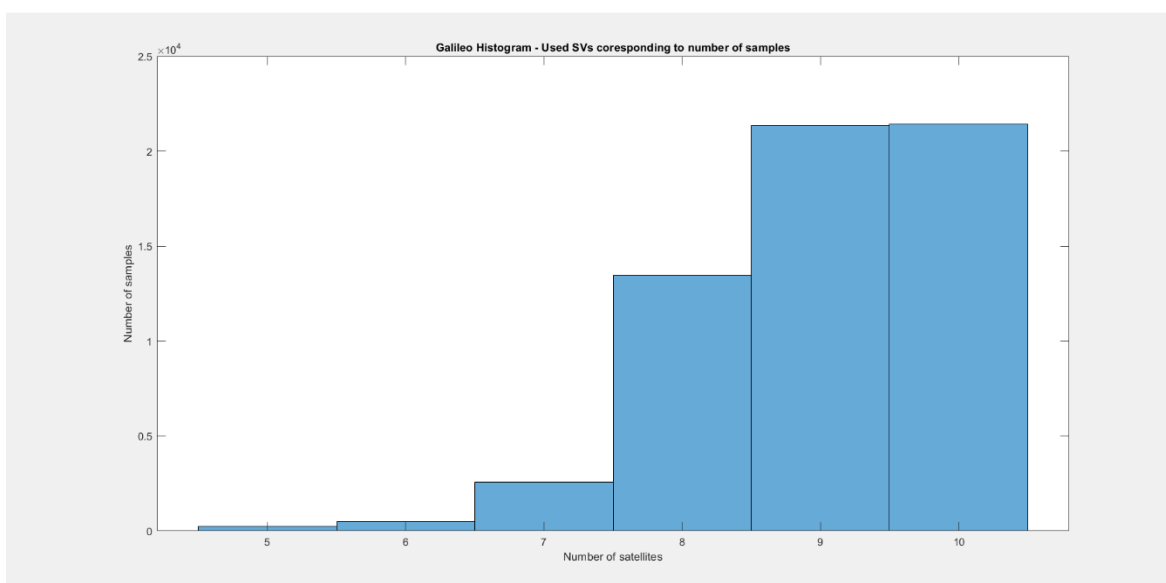
Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 – Odchylky měření standardů GNSS (v metrech).....</i>	<i>- 43 -</i>
<i>Tabulka 2 – Odchylky kombinací standardů GNSS (v metrech)</i>	<i>- 45 -</i>

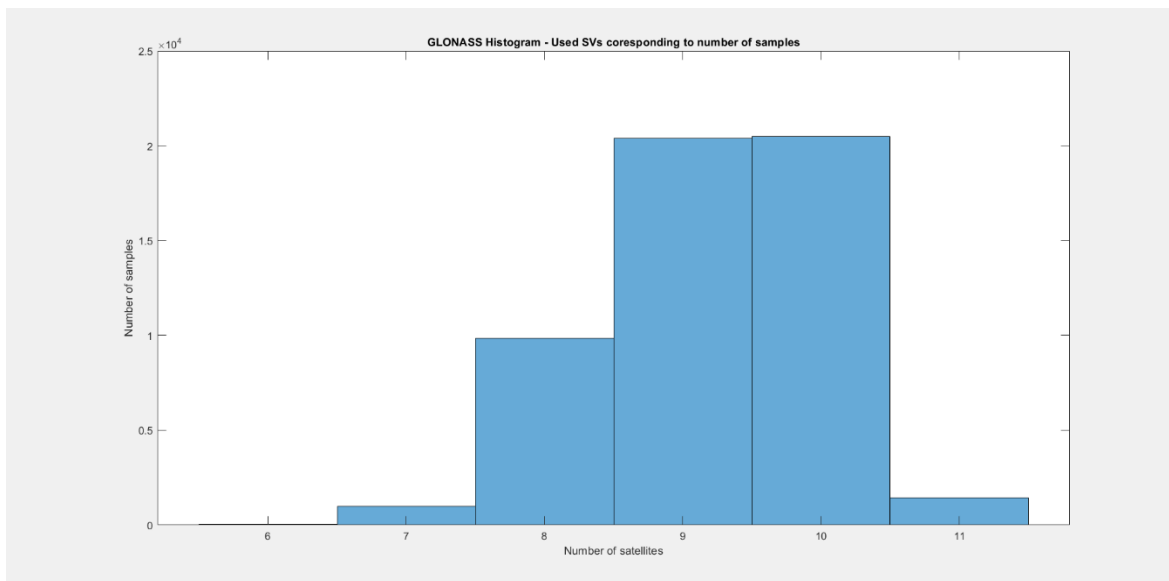
Přílohy



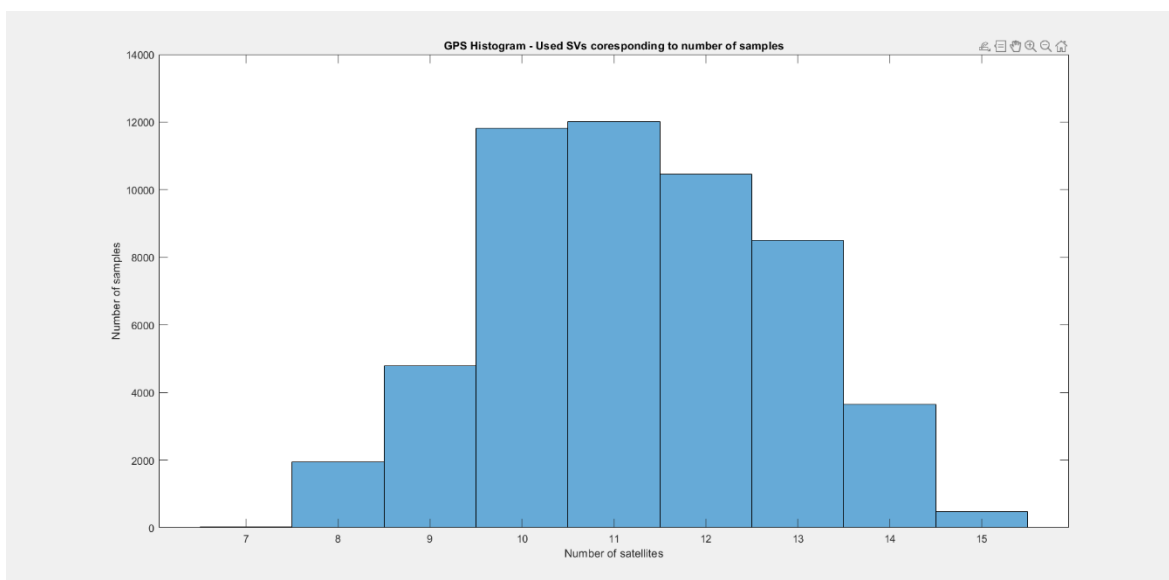
Příloha 1 – Histogram využití satelitů pro standard Compass



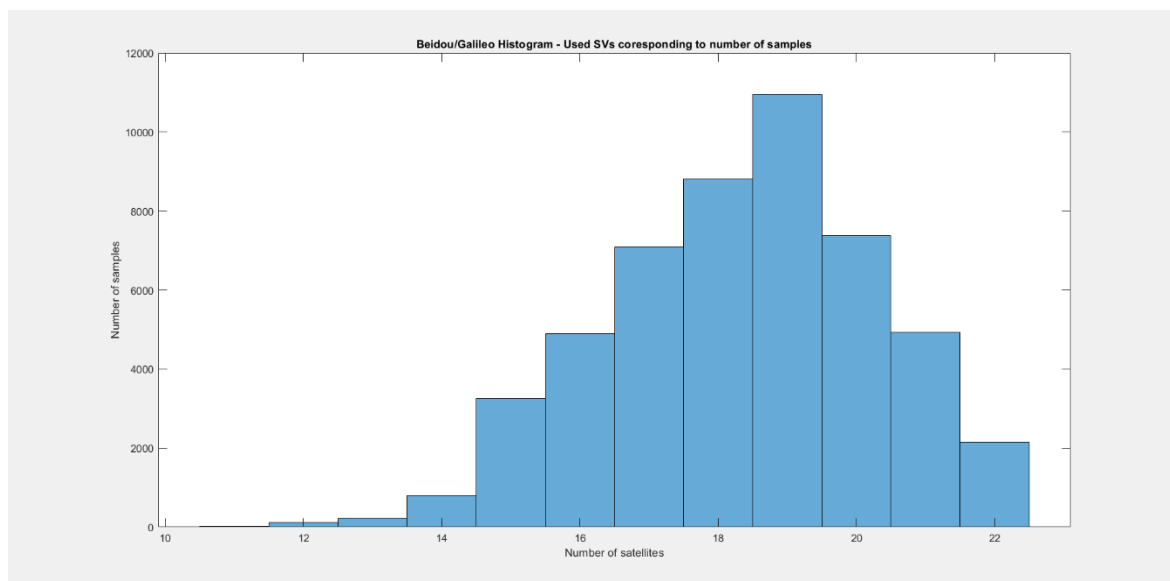
Příloha 2 – Histogram využití satelitů pro standard Galileo



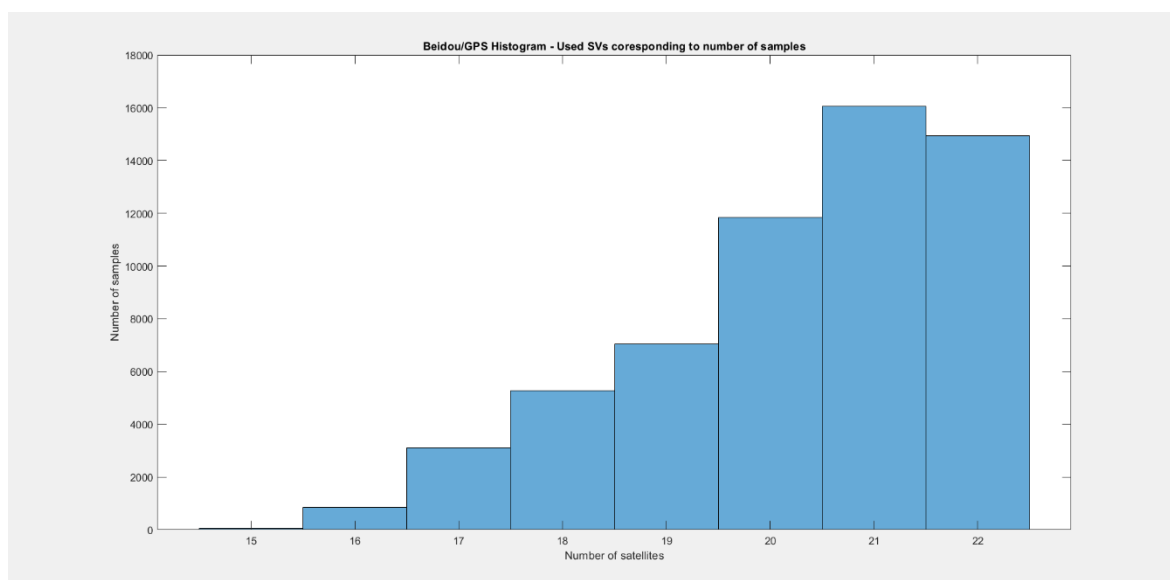
Příloha 3 - Histogram využití satelitů pro standard GLONASS



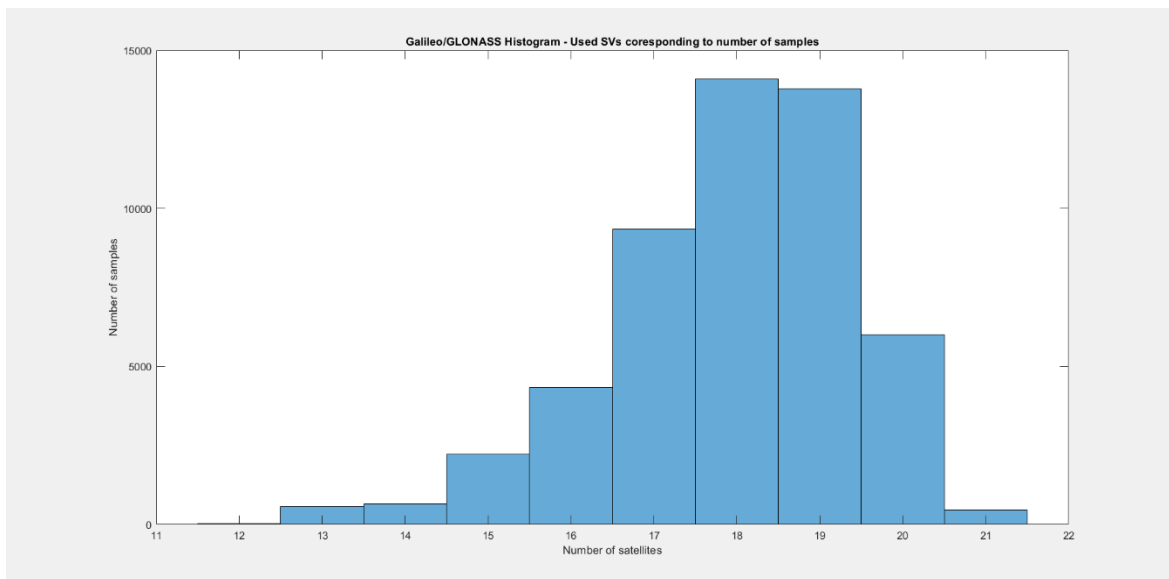
Příloha 4 - Histogram využití satelitů pro standard GPS



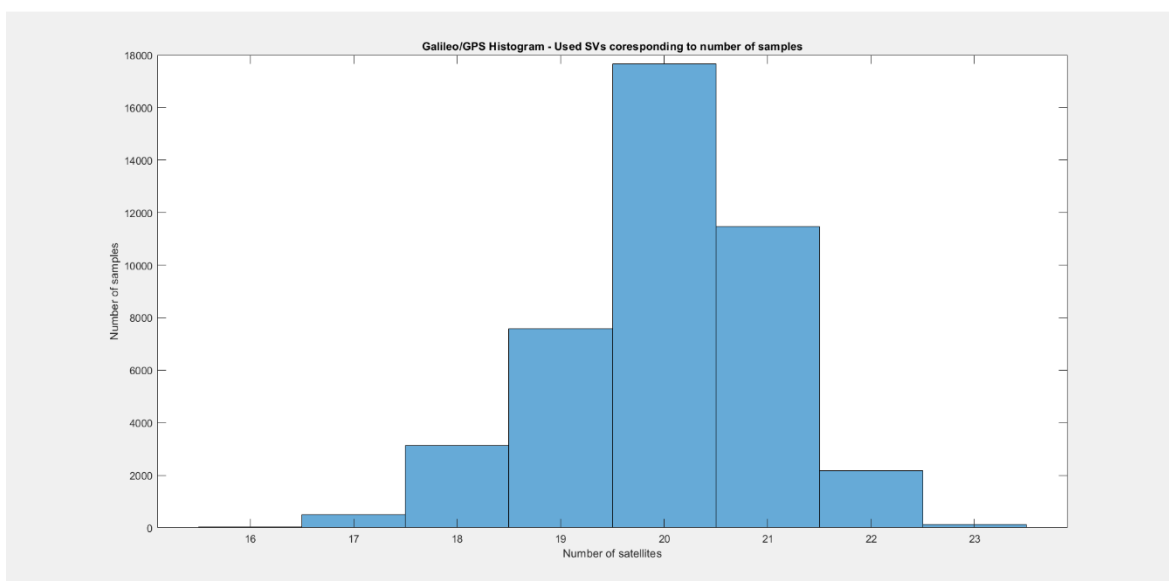
Příloha 5 - Histogram využití satelitů pro kombinaci Compass / Galileo



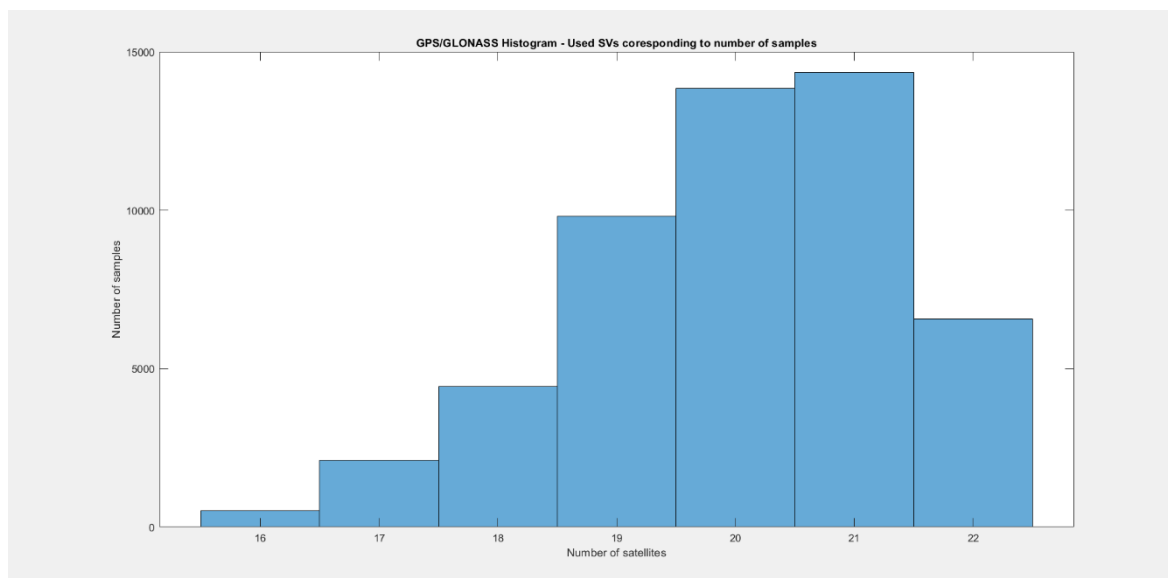
Příloha 6 - Histogram využití satelitů pro kombinaci Compass / GPS



Příloha 7 - Histogram využití satelitů pro kombinaci Galileo / GLONASS



Příloha 8 - Histogram využití satelitů pro kombinaci Galileo / GPS

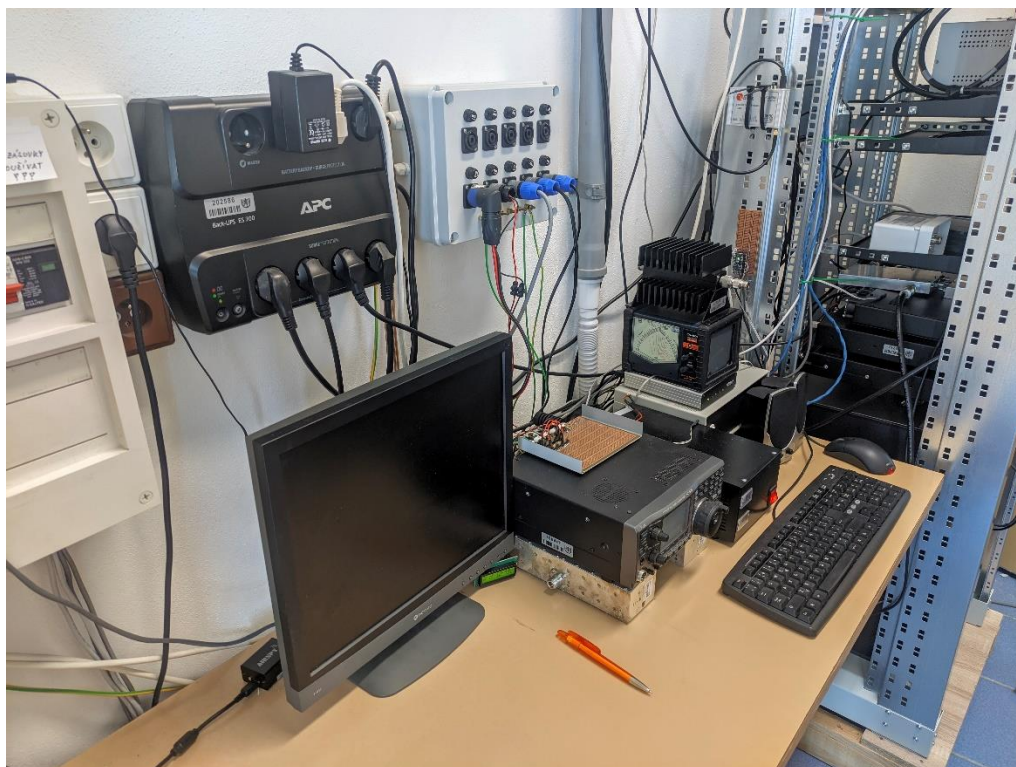


Příloha 9 - Histogram využití satelitů pro kombinaci GPS / GLONASS

Parameter	Symbol	Condition	Min	Max	Units
Power supply voltage	VCC		-0.5	3.6	V
Backup battery voltage	V_BCKP		-0.5	3.6	V
USB supply voltage	VDD_USB		-0.5	3.6	V
Input pin voltage	V _{IN}	If VCC < 3.1V	-0.5	VCC+0.5	V
		If VCC > 3.1V	-0.5	3.6	V
	V _{IN_USB}		-0.5	VDD_USB	V
DC current through any digital I/O pin (except supplies)	I _{IN}			10	mA
VCC_RF output current	ICC_RF			100	mA
Input power at RF_IN	P _{RFIN}	source impedance = 50 Ω, continuous wave		15	dBm
Storage temperature	T _{STG}	NEO-MBN/MBQ/MSJ	-40	85	°C
		NEO-M8M	-40	105	

Parameter	Specification					
Receiver type	72-channel u-blox M8 engine GPS L1C/A, SBAS L1C/A, QZSS L1C/A, QZSS L1 SAIF, GLONASS L1OF, BeiDou B1I, Galileo E1B/C					
Accuracy of time pulse signal	RMS	30 ns				
	99%	60 ns				
Frequency of time pulse signal	0.25 Hz...10 MHz (configurable)					
Operational limits ¹	Dynamics	≤ 4 g				
	Altitude	50,000 m				
	Velocity	500 m/s				
Velocity accuracy ²	0.05 m/s					
Heading accuracy ²	0.3 degrees					
GNSS	GPS & GLONASS GPS GLONASS BeiDou Galileo					
Horizontal position accuracy ³		2.5 m	2.5 m	4 m	3 m	3 m
	With SBAS	2.0 m	2.0 m	-	-	-
NEO-MBN/Q						
Max navigation update rate	NEO-MBN	5 Hz	10 Hz	10 Hz	10 Hz	10 Hz
	NEO-MBQ	10 Hz	18 Hz	18 Hz	18 Hz	18 Hz
Time-To-First-Fix ⁴	Cold start	26 s	29 s	30 s	34 s	45 s
	Hot start	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s
	Aided starts ⁵	2 s	2 s	2 s	3 s	7 s

Příloha 10 – Datasheet k přijímači U-Blox M8N



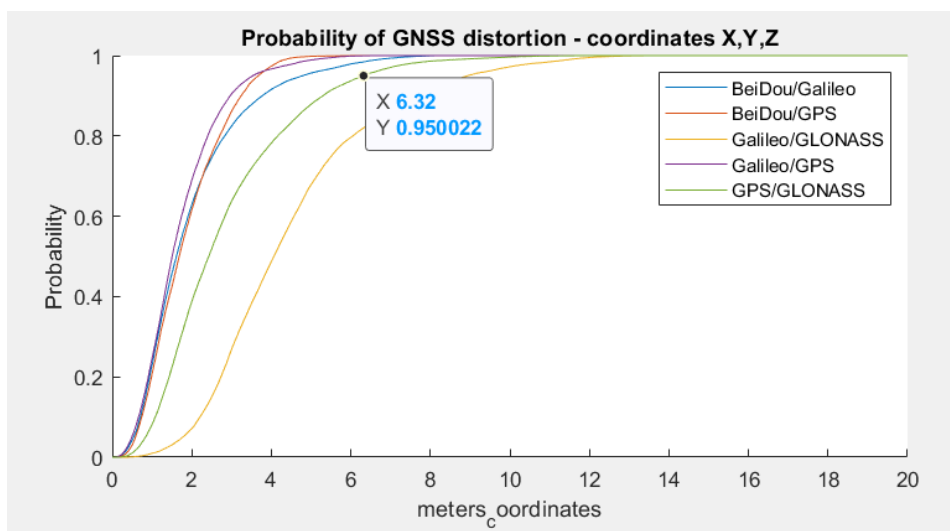
Příloha 11 – Měřicí stanice na FEL ZČU



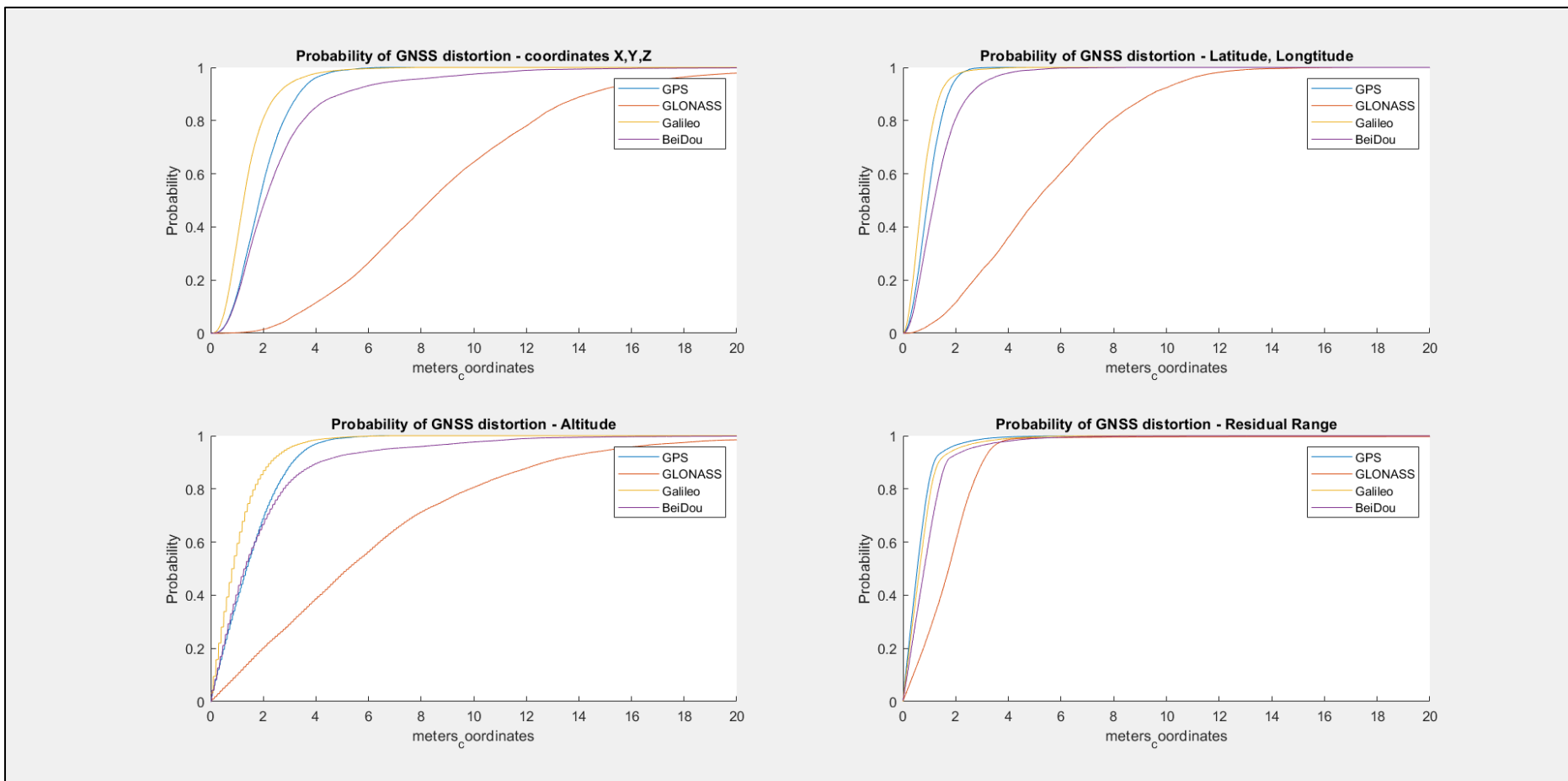
Příloha 12 – Přijímač U-Blox M8N



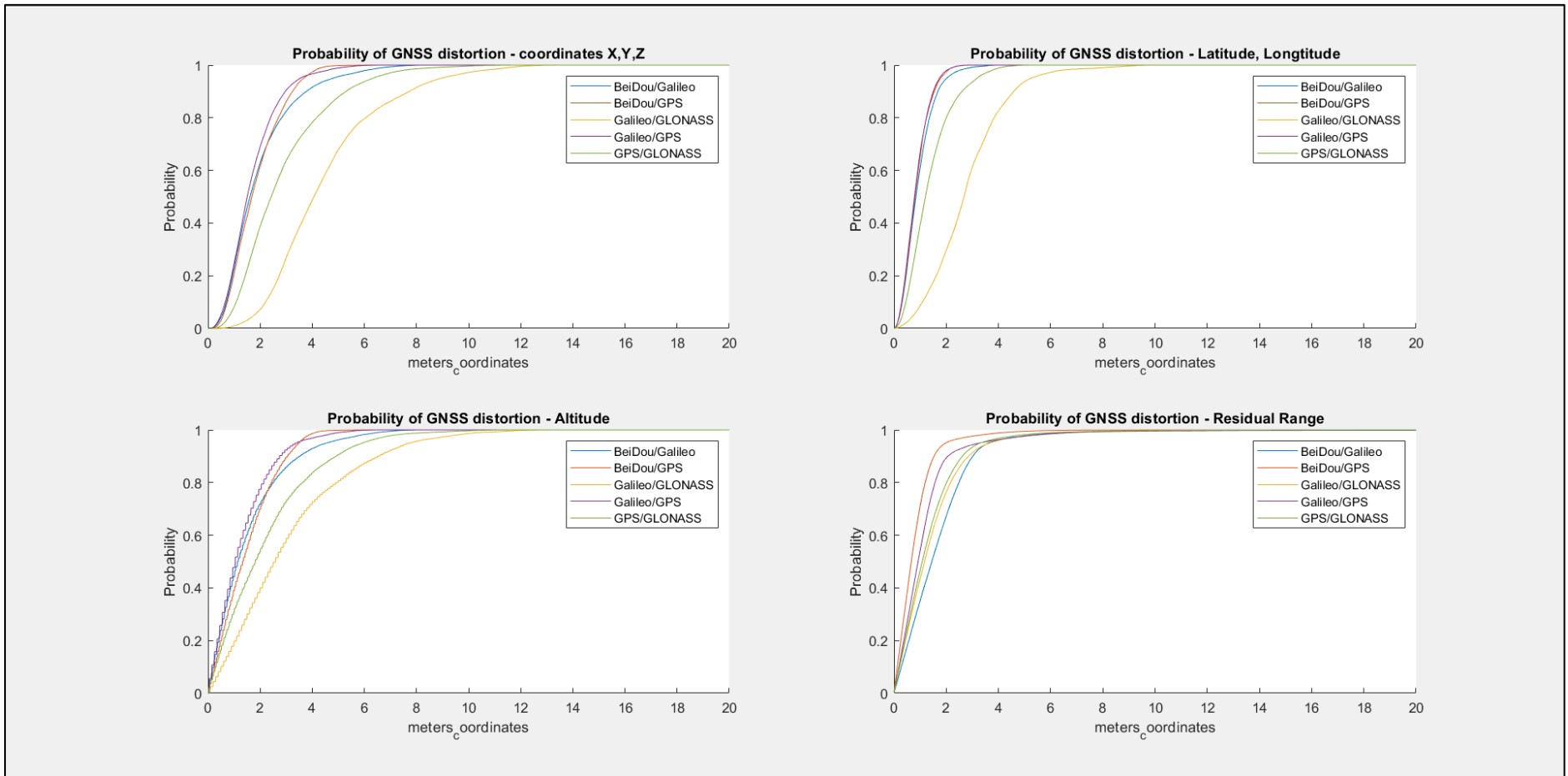
Příloha 13 – Multiband anténa připojená k U-Blox přijímači



Příloha 14 – Funkce DataTip pro zobrazení průměrné odchylky v 95% intervalu spolehlivosti



Příloha 15 – Chyby určování polohy jednotlivých GNSS systémů



Příloha 16 – Chyby určování polohy kombinací GNSS systémů

<https://drive.google.com/drive/folders/1PFzUD3vJGGctiJzF5XGUdbnQb5BbH6H3?usp=sharing>

Příloha 17 – Složka se skripty pro zpracování výsledků měření bakalářské práce (přístup umožněn přes účet @gapps.zcu.cz)