

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická



Bakalářská práce

**Přesná lokalizace malých bezpilotních prostředků
s využitím GNSS**

Zuzana Tůmová

Vedoucí práce: Ing. Milan Rollo, Ph.D.

Studijní program: Kybernetika a robotika

Obor: Systémy a řízení

Květen 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

(Podpis autora práce)

Poděkování

Ráda bych poděkovala Ing. Milanovi Rollovi, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce a Ing. Michalovi Zajačikovi za pomoc při testování.

Mé poděkování patří i Českému úřadu zeměměřickému a katastrálnímu, který mi poskytl své služby pro potřeby této práce a Katedře radioelektroniky, ČVUT, za poskytnutí dat z referenční stanice v Dejvicích.

Velké poděkování náleží samozřejmě i mé rodině za podporu během celého studia.

Abstrakt

Tato práce se zabývá metodami lokalizace bezpilotních prostředků s využitím GNSS přijímačů. Zaměřuje se na jejich charakteristiku včetně výhod a nevýhod spojených s jejich použitím. Hlavní část práce tvoří experimentální testování vybraných GNSS přijímačů s ohledem na poskytovanou přesnost lokalizace. Byly ověřeny různé metody sloužící ke zvýšení přesnosti lokalizace, jako např. diferenční měření a post-processing. Byl porovnán rozdíl v přesnosti lokalizace u kódových a fázových měření a u jedno-frekvenčních a více-frekvenčních měření. Výsledky byly ověřeny i na reálném bezpilotním prostředku.

Abstract

Title: Precise GNSS localization of small UAV

This thesis deals with methods of localization of small UAV using GNSS receivers. It focuses on their characteristics including advantages and disadvantages associated with their use. The main part consists of experimental testing of selected GNSS receivers with regard to provided accuracy of localization. Various methods used to increase the precision of localization were verified, such as e.g. differential measurement and post-processing. The differences in positioning accuracy for code and phase measurements and for single-frequency and multi-frequency measurements were compared. The results were verified on real UAV.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Zuzana Tůmová**

Studijní program: Kybernetika a robotika
Obor: Systémy a řízení

Název tématu: **Přesná lokalizace malých bezpilotních prostředků s využitím GNSS**

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte problematiku absolutního určování polohy.
2. Identifikujte existující technologie GNSS a porovnejte z hlediska jejich přesnosti, dostupnosti a vhodnosti pro nasazení na malé bezpilotní prostředky.
3. Blíže se seznamte s technologií RTK GPS, zjistěte možnosti a dostupnost permanentních referenčních stanic na území ČR.
4. Navrhněte metodu pro zjištění přesnosti GNSS modulů.
5. Proveďte měření polohy pomocí modulů Swiftnav Piksi a NovAtel OEM628 a porovnejte jejich přesnost a rychlost.

Seznam odborné literatury:

- [1] Truhlář L.: Vývoj NTRIP Casteru. Diplomová práce, ČVUT v Praze, 2012
- [2] Eling C. at al: A precise direct georeferencing system for UAVs. Proceedings of the Workshop on UAV-basaed Remote Sensing Methods for Monitoring Vegetation, 2014

Vedoucí: Ing. Milan Rollo, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 11. 2. 2016

Obsah

Seznam obrázků	xiii
Seznam Obrázků	xiv
Seznam tabulek	xv
Seznam Tabulek	xv
1 Úvod	1
2 Globální družicové polohové systémy	3
2.1 Základní princip funkce GNSS	3
2.2 Principy měření	3
2.2.1 Kódové měření	3
2.2.2 Fázové měření	3
2.2.3 Dopplerovské měření	4
2.3 Metody měření	4
2.3.1 Určování polohy přímo v terénu	4
2.3.2 Určování relativní polohy	6
2.3.3 Přesná geodetická měření	6
2.4 Struktura GNSS systémů	7
2.4.1 Kosmický segment	7
2.4.2 Řídicí segment	7
2.4.3 Uživatelský segment	8
2.5 Přehled soustav družic	8
2.6 Rozšiřující systémy GNSS	9
2.7 Parametry GNSS přijímačů	11
2.7.1 Počet kanálů	11
2.7.2 Frekvenční pásma	11
2.8 Faktory ovlivňující přesnost měření	13
3 RTK GPS	15
4 CZEPOS	16
5 NTRIP protokol	18
6 Triangulační a nivelační body	19

7 RTKLIB	20
8 Testování vybraných GNSS systémů	21
8.1 Broadcom BCM47531	24
8.2 Microstrain 3DM-GX4-45	25
8.3 uBlox LEA-6H	27
8.4 uBlox NEO-M8N	28
8.5 Novatel OEM628	30
8.6 Swiftnav Piksi	31
8.7 Porovnání všech přijímačů	33
9 Využití GNSS pro malé bezpilotní prostředky	36
10 Závěr	38
Literatura	40

Seznam obrázků

2.1	Porovnání kódového a fázového měření	4
2.2	Průsečík kulových ploch pro určení polohy	5
2.3	Průsečík kulových ploch při zahrnutí časové odchylky	6
2.4	Přehled soustav družic	8
2.5	Pokrytí SBAS referenčních sítí	9
2.6	Přehled frekvenčních pásem	11
2.7	Vícecestné šíření signálů	13
3.1	Ilustrace fungování RTK GPS	15
4.1	Síť permanentních stanic Czepos	17
5.1	NTRIP protokol	18
6.1	Výsek z mapy s vyznačenými triangulačními body	19
7.1	Ukázka RTKLIB aplikace RTKNAVI	20
7.2	Propojení RTKLIB s permanentní stanicí přes NTRIP	20
8.1	Triangulační bod č.17 - Vítkov	21
8.2	Ukázka permanentní stanice	22
8.3	Umístění GNSS senzoru Broadcom BCM47531 v mobilním telefonu	24
8.4	Grafy znázorňující funkci AGPS u modulu Broadcom	25
8.5	Inerciální výpočetní jednotka Microstrain 3DM-GX4-45	26
8.6	Graf testování Microstrain GPS modulu s a bez Kalmanova filtru	26
8.7	uBlox LEA-6H	27
8.8	Graf testování přijímače uBlox LEA-6H	28
8.9	uBlox NEO-M8N	29
8.10	Graf testování přijímače uBlox NEO-M8N	29
8.11	Novatel OEM628	30
8.12	Graf testování přijímače Novatel OEM628	31
8.13	Swiftnav Piksi	32
8.14	Graf testování přijímače Swiftnav Piksi	32
8.15	Graf porovnání všech GNSS zařízení v měření výšky	33
8.16	Graf porovnání všech GNSS zařízení v měření zeměpisné šířky a délky	34
8.17	Graf porovnání všech GNSS zařízení v počtu využitých satelitů	35
9.1	Zástavba koaxiální hexakoptéry	36
9.2	Graf porovnání modulu Novatel a uBlox8 při dynamickém testování	37

Seznam tabulek

2.1	Přehled soustav družic	8
2.2	Frekvenční pásma GPS	12
2.3	Frekvenční pásma GLONASS	12
2.4	Frekvenční pásma GALILEO	12
2.5	Frekvenční pásma COMPASS (BEIDOU)	12
8.1	Testovaná GNSS zařízení	23
8.2	Přehled kvality měření u všech GNSS přijímačů	35

1 Úvod

V poslední době dochází k velkému rozvoji v oblasti malých bezpilotních prostředků. Zatímco v minulosti se využívaly především v armádě a to k průzkumným i útočným letům, dnes své využití našly i v civilním sektoru, kde se používají v komerční sféře (např. k hašení požárů, policejnímu sledování, průzkumu terénu či fotografování nebo natáčení videí ze vzduchu), pro vědecké účely nebo pro amatérské využití, kde slouží především k zábavě.

Jednou z nedílných komponent bezpilotních prostředků je modul GNSS navigace. Díky němu je letoun schopen lokalizace a popřípadě i autonomní navigace. V závislosti na různých aplikacích bezpilotních prostředků, je vyžadována určitá přesnost tohoto navigačního zařízení.

V současné době je provozována řada GNSS sítí s celosvětovým pokrytím. Nejstarší a dosud nejznámější a nejrozšířenější sítí GNSS družic je americký systém Navstar GPS. Plně funkční je však už i sítí ruských družic Glonass. Ve vývoji je nová evropská sítí Galileo a čínská sítí Compass.

Spojené státy americké zavedly v roce 1990 opatření tzv. selektivní dostupnosti, které do dat přenášených radiovým signálem uměle zanášelo chybu. Cílem tohoto rušení signálu bylo zabránění zneužití navigačních systémů např. pro navádění balistických střel. Jelikož však USA vyvinuly systém, který v případě potřeby dokáže cíleně zarušit signál jen na určitém území, zrušily od roku 2000 selektivní dostupnost a přesnost měření se tak několikanásobně zvýšila.

Od té doby je zjišťování polohy pomocí GNSS přijímačů volně dostupné civilnímu obyvatelstvu. Dnes jsou navigační zařízení již běžně využívána např. v turistických navigacích, v mobilních telefonech, v automobilovém průmyslu či v zemědělství. Málokdo však ví, že tyto běžně dostupné navigace dosahují nepřesnosti i desítek metrů, což je ale stále dostatečná přesnost pro většinu uživatelů.

Na Katedře počítačů, Fakulta elektrotechnická, ČVUT, pracujeme v současné době na vývoji bezpilotního prostředku, který má sloužit pro 3D mapování terénu. K tomu využívá především laserový senzor, který změří intenzitu a vzdálenost bodů, které vidí. Dále používá inerciální jednotku a navigační GNSS modul pro transformaci těchto bodů do správné soustavy souřadnic.

Je tedy patrné, že lokalizace je pro tento projekt velmi důležitou součástí, a to jak pro navádění bezpilotního prostředku, tak pro následné umístění změřených bodů tak, aby mohl vzniknout plnohodnotný 3D model. K tomuto účelu je však zapotřebí velmi přesné lokalizace (v řádu centimetrů).

Na trhu je v dnešní době nepřehledné množství různých přijímačů. Pro naše účely je důležitá především udávaná přesnost měření. Velmi zásadním parametrem pro výběr zařízení je pro nás také velikost a váha zařízení. Potřebujeme velmi malý a lehký modul, který nebude bezpilotní letoun příliš zatěžovat a zkracovat tím dobu jeho letu. V neposlední řadě je potřeba brát ohled i na cenovou dostupnost.

Cílem této práce je prostudovat možnosti a přesnost satelitní navigace pro potřeby malých bezpilotních systémů, vybrat vhodné existující moduly a na základě testů je vzájemně porovnat.

První část práce (kapitola 2) se zabývá teorií GNSS systémů. Především se zaměřuje na základní principy lokalizace, na typy přijímačů a jejich parametry a na strukturu družicových systémů. Následující část práce (kapitoly 3-7) se zabývá technologií, infrastrukturou a prostředky, které byly potřebné pro realizaci této práce. Je zde popsána např. triangulační síť, permanentní družicová síť, použitý software, apod. V závěru práce (kapitoly 8-9) jsou vybrané moduly testovány a to nejprve staticky a následně i dynamicky na bezpilotním letounu.

2 Globální družicové polohové systémy

2.1 Základní princip funkce GNSS

Globální družicový polohový systém (angl. Global Navigation Satellite System, zkratka GNSS) je systém družic, který umožňuje autonomní určení polohy s celosvětovým pokrytím. Uživatelé této služby mohou pomocí radiového přijímače, který je schopen dekódovat signály vysílané družicemi, určit s danou přesností svou aktuální polohu (zeměpisnou délku, šířku a výšku) [1].

2.2 Principy měření

Pro měření pomocí GNSS zařízení lze uplatnit tyto tři základní principy:

- kódové měření;
- fázové měření;
- dopplerovské měření.

2.2.1 Kódové měření

Kódové měření je založené na zjišťování vzdálenosti mezi družicí vysílající signál a přijímačem. Družice vyšle kód, který obsahuje časovou značku, kdy byl vyslán. Přijímač tuto značku dekóduje a porovná se svým časem. Vzdálenost d_i poté zjistí výpočtem dle vztahu (2.1) [2]:

$$d_i = \Delta t_i \cdot c, \quad (2.1)$$

kde c je rychlost šíření radiových vln a Δt_i je rozdíl dekódovaného času a času přijímače. Jelikož hodiny přijímače nemusí být zcela synchronní se systémovým časem družice, je výpočet časové diference zatížen systémovou chybou. Proto tuto vzdálenost d_i označujeme jako tzv. zdánlivou vzdálenost.

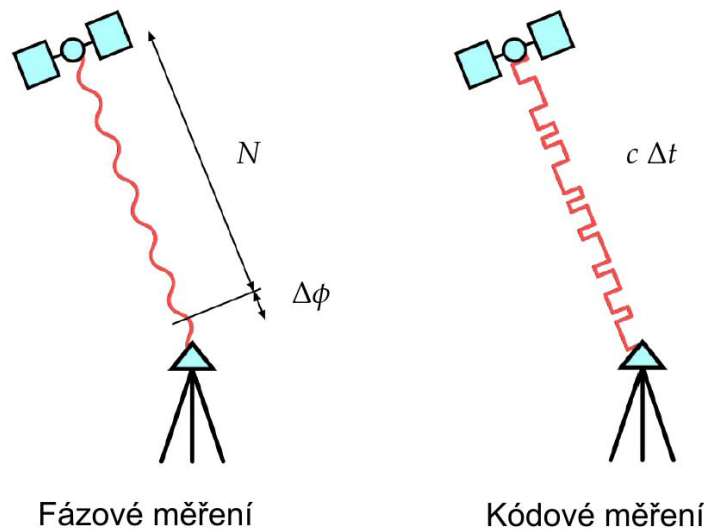
2.2.2 Fázové měření

Fázové měření je založeno na zpracování vlastní nosné vlny přijímače. Přijímač počítá počet vlnových délek, které se nachází mezi ním a družicí. Vzdálenost d_i se pak skládá z celočíselného násobku vlnových délek a ze zbylé (desetinné) části, která je spočítána z fázového posunu dle vztahu (2.2) [2]:

$$d_i = N \cdot \lambda + \Delta \varphi, \quad (2.2)$$

kde N je počet vlnových délek, λ je vlnová délka a $\Delta \varphi$ je měřený fázový posun.

Porovnání kódového a fázového měření je znázorněno na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Porovnání kódového a fázového měření [3]

2.2.3 Dopplerovské měření

Dopplerovské měření je metoda, která využívá Dopplerův posun. Spočívá v měření relativního posunu přijímače vůči družici za využití změn frekvencí. Díky tomu jsme schopni na základě signálu z jedné družice vypočítat dvourozměrnou polohu a rychlost přijímače. V dnešní době se dopplerovské měření k určování polohy nevyužívá a slouží především ke stanovení rychlosti přijímače.

2.3 Metody měření

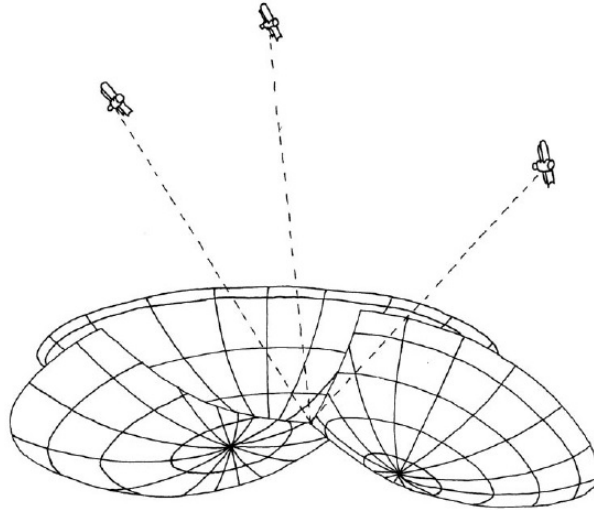
Existují následující tři metody měření pomocí GNSS zařízení. Liší se především náročností a časem měření, použitými přístroji a výslednou přesností lokalizace:

- určování polohy přímo v terénu;
- určování relativní polohy;
- přesná geodetická měření.

2.3.1 Určování polohy přímo v terénu

Určování polohy přímo v terénu probíhá pomocí kódových měření. Přijímač k tomu potřebuje přijímat signál minimálně ze tří družic. Po dekódování signálu z první družice, zjistí přijímač zdánlivou vzdálenost a může si tedy vytyčit kulovou plochu (o poloměru změřené vzdálenosti), ve které se nachází. Po přijmutí signálu od druhé družice, si

ohraničí druhou kulovou plochu. Tyto dvě kulové plochy společně vytanou kružnici, na které se přijímač nachází. Pro přesné určení polohy se využívá signál ze třetí družice, jehož změřená kulová plocha v prostoru vytne na kružnici dva body (znázorněno na obrázku 2.2). Jeden z těchto bodů můžeme rovnou zanedbat, jelikož se tento bod nachází daleko ve vesmíru. Druhý je hledaným polohovým bodem.



Obrázek 2.2: Průsečík kulových ploch pro určení polohy [2]

Problém však nastává při určování času, za který signál vzdálenost urazil. Hodiny přijímače a systémový čas družice nejsou synchronní a dochází tedy k odchylce, kterou nelze zanedbat. Při určování průsečíku tří kulových ploch proto nezískáme jeden bod, ale trojúhelník, ve kterém se přijímač nachází (viz obrázek 2.3).

Tím jsme však získali další neznámou veličinu ΔT , kterou nelze nijak určit. Celkem tedy máme systém se čtyřmi neznámými X, Y, Z a ΔT . Abychom všechny neznámé v systému mohli určit, potřebujeme přijímat ještě další signál z družice, čímž budeme již schopni určit z rovnic polohu přijímače i časovou odchylku.

Tyto čtyři rovnice pak lze zapsat takto [2]:

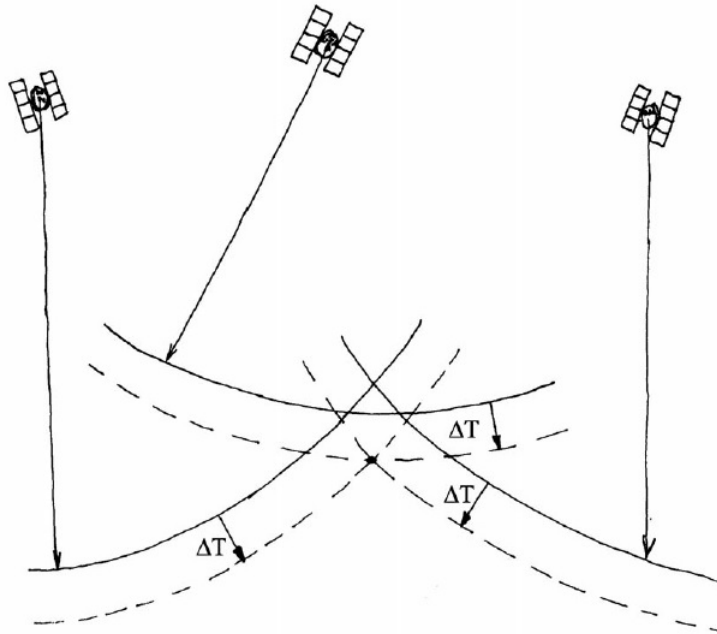
$$r_1 = \sqrt{(X - x_1)^2 + (Y - y_1)^2 + (Z - z_1)^2} - c \cdot \Delta T, \quad (2.3)$$

$$r_2 = \sqrt{(X - x_2)^2 + (Y - y_2)^2 + (Z - z_2)^2} - c \cdot \Delta T, \quad (2.4)$$

$$r_3 = \sqrt{(X - x_3)^2 + (Y - y_3)^2 + (Z - z_3)^2} - c \cdot \Delta T, \quad (2.5)$$

$$r_4 = \sqrt{(X - x_4)^2 + (Y - y_4)^2 + (Z - z_4)^2} - c \cdot \Delta T, \quad (2.6)$$

kde X, Y, Z jsou námi hledané souřadnice přijímače, x_i, y_i, z_i jsou souřadnice vysílajících družic, r_i jsou vypočítané vzdálenosti přijímače a družic, ΔT je posun hodin přijímače oproti systémovému času družic a c je rychlost světla. ΔT je pro všechny rovnice stejný, jelikož jsou hodiny družic synchronizované.



Obrázek 2.3: Průsečík kulových ploch při zahrnutí časové odchylky [2]

2.3.2 Určování relativní polohy

Určování relativní polohy je přesnější metodou než přímé měření (avšak je také založena na kódovém měření). K jejímu uskutečnění však potřebujeme dva přijímače (nebo jeden přijímač a blízkou referenční stanicí). Jeden slouží jako referenční přijímač, který umístíme na místo, u něž známe přesnou polohu a na základě své změřené polohy počítá své odchylky od známého bodu. Pak posílá vypočítaný korekční signál druhému přijímači. Tímto lze docílit odchylky menší než jeden metr.

2.3.3 Přesná geodetická měření

Přesná geodetická měření se využívají, pokud potřebujeme znát polohu přijímače s přesností na centimetry. Pro tyto účely si už nevystačíme s kódovým měřením. Používají se proto diferenční fázová měření. Poloha se zde také určuje relativně, takže je zapotřebí přijímače a základny, jejíž polohu musíme znát s přesností na milimetry. Pokud se základna nachází do 500 km od přijímače, používají se k výpočtu relativní polohy dvojité diference. Při použití rozsáhlejších sítí, bychom museli využít k výpočtu i trojitou diferenci a zavést další korekce.

Používané metody fázového měření:

- statická - měření probíhá po dobu několika hodin až dnů a je přijímáno více signálů z více referenčních stanic a následně post-procesově zpracováno;
- rychlá statická - potřebuje dva dvoufrekvenční referenční přijímače z nichž jeden je na známých souřadnicích (měření trvá několik minut);
- stop and go (polokinematická) - využívá jen jednoho referenčního a jednoho pohybujícího se přijímače a vyhodnocuje fázové posuny i během přemísťování přijímače (měření trvá několik sekund);
- kinematická - stejná jako metoda stop and go, ale přijímač se může nepřetržitě pohybovat (není potřeba jeho zastavení), přijímač se na začátku inicializuje (10-15 minut) a zjistí si potřebné korekce;
- RTK (real-time kinematic) - obdoba kinematické metody, ale inicializace trvá okolo 10 sekund a korekce se pracovávají v průběhu měření.

2.4 Struktura GNSS systémů

GNSS systémy se dělí do tří základních segmentů:

- kosmický segment
- řídicí segment
- uživatelský segment

2.4.1 Kosmický segment

Skládá se z několika desítek aktivních umělých družic, které obíhají kolem Země (tyto soustavy družic jsou znázorněny na obrázku 2.4). Každá z družic je vybavena přijímačem, vysílačem a přesnými atomovými hodinami. energii, kterou družice potřebují ke svému fungování získávají ze solárních panelů. Pohybují se po předem určených eliptických drahách, takže je v každém okamžiku známa jejich poloha. Družice se však časem od těchto predikovaných drah vychylují, což způsobuje chybu v přesnosti měření.

2.4.2 Řídicí segment

Řídicí segment se nachází na Zemi. Stará se o udržování a synchronizaci systémového času družic a průběžně monitoruje a koordinuje celý systém. Skládá se z několika monitorovacích stanic, které nepřetržitě přijímají signály ze všech družic, a z jedné hlavní řídicí stanice, která z přijatých dat vypočítává korekce polohy a času družic a popřípadě provádí manévry satelitů, aby se kompenzovaly odchylky od predikovaných drah.

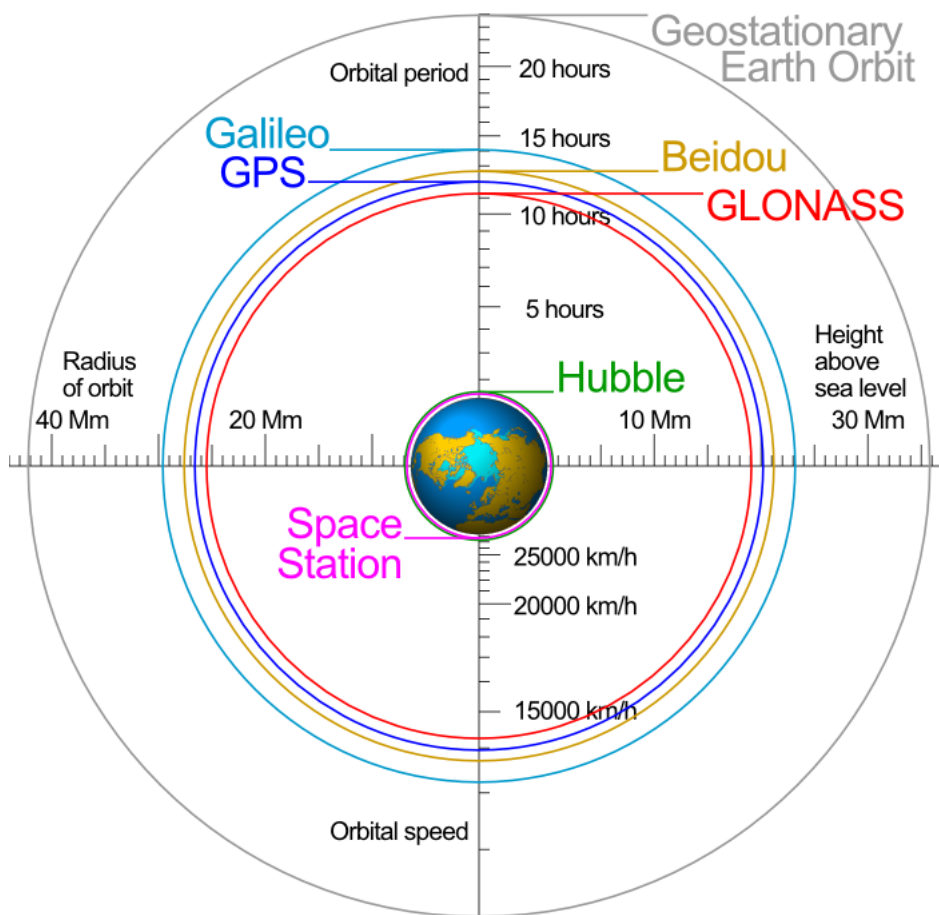
2.4.3 Uživatelský segment

Zahrnuje pozemní přijímače schopné přijímat a zpracovávat družicové GNSS signály.

2.5 Přehled soustav družic

Název	Stát	Rok vypuštění první družice	Počet aktivních družic
Navstar GPS	USA	1978	31
Glonass	Rusko	1982	24
Galileo	EU	2006	10
Compass (Beidou)	Čína	2007	18

Tabulka 2.1: Přehled soustav družic



Obrázek 2.4: Přehled soustav družic [4]

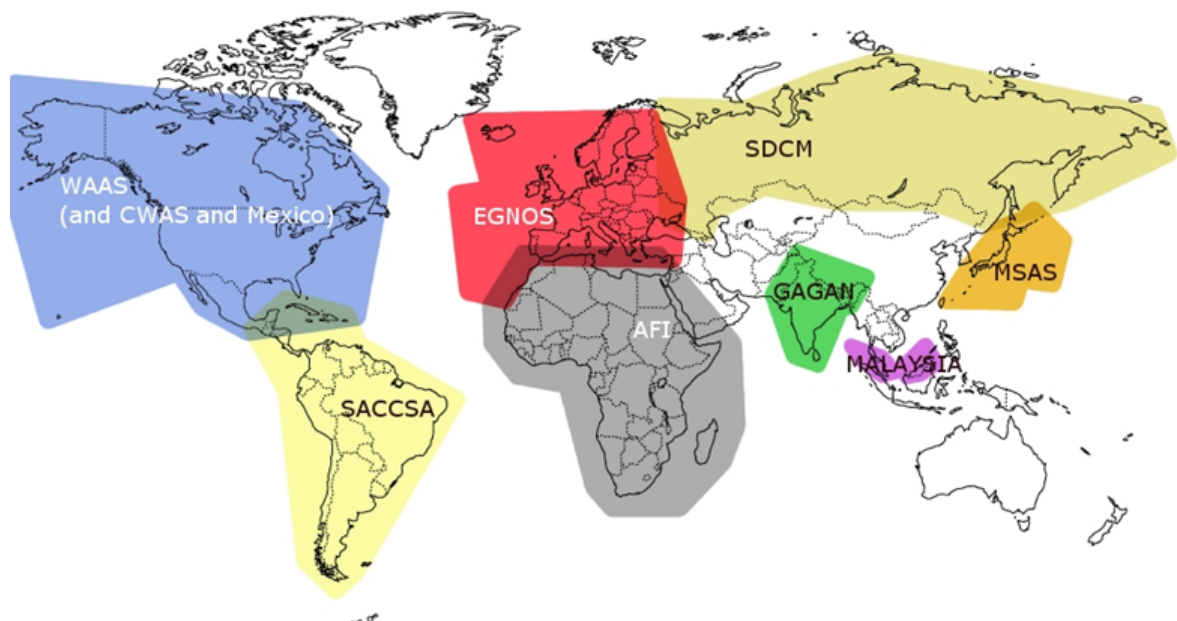
GNSS systémy dělíme na dvě generace: GNSS-1 a GNSS-2. Do první generace řadíme americký Navstar GPS a ruský Glonass. Tyto družicové systémy byly primárně vybudovány pro vojenské účely a teprve sekundárně začaly být využívány i pro civilní sektor. Do druhé generace patří evropský systém Galileo a čínský Compass, které jsou teprve ve vývoji. Jsou vyvíjeny především kvůli přesnosti a spolehlivosti pro vysílání civilního *Safety Of Life (SoL)* signálu.

2.6 Rozšiřující systémy GNSS

Diferenční GNSS označován také jako DGNSS, je podpůrný referenční systém zahrnující systémy SBAS a GBAS.

SBAS (*Satellite Based Augmentation Systems*) je obecný název pro síť statických referenčních stanic umístěných na Zemi, které v reálném čase vyhodnocují aktuální stav družic a ionosféry a vypočítávají korekce, které zpětně posílají družicím, aby zpřesnily jejich data. To ovšem způsobuje malé časové zpoždění korekcí.

Ke globálním sítím SBAS patří např. Omnistar, StarFire nebo Starfix. Kromě globálních sítí existují i regionální sítě těchto statických stanic jako jsou např. WAAS (USA), EGNOS (EU), MSAS (Japonsko), GAGAN (Indie), CWAAS (Kanada), SDCM (Rusko) a SNAS (Čína) (viz obrázek 2.5). Tyto regionální sítě jsou obvykle zřizovány vládními organizacemi a jejich data jsou volně dostupná.



Obrázek 2.5: Pokrytí SBAS referenčních sítí [5]

GBAS (*Ground Based Augmentation Systems*) je stejně jako SBAS síť statických referenčních stanic, které počítají korekční data na základě aktuálního stavu družic a ionosféry. Na rozdíl od sítě SBAS však data neposílají zpět k družicím, ale poskytují uživatelům korekce skrze mobilní síť (typicky přes NTRIP protokol), radiové vysílání a nebo pro následné post-procesové zpracování.

Regionálními sítěmi GBAS jsou např. GRAS (Austrálie), DGPS (USA), WAGE (USA), EUREF (EU) a CZEPOS (ČR).

LAAS (*Local Area Augmentation System*) je název pro lokální síť GBAS, které se využívají jen pro velmi malé území a mají své specifické využití (např. u letišť, dolů, rozsáhlých staveb, apod.).

IGS (*International GNSS Service*) je dobrovolná mezinárodní organizace zahrnující okolo dvou set vědců po celém světě, kteří sbírají data ze všech GPS a GLONASS družic a dodatečně je zpracovávají. Zpětně tak získávají velmi přesné údaje o efemeridách družic, rotaci Země, ionosférickém a troposférickém zpoždění, přesných korekcích hodin a 3D souřadnicích monitorovacích stanic.

ILRS (*International Laser Ranging Service*) je služba, která poskytuje data naměřená pomocí laserových měřičů (družice proto musí mít odražeče, které se postupně budují hlavně u GNSS druhé generace). Díky těmto měřením poskytuje ILRS informace o orientaci Země a Měsíce, o poloze a rychlosti vysílacích ILRS stanic, o gravitaci zemského pole, apod.

Regionální NSS jsou regionální síť družic. Často doplňují globální systémy a také bývají jejich předchůdcem. Patří sem QZSS (Japonsko, 3 družice), IRNSS (Indie, 7 družic) a Beidou (Čína), který je nyní již součástí budovaného globálního systému Compass.

2.7 Parametry GNSS přijímačů

Přijímačů GNSS je v současné době na trhu nepřeberné množství a to nejen v běžně dostupných turistických GPS navigacích či mobilních telefonech, ale například i v přesnějších GNSS modulech nebo ve velmi přesných geodetických přístrojích.

Jejich přesnost je vždy udávána výrobcem, ale existují i další parametry, kterými se při výběru vhodného přijímače řídit. Záleží např. na frekvenčních pásmech, které je schopen přijímat, počtu kanálů, zda je zařízení schopné měřit kódově či frekvenčně, jaká je velikost přijímače, apod.

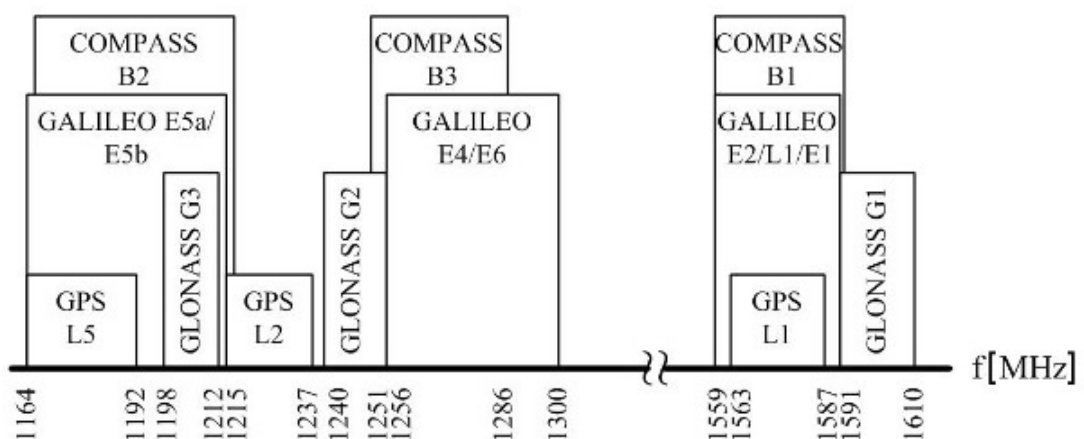
2.7.1 Počet kanálů

U každého přijímače výrobce uvádí tzv. počet kanálů. Toto číslo udává počet signálů, které je schopen přístroj zpracovávat v jednom okamžiku. V minulosti se používaly převážně jednokanálové přijímače, které mohly přijímat signál pouze z jedné družice, a proto musely mezi jednotlivými družicemi neustále přepínat.

2.7.2 Frekvenční pásma

Každý družicový systém vysílá signály v několika různých frekvenčních pásmech (viz obrázek 2.6). Přijímače jsou ovšem často schopné přijímat jen několik z nich najednou. Podle toho dělíme GNSS přijímače na tzv. *jednofrekvenční*, *dvoufrekvenční* a *vícefrekvenční*.

U každého přijímače je také vždy uvedeno, která konkrétní pásma u různých GNSS soustav družic umí dekódovat.



Obrázek 2.6: Přehled frekvenčních pásem [6]

Využití frekvenčních pásem u systému GPS:

Pásmo	Frekvence	Popis
L1	1575.42 MHz	dostupná pro civilní uživatele (L1C), dále je šířen vojenský P(Y) kód, který je šifrovaný a přístupný pouze pro autorizované uživatele
L2	1227.60 MHz	vysílán vojenský P(Y) kód, novější družice jsou připraveny vysílat vojenský M kód a civilní C kód (L2C)
L5	1176.45 MHz	používá se jako civilní Safety-of-life (SoL) signál

Tabulka 2.2: Frekvenční pásma GPS

Využití frekvenčních pásem u systému Glonass:

Pásmo	Frekvence	Popis
G1	1602.00 MHz	vysílán HP (<i>High-Precision</i>) a SP (<i>Standart-Precision</i>) kód
G2	1246.00 MHz	vysílán HP kód a u novějších družic i SP kód
G3	1204.70 MHz	pro Safety-of-life (SoL) signál

Tabulka 2.3: Frekvenční pásma GLONASS

Využití frekvenčních pásem u systému Galileo:

Pásmo	Frekvence	Popis
E1	1575.42 MHz	veřejný sektor, Safety-of-life (SoL) signál, část pásma vyhrazena pro vládní účely
E5a	1176.45 MHz	veřejný sektor
E5b	1207.14 MHz	veřejný sektor, civilní sektor a Safety-of-life (SoL) signál
E6	1278.75 MHz	civilní sektor, část pásma vyhrazena pro vládní účely

Tabulka 2.4: Frekvenční pásma GALILEO

Využití frekvenčních pásem u systému Compass (Beidou):

Pásmo	Frekvence	Popis
B1	1561.10 MHz	veřejný a autorizovaný sektor
B2	1207.14 MHz	veřejný sektor
B3	1268.52 MHz	autorizovaný sektor

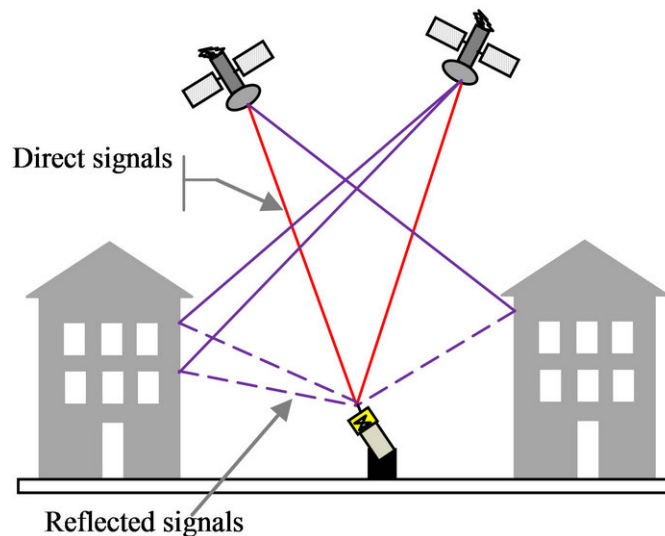
Tabulka 2.5: Frekvenční pásma COMPASS (BEIDOU)

2.8 Faktory ovlivňující přesnost měření

Stav družic - každá družice ve svém kódu vysílá signál o tom, zda má správnou polohu na oběžné dráze, zda je plně funkční, apod. Ve zprávě přijaté přijímačem je pak družice označena jako *zdravá* či *nezdravá*.

Poměr signálu a šumu - číslo, které vyjadřuje poměr signálu (užitečných informací) a šumu. Čím menší toto číslo je, tím horší získáváme přesnost měření. Šum může být způsoben špatnou viditelností, fyzickou překážkou (např. koruny stromů) nebo umístěním přijímané družice nízko nad horizontem.

Vícecestné šíření (*angl. multipath propagation*) - zde chyba vzniká díky tomu, že přijímač kromě přímého signálu zpracovává i odražený signál (převážně od výškových prosklených budov, skal, apod.). To je znázorněno na obrázku 2.7. Touto chybou měření mohou vznikat odchylky až do 50 metrů u kódových měření a do 10 cm u fázových měření.



Obrázek 2.7: Vícecestné šíření signálů [7]

Platnost a přesnost efemerid - efemeridy jsou názvem pro sférické souřadnice, které udávají zdánlivou polohu pohyblivých astronomických objektů (Slunce, Měsíce, hvězd, družic,...) v určitém čase. Existuje několik druhů efemerid pro družice a každý typ má jinou přesnost. Nejméně přesné efemeridy jsou ty, které v reálném čase přijímáme od družic (přesnost okolo 2 m). Přesnější jsou pak například efemeridy, které jsou postprocesově zpracovávány a počítány (odchylka menší než 5 cm). Tyto efemeridy ovšem získáme až po třech hodinách a nemůžeme s nimi tedy pracovat v reálném čase.

Počet a uspořádání viditelných družic - k určení polohy potřebujeme nejméně čtyři družice. Nicméně čím více družic bude pro přijímač viditelných, tím vyšší přesnosti dosáhneme. Kromě počtu však záleží i na jejich geometrickém uspořádání. Informaci o snížení kvality geometrického uspořádání určuje parametr DOP (*Dilution of precision*).

Přesnost hodin družice - každá družice má své vlastní atomové hodiny, jejichž přesnost je 10^{-11} až 10^{-13} s za 24 hodin. Informace o přibližné korekci jsou vysílány společně s efemeridami. Přesnější korekce lze pak zjistit až společně s přesnějšími efemeridami, tedy nejméně po třech hodinách.

Přesnost hodin přijímače - nepřesnost hodin přijímačů je řádově vyšší než u hodin družic, čímž vznikají větší odchylky. Jejich korekce jsou zahrnuty při výpočtu, který jsme zmínili již v kapitole 2.3.

Vliv atmosféry - signály vysílané z družic jsou nejvíce ovlivněny ionosférou a troposférou díky tzv. ionosférické a troposférické refrakci. Korigovat tyto chyby lze pomocí statických referenčních sítí (DGNSS), které znají svou přesnou polohu, a proto mohou zjistit, jak moc se přijímaný signál liší a sdělit to ostatním přijímačům.

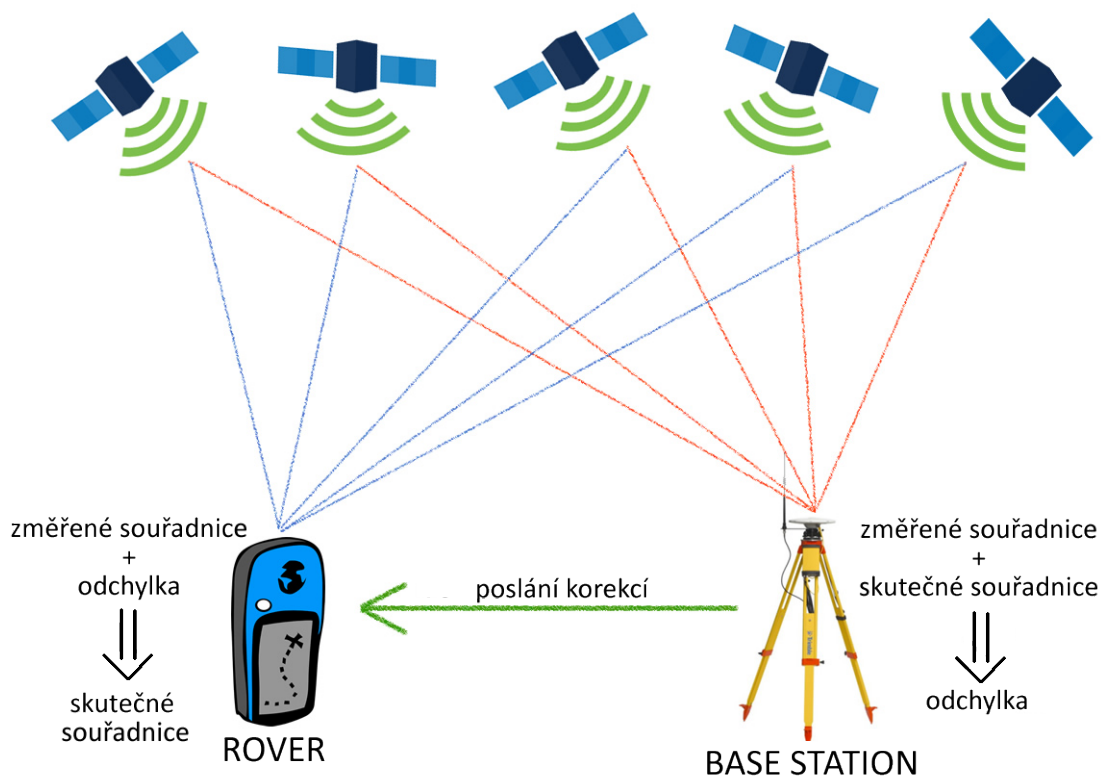
Kvalita přijímače - u přijímačů záleží tom, kolik kanálů (signálů) mohou najednou přijímat, zda jsou monofrekvenční či více-frekvenční, zda podporují funkci diferenčního měření apod., viz kapitola 2.7.

Zvolená metoda měření - jak už jsme zmínili, záleží na tom, jakou metodu měření si zvolíme. Např. fázová měření jsou oproti kódovým mnohonásobně přesnější.

3 RTK GPS

RTK GPS (*Real-Time Kinematic GPS*) je metoda, která využívá fázová měření. Polohu měřeného bodu určuje v reálném čase a proto není potřeba následného zpracování (jako tomu je v případě statického měření). Pro tuto metodu je zapotřebí dvou GNSS přijímačů, které podporují RTK měření. Jeden z přijímačů (*tzv. base station*) je umístěn staticky a po chvíli si zaměří své souřadnice a svou pozici určí jako *tzv. fix*. Následně počítá odchylky svých známých a změřených souřadnic. Druhý přijímač (*tzv. rover*) se může pohybovat a počítá svou přesnou pozici na základě korekčních dat přijímaných z bázevých stanice (znázorněno na obrázku 3.1). Tento přenos korekcí probíhá nejčastěji prostřednictvím radiové komunikace. Pokud je bázevých přijímač umístěn na neznámou pozici, získáme pouze relativní data. Pokud ho však umístíme na předem známou pozici (např. na nivelační či triangulační značku), získáme velmi přesná absolutní data.

Pokud nemáme k dispozici dva RTK přijímače, lze namísto bázevých statického přijímače použít blízkou referenční stanici některé z permanentních sítí. Výhodou může být to, že u referenční stanice předem známe její přesnou pozici. Problémem je však to, že přesnost měření se zhoršuje se zvyšující se vzdáleností od této stanice.



Obrázek 3.1: Ilustrace fungování RTK GPS

4 CZEPOS

Czepos je síť permanentních stanic GNSS v České republice. Je pod správou Českého úřadu zeměměřického a katastrálního (ČÚZK) a v současné době spravuje 23 stanic po celé ČR, které jsou umístěné na katastrálních úřadech, a 5 externích stanic, které jsou umístěné na vědeckých pracovištích (viz obrázek 4.1). Poskytuje čtyři druhy služeb: RINEX, DGPS, RTK a VRS [8]. Všechny tyto služby jsou pro komerční účely zpoplatněné.

RINEX je služba, která poskytuje data pro tzv. *post-processing* (dodatečné zpracování dat). Uživatel si vybere referenční stanici, ze které chce stáhnout korekční data. Tyto korekce jsou k dispozici přibližně 3 hodiny po reálném naměření dat a díky tomu jsou mnohem přesněji spočítané. Výsledná poloha je počítána softwarem pro post-processing.

DGPS (diferenciální GPS) je služba, která poskytuje korekce v reálném čase. Pro využití těchto korekcí postačí jednoduchý přijímač umožňující pouze kódová měření, který je schopen přijímat a zpracovávat DGPS korekce v reálném čase (buď má v sobě zabudovaný GPRS modul, který je schopen se připojit k internetu, nebo může být externě připojený k internetu přes jinou aplikaci - viz RTKLIB, kapitola 7). Těmito korekcemi lze dosáhnout přesnosti do 10 cm.

RTK (real-time kinematics) poskytuje korekční data pro fázové dvoufrekvenční přijímače, které jsou schopné přijímat a zpracovávat RTK korekce v reálném čase. Zároveň je potřeba mobilní internetové připojení GPRS, díky kterému lze data posílat přes síťový protokol NTRIP. Těmito korekcemi lze docílit přesnosti v řádu centimetrů (v závislosti na vzdálenosti od referenční stanice).

VRS (virtuální referenční stanice) funguje obdobně jako služba RTK. Opět je potřeba fázová dvoufrekvenční aparatura s mobilním připojením, např. GPRS. Ovšem zde je k výpočtům nutné přijímat signál z více referenčních stanic (tzv. síťové řešení). Tímto výpočtem se do aktuálního místa měření umístí virtuální referenční stanice, ke které se pak vztahují korekce. Opět zde dosáhneme přesnosti několika centimetrů (nezávisle na vzdálenosti od referenčních stanic).



Obrázek 4.1: Síť permanentních stanic CzePOS [8]

5 NTRIP protokol

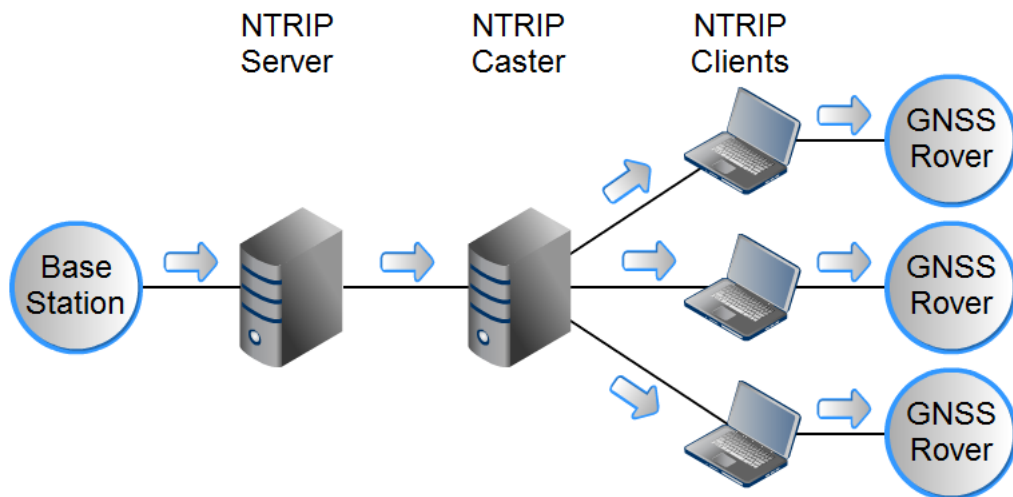
Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP) je komunikační protokol určený pro přenos diferenčních korekcí ve formátu RTCM prostřednictvím internetu. Je postaven na protokolu HTTP. Podporuje také šíření dat pomocí datových služeb mobilních operátorů (např. GPRS).

Systém NTRIP se skládá ze 3 základních objektů (viz obrázek 5.1):

NTRIP Server je aplikace, která slouží jako zdroj korekčních dat pro NTRIP Caster. Zajišťuje především komunikaci s referenční aparaturou. S tou komunikuje zpravidla buď přes USB rozhraní nebo vzdáleně přes TCP/IP protokol.

NTRIP Caster je část systému, která přijímá naměřená data od NTRIP Serveru a distribuuje je klientům, kteří si o data zažádají. To probíhá na dálku přes zmiňovaný NTRIP protokol skrze mobilní připojení.

NTRIP Client odebírá korekční data, která mu posílá NTRIP caster a zprostředkovává je měřící aparatuře.



Obrázek 5.1: NTRIP protokol [9]

6 Triangulační a nivelační body

Triangulační bod je geodetický bod, který slouží jako vztažný bod pro měření polohy. Všechny body tvoří dohromady tzv. triangulační (polohovou) síť. Body těchto sítí jsou trvale stabilizované (obvykle kamenný hranol s vytesaným křížkem na vrchní ploše hranolu), případně trvale signalizované (např. špička věže kostela).

Polohové bodové pole tvoří:

- základní polohové bodové pole (ZBPB)
- zhušťovací body (ZhB)
- podrobné polohové bodové pole (PPBP)

Při zaměřování se postupuje od méně hustých sítí k těm podrobnějším. Nejprve se určí síť I. řádu (přesnost 0,040 metrů), která se postupně zahušťuje až do sítě V. řádu (přesnost 0,015 metrů).



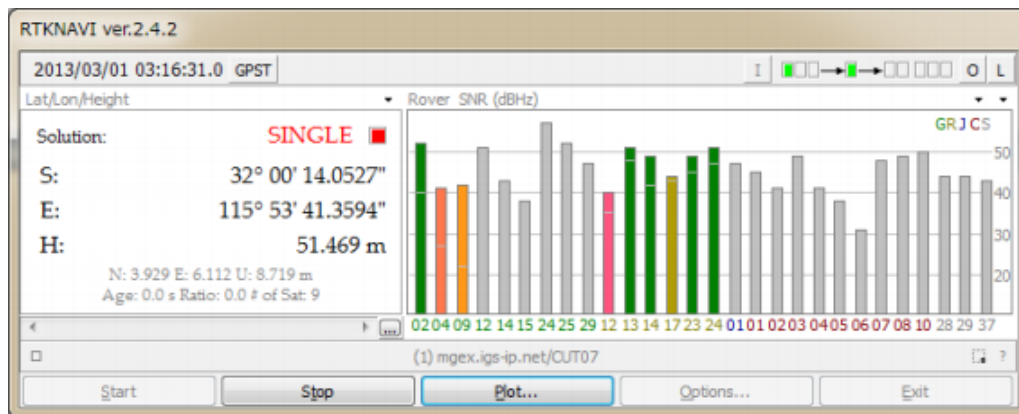
Obrázek 6.1: Výsek z mapy s vyznačenými triangulačními body [10]

Nivelační bod je geodetický bod, který slouží jako vztažný bod pro výšková měření. Jednotlivé body propojené měřením tvoří nivelační síť. U každého bodu je evidována nadmořská výška, určená metodou zvanou nivelace. Výška je uvedena v metrech, obvykle s přesností na 3 desetinná místa a je uvedena v dokumentaci, kterou spravuje Zeměměřický úřad (ZÚ) nebo katastrální úřad (KÚ) v příslušném okrese.

Výška je vztažena k hladině moře, v Česku ke střední hladině moře Baltského (systém Bpv = Baltský po vyrovnání).

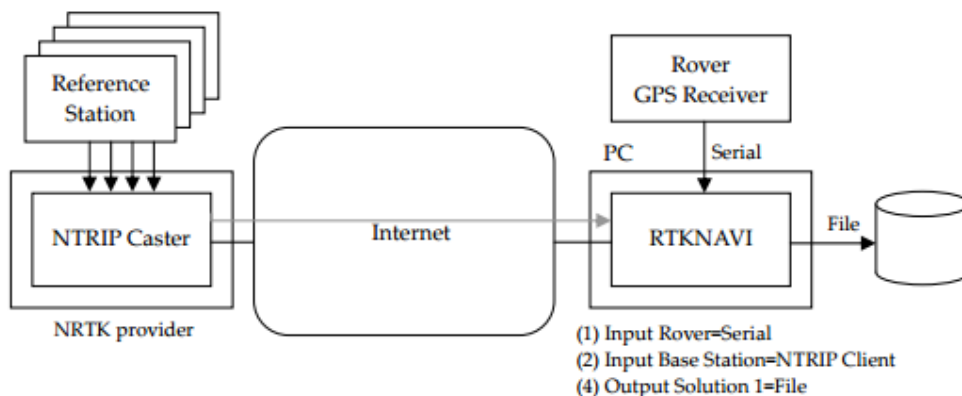
7 RTKLIB

RTKLIB je volně dostupná knihovna s aplikacemi pro práci s GNSS zařízenými. RTKLIB je schopna ze zařízení přijímat surová data a ty následně zpracovat pomocí korekcí v reálném čase (např. pro diferenční či RTK měření). Zároveň poskytuje i nástroje pro následné post-procesové zpracování, konverzi dat a vykreslení grafů. Ukázka grafického rozhraní RTKLIB je na obrázku 7.1.



Obrázek 7.1: Ukázka RTKLIB aplikace RTKNAVI [11]

RTKLIB podporuje mnoho standardních formátů pro čtení dat (Novatel, uBlox, Sky-Traq, Rinex, apod.). Umožňuje příjem a zpracování signálů družic GPS, Glonass, Galileo, QZSS, BeiDou a statických sítí SBAS. Při zápisu lze snadno uložit výsledky do textové podoby (např. NMEA formát zpráv). Při připojení k internetu je schopen nahradit jeden přijímač daty poskytovanými serverem (NTRIP či TCP), a tudíž může přijímat korekce z blízké permanentní stanice (viz obrázek 7.2).



Obrázek 7.2: Propojení RTKLIB s permanentní stanicí přes NTRIP [11]

8 Testování vybraných GNSS systémů

Cílem této práce je otestování a porovnání vybraných GNSS přijímačů. Všechna měření zmíněná v této kapitole byla provedena staticky. Abychom jednotlivá naměřená data mohli porovnat, byla tato měření provedena vždy na stejném místě - v Praze na Vítkově na triangulačním bodu č.17 (obrázek 8.1). Díky známé poloze triangulačního bodu lze docílit zjištění absolutní přesnosti zaměřování polohy u daného senzoru.



Obrázek 8.1: Triangulační bod č.17 - Vítkov

Pokud jsme porovnávali více zařízení, byla tato měření provedena vždy ve stejný den v co nejkratším časovém rozmezí, abychom vytvořili co nejsrovnatelnější podmínky. Tím jsme zajistili, že všechny testy byly provedeny za srovnatelné konstelace satelitů, stavu ionosféry, apod. (faktory ovlivňující přesnost měření jsou detailně popsány v kapitole 2.8).

Pokud to daný senzor umožňuje, provedli jsme i diferenční měření (DGPS), RTK měření a offline měření (post-procesové zpracování dat). Přístupné jsme měli dvě různé referenční stanice (ukázka permanentní referenční stanice je na obrázku 8.2). První statický přijímač je umístěn na střeše budovy Fakulty Elektrotechnické ČVUT v Praze v Dejvicích. Od triangulačního bodu na Vítkově je jeho anténa vzdálena 5087 metrů. Druhý přijímač spadá do referenční sítě Czepos. Je umístěn na budově Českého úřadu zeměměřického a katastrálního v Praze v Kobylisích. Jeho anténa je od triangulačního bodu na Vítkově vzdálena 3842 metrů.



Obrázek 8.2: Ukázka permanentní stanice [8]

Anténu testovaného GNSS zařízení jsme vždy umístili na střed kamenného hranolu triangulačního bodu vyznačený křížkem (v případě dvou-přijímačové aparatury Piksi jsme druhou anténu umístili do vzdálenosti tří metrů od triangulačního bodu). Zařízení jsme připojili k počítači a to přes sériové či USB rozhraní (výjimkou byl pouze modul zabudovaný v mobilním telefonu, který je schopen ukládat naměřená data přímo do své paměti). Skrze vybraný software (RTKLIB, uBlox u-center, Microstrain MIP monitor software, Piksi console nebo GPS logger) jsme ze zařízení četli data a ukládali je do počítače. Čtení dat jsme vždy nastavili na nejvyšší možnou frekvenci, se kterou je modul schopen data poskytovat. Dále jsme použili 3G wifi router, který při vložení sim-karty poskytoval internetové připojení pro diferencní (DGPS) a RTK měření. Se všemi moduly jsme měřili v několika různých konfiguracích a to vždy po dobu okolo 15 minut.

Všechna naměřená data jsme zpracovali pomocí softwaru Matlab, který umožňuje analýzu dat a vykreslování grafů. Výsledná data jsme znázornili pomocí metody tzv. konfidenčních elips. Tato metoda je využívána pro statistické zpracování dat. Potřebné informace získáme především z umístění a tvaru elipsy a z délky poloměrů jejích poloos.

Pro každé zařízení jsme použili anténu, která se dodává přímo s modulem nebo je doporučena pro její použití s daným přijímačem. Nejdůležitějším parametrem výběru antény je počet a šíře frekvenčních pásem, ve kterých je schopna přijímat signály z družic. Podle toho dělíme antény (stejně jako přijímače) na jednofrekvenční, dvoufrekvenční nebo více-frekvenční. Je potřeba brát ohled na parametry přijímače. Pokud použijeme dvoufrekvenční GNSS přijímač, musíme použít dvoufrekvenční či více-frekvenční anténu, abychom mohli využít všechny funkce daného modulu.

Celkem bylo otestováno šest zařízení (viz tabulka 8.1).

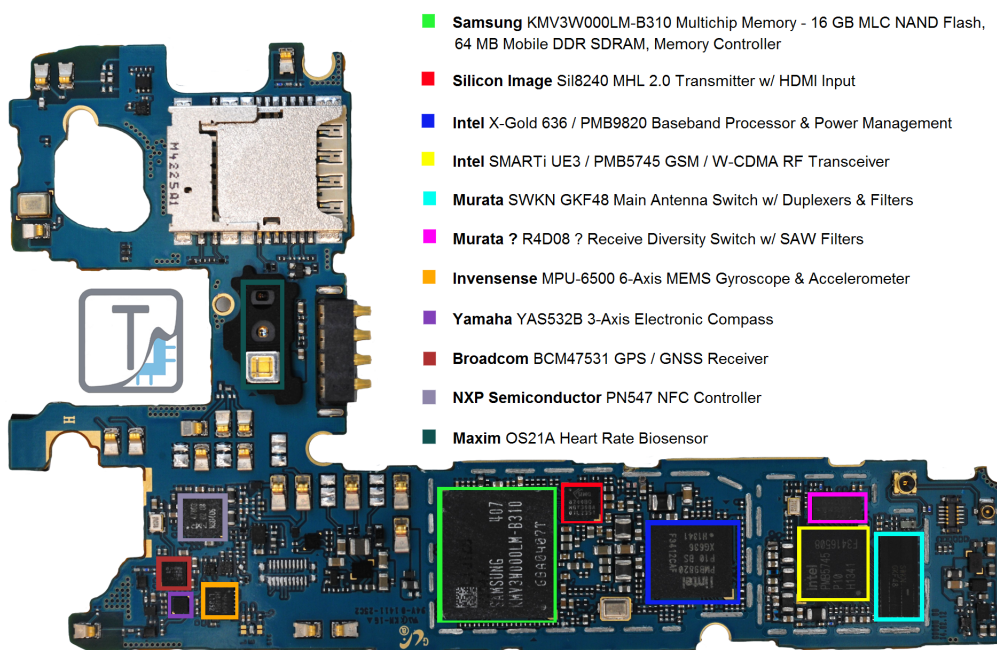
Název	Typ měření	Frekvenční pásma	Družice	Maximální frekvence	Uváděná přesnost
Broadcom BCM47531	kódové	L1,G1,B1	GPS, GLONASS, BEIDOU, SBAS	2 Hz	300 cm
Microstrain 3DM-GX4-45	kódové	L1	GPS, SBAS	4 Hz	200 cm
uBlox LEA-6H	kódové	L1	GPS, SBAS	5 Hz	200 cm
uBlox NEO-M8N	kódové	L1,G1,B1,E1	GPS, GLONASS, BEIDOU, GALILEO, SBAS	10 Hz	200 cm
Novatel OEM628	fázové	L1,L2,L5,G1,G2,B1,B2,E1,E5	GPS, GLONASS, BEIDOU, GALILEO, SBAS	20 Hz	1 cm
Swiftnav Piksi	fázové	L1,G1,E1	GPS, GLONASS, GALILEO, SBAS	50 Hz	6 cm

Tabulka 8.1: Testovaná GNSS zařízení

8.1 Broadcom BCM47531

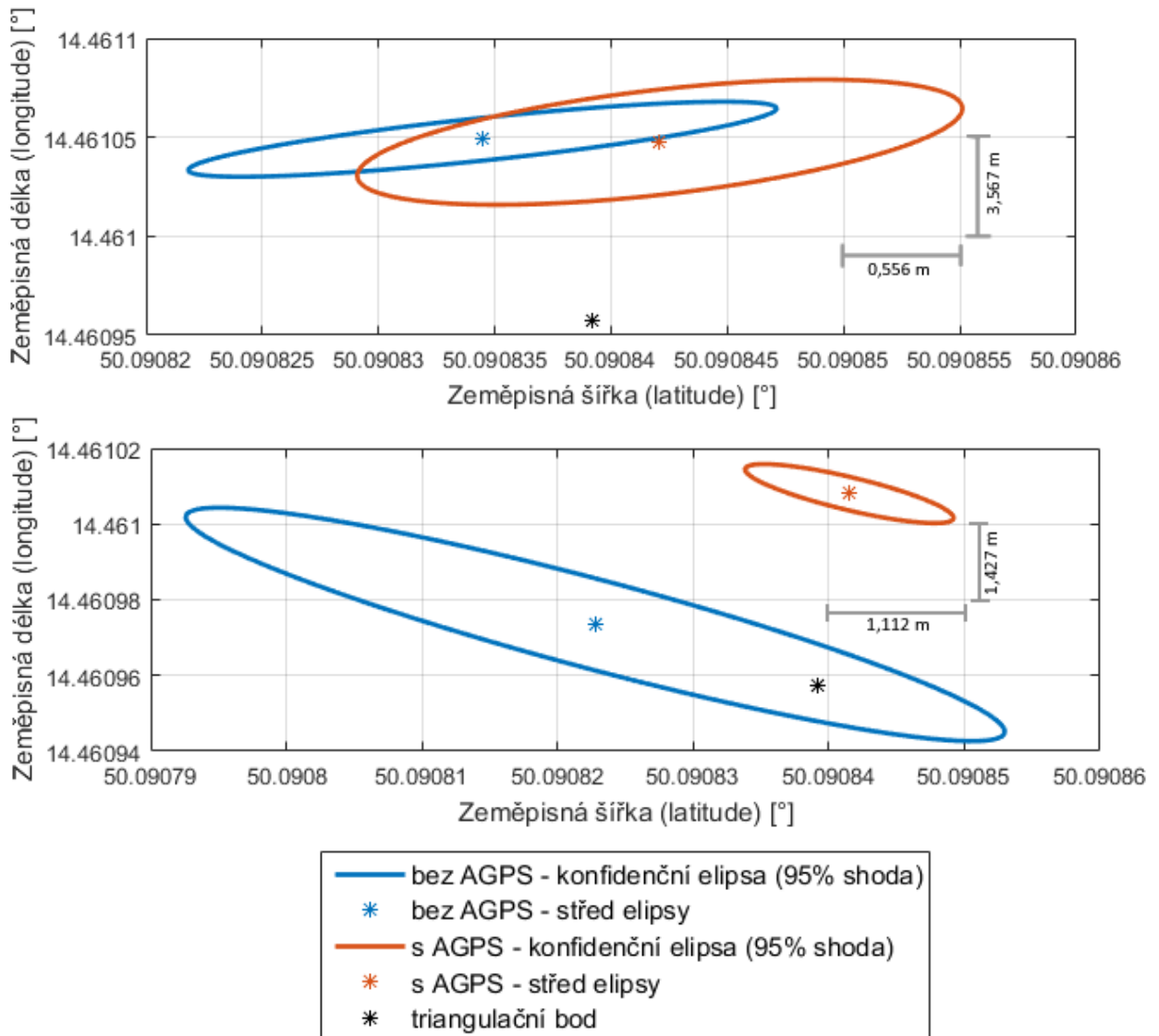
Prvním testovaným GNSS zařízením byl modul zabudovaný do mobilních telefonů *Samsung Galaxy S5* (obrázek 8.3). Výrobce uvádí, že se jedná o jednofrekvenční zařízení, které je schopné přijímat signály z družic GPS, Glonass, Beidou a ze statických sítí SBAS. Maximální dosažitelná frekvence vyčítání dat je 2 Hz. Udávaná přesnost určení polohy je 300 cm.

Výhodou mobilních telefonů je možnost použití funkce A-GPS (angl. Assisted GPS). Tato funkce umožňuje mobilním telefonům určit svojí přibližnou GPS polohu díky mobilnímu internetu. Telefon se v inicializační fázi připojí k internetu a stáhne si údaje o aktuální přesné poloze družic. To značně urychluje dobu inicializace a umožňuje to zjištění polohy i v místě se špatným či žádným GPS signálem (např. uvnitř budovy).



Obrázek 8.3: Umístění GNSS senzoru Broadcom BCM47531 v mobilním telefonu [12]

Funkci AGPS jsme u tohoto modulu otestovali. Výsledky však ukázaly, že tato funkce pouze urychlí počáteční lokalizaci, ale už nepomáhá ke korekci výsledků. Výsledky z měření jsou vidět na dvou grafech 8.4. Na jednom je vidět, že s funkcí AGPS jsou výsledky téměř stejné jako bez této funkce. U druhého měření je vidět, že s touto funkcí se dokonce přijímač zaměřil s větší nepřesností.



Obrázek 8.4: Grafy znázorňující funkci AGPS u modulu Broadcom

8.2 Microstrain 3DM-GX4-45

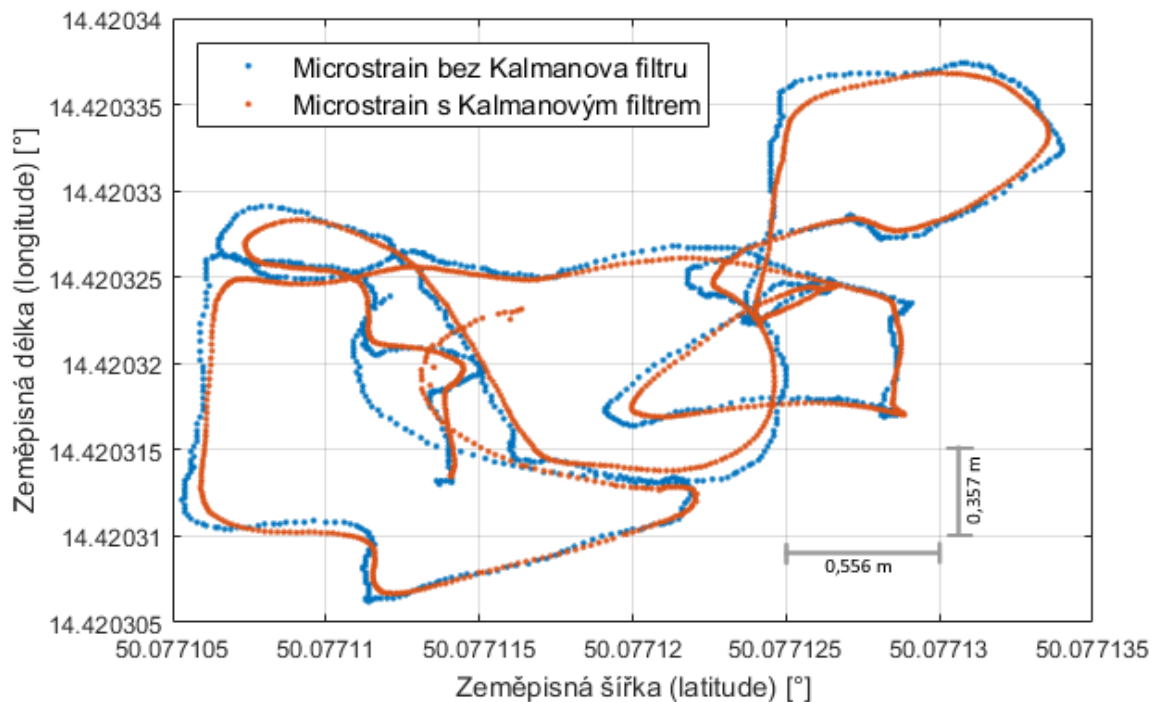
Dalším testovaným zařízením byla inerciální měřicí jednotka Microstrain 3DM-GX4-45 (obrázek 8.5), jejíž součástí je mimo jiné i GPS přijímač (modul uBlox šesté generace). Tento přijímač je schopen přijímat pouze signály z družic GPS a to jen na jedné frekvenci (tedy L1) a ze statických sítí SBAS. Jeho maximální dosažitelná frekvence je 4 Hz a uváděná přesnost je 200 cm.



Obrázek 8.5: Inerciální výpočetní jednotka Microstrain 3DM-GX4-45 [13]

Pro zlepšení přesnosti zaměřování polohy je v těchto inerciálních jednotkách integrována výpočetní jednotka s Kalmanovým filtrem. Tento filtr umožňuje korigovat údaje o poloze na základě ostatních údajů vyčítaných z inerciální jednotky (Eulerovy úhly náklonu, zrychlení, tlak, síla magnetického pole, apod.).

Rozdíl v měření s Kalmanovým filtrem a bez něj je zachycen v následujícím grafu 8.6. Je vidět, že v našem případě došlo pouze k vyhlazení trajektorie a to i přes to, že ve skutečnosti se anténa nepohybovala. To je způsobeno tím, že implementovaný filtr počítá korekce na základě dynamických změn, a tudíž při statickém měření nemá na výsledek vliv. Kdybychom chtěli aplikovat filtr pro statické měření, museli bychom implementovat statický Kalmanův filtr, který je pro taková měření uzpůsobený.



Obrázek 8.6: Graf testování Microstrain GPS modulu s a bez Kalmanova filtru

8.3 uBlox LEA-6H

GNSS přijímač uBlox LEA-6H (obrázek 8.7) patří k šesté řadě uBlox senzorů. Jeho parametry jsou velmi podobné již zmíněnému senzoru Microstrain. Též je schopen přijímat pouze signály z družic GPS a statické pozemní sítě SBAS a to pouze jednofrekvenčně. Jeho maximální frekvence je 5 Hz a uváděná přesnost 200 cm.

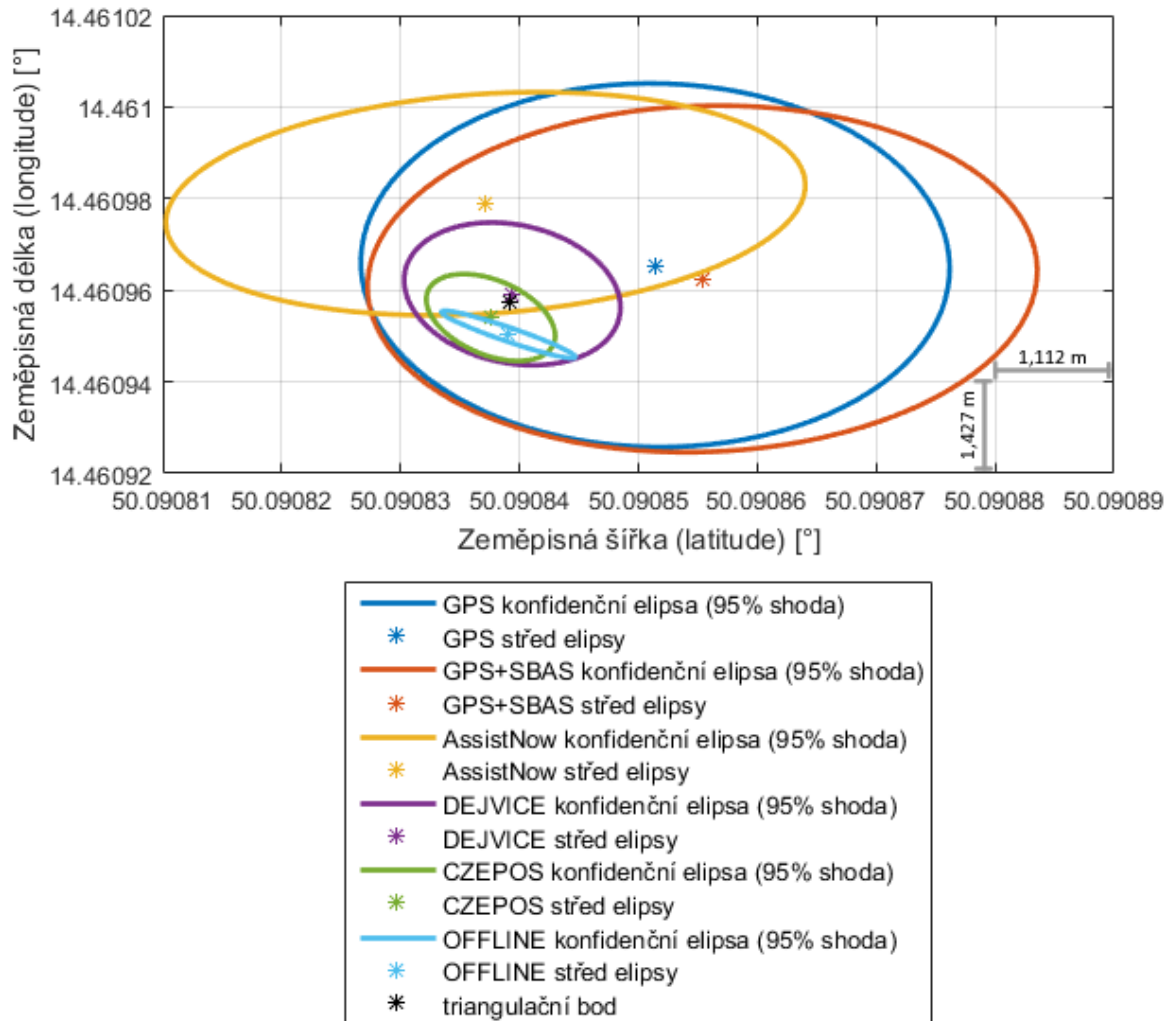


Obrázek 8.7: uBlox LEA-6H [14]

Jelikož RTKLIB je schopen od modulů uBlox přijímat a zpracovávat jejich data, je možné využít při testování i DGPS a zahrnout tím korekce z permanentní sítě. Provedli jsme diferenční měření, a to jak s korekcemi z permanentní sítě Czepos, tak s korekcemi přijímanými z přijímače v Dejvicích.

Zároveň jsme otestovali i aplikaci u-Center, která poskytuje službu tzv. *AssistNow Online*, která přes internet také poskytuje určitá korekční data. Výrobce ovšem neuvádí, odkud korekce pochází.

Poslední test byl zaměřen na post-procesové zpracování. Korekce jsme získali ze sítě Czepos ze stejného referenčního bodu jako u měření v reálném čase. Tato korekční post-procesová data jsou však již mnohem přesnější díky většímu množství doplňujících dat a dalším výpočtům. Výsledek testování modulu uBlox LEA-6H je vidět na grafu 8.8.



Obrázek 8.8: Graf testování přijímače uBlox LEA-6H

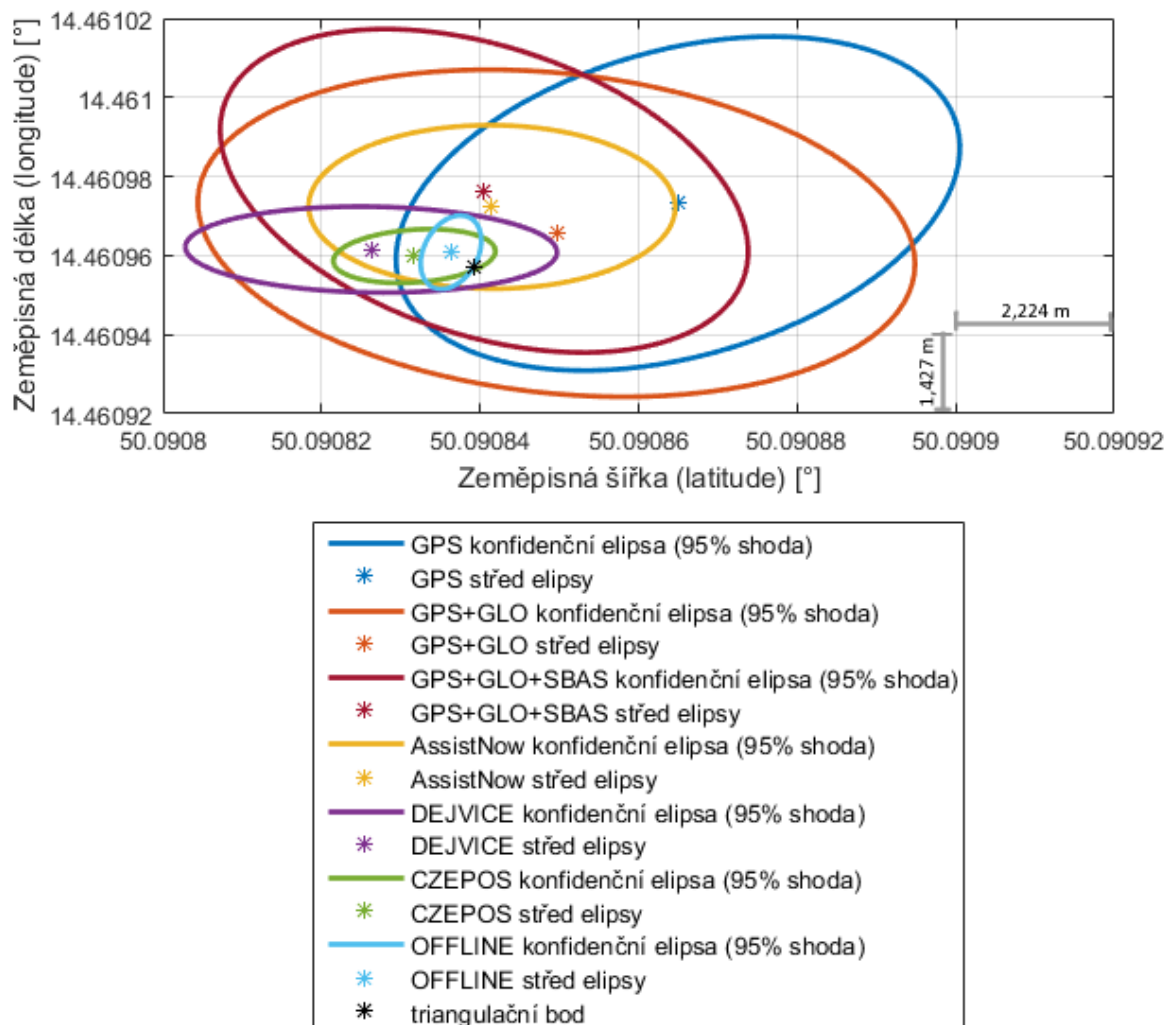
8.4 uBlox NEO-M8N

Druhým testovaným uBlox senzorem byl NEO-M8N (obrázek 8.9), který je o dvě řady novější než LEA-6H. Liší se především v tom, že kromě GPS a SBAS signálů je schopen přijímat signály i z družic Glonass, Galileo či Beidou (z nichž pouze Glonass je zatím jediný uvedený do provozu). I tento přijímač je pouze jednofrekvenční. Jeho maximální frekvence měření je 5-10 Hz (v závislosti na počtu viditelných družic) a uváděná přesnost je stejná jako u LEA-6H, tedy 200 cm.

Stejně jako u předchozího měření i zde jsme senzor připojili k počítači a tudíž jsme opět byli schopni (skrze RTKLIB) získat i diferenční korekce z obou referenčních stanic (Dejvice, Czepos) a zároveň jsme získali data i pro následné post-procesové zpracování. Přes aplikaci u-Center jsme opět otestovali i službu AssistNow. Výsledek testování modulu uBlox NEO-M8N je vidět v grafu 8.10.



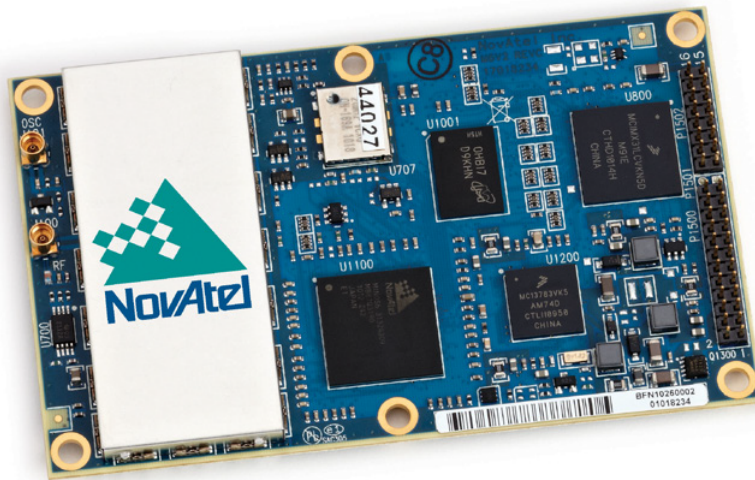
Obrázek 8.9: uBlox NEO-M8N [15]



Obrázek 8.10: Graf testování přijímače uBlox NEO-M8N

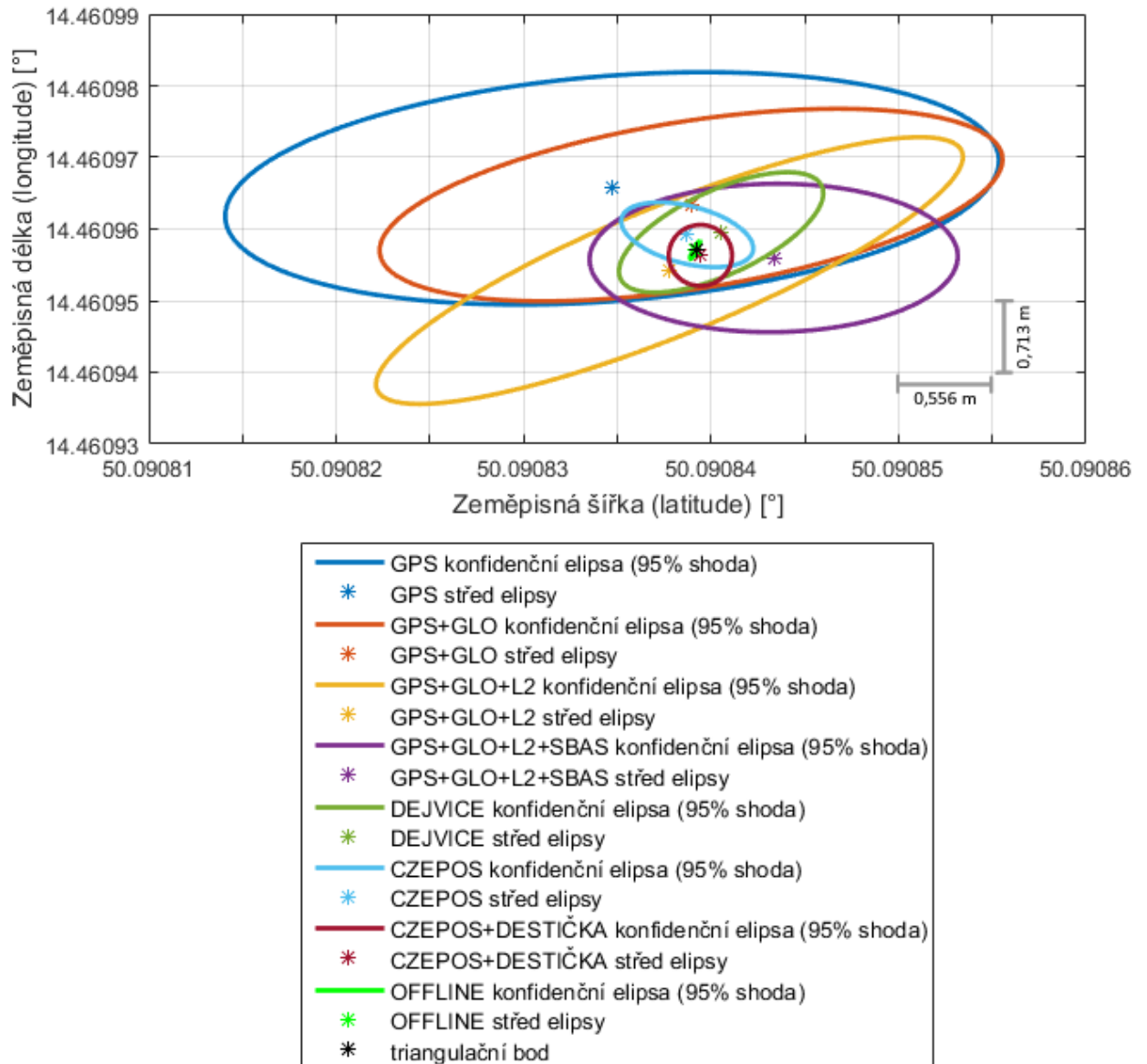
8.5 Novatel OEM628

Dalším GNSS zařízením, které jsme otestovali, je modul Novatel OEM628 (obrázek 8.11). Toto zařízení využívá fázové měření a je tudíž schopné velmi přesného RTK měření. Umožňuje přijímat signály z družic GPS, Glonass, Beidou, Galileo a SBAS. Jako jediný z testovaných přijímačů je dvoufrekvenční. Měření dosahuje frekvence až 20 Hz a udávaná přesnost měření (při použití RTK) je 1 cm.



Obrázek 8.11: Novatel OEM628 [16]

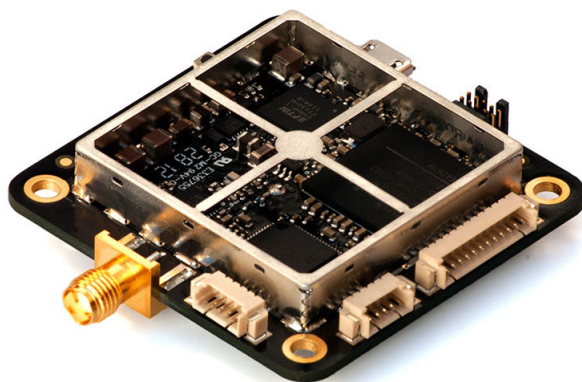
Otestovali jsme různé konfigurace toho přijímače, abychom mohli porovnat např. jedno-frekvenční a dvoufrekvenční měření. Podobně jako u modulů uBlox jsme využili knihovnu RTKLIB pro RTK měření. Modul OEM628 jsme použili jako *tzv. rover*. Pro RTK měření je však zapotřebí dvou přijímačů, a tak jsme si druhý přijímač *tzv. base* nahradili vždy některým ze statické referenční sítě pomocí internetového připojení (Czepos nebo Dejvice). Zároveň jsme opět otestovali i offline zpracování za použití zpracovaných dat ze sítě Czepos. Nakonec jsme změřili i to, zda bude příjem signálů z družic lepší, pokud pod anténu připevníme kovovou destičku o rozměrech 10x10 cm, která odráží signály. Výsledek testování modulu OEM628 je vidět v grafu 8.12.



Obrázek 8.12: Graf testování přijímače Novatel OEM628

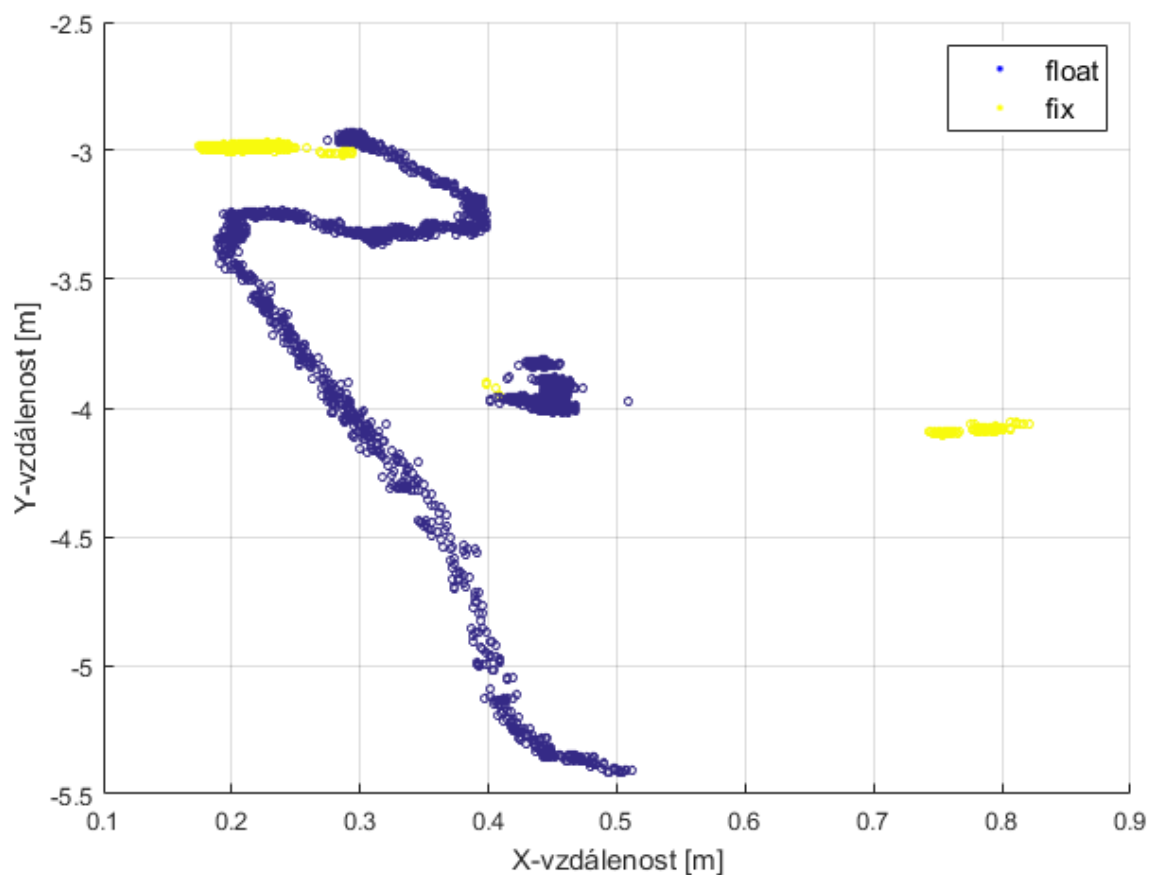
8.6 Swiftnav Piksi

Posledním testovaným zařízením je Swiftnav Piksi (obrázek 8.13). Jedná se o fázové RTK zařízení. Výrobce dodává v sadě dva Piksi moduly se dvěma rádii, přes která obě zařízení komunikují. Toto zařízení funguje jednofrekvenčně a je schopné přijímat signály z družic GPS, Glonass, Galileo a pozemní síť SBAS. Maximální frekvence měření je 50 Hz a uváděná přesnost měření (při použití RTK) je 6 cm.



Obrázek 8.13: Swiftnav Piksi [17]

Toto zařízení bohužel nejde zcela spolehlivě porovnat s ostatními přijímači, jelikož měření získáme pouze relativní vzdálenost (souřadnice x,y,z) obou zařízení. To je dáno tím, že jeden přijímač sice umístíme staticky a necháme ho posílat korekční data druhému přijímači, ale neznáme jeho přesnou polohu. Nejsme tedy schopni zasadit naměřený model do absolutních zeměpisných souřadnic. Výsledek testování modulu Swiftnav Piksi je vidět v grafu 8.14.



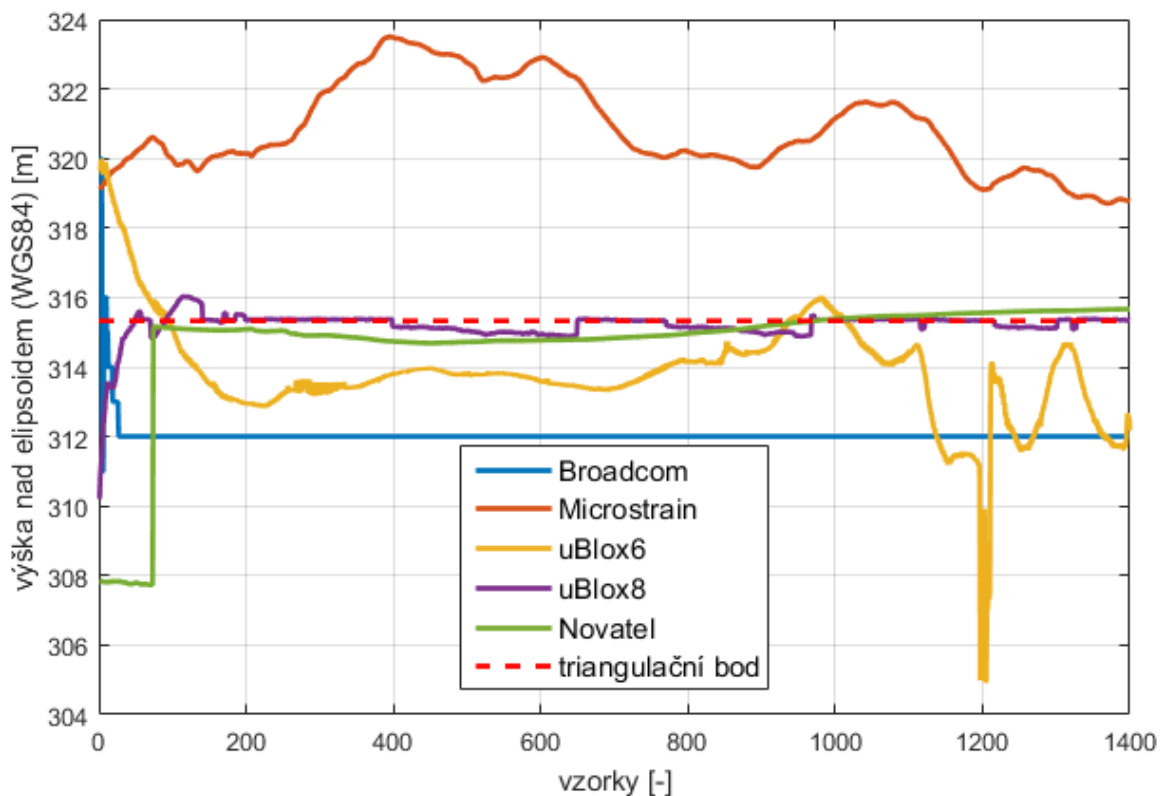
Obrázek 8.14: Graf testování přijímače Swiftnav Piksi

Zařízení byla umístěna do vzdálenosti 3 m od sebe a měření probíhalo staticky. Modrou barvou jsou v grafu vyznačené body, které jsou zaměřené s menší přesností *tzv. float* a žlutě jsou vyznačené velmi přesně zaměřené body *tzv. fix*. Jak je vidět, tak lokace u velmi přesného zaměření se v průběhu měření mění. To je způsobeno chybou firmwaru, kterou se vývojáři snaží postupně odstranit.

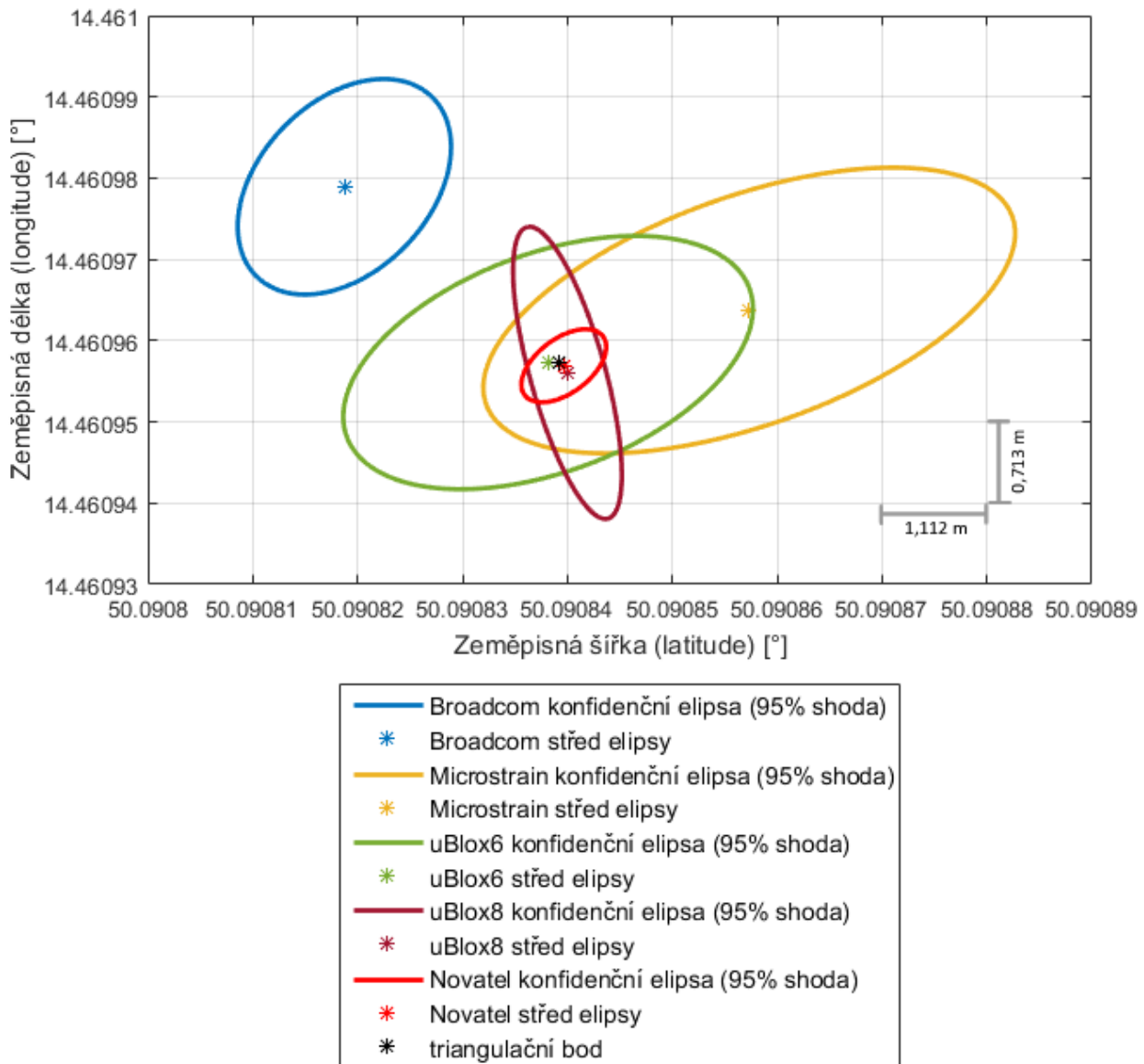
8.7 Porovnání všech přijímačů

Pro porovnání všech přijímačů jsme u každého z nich vybrali nejlepší konfiguraci pro zpracování v reálném čase a všechna zařízení jsme testovali během jednoho dne v co nejkratším časovém rozpětí. U mobilního GNSS zařízení Broadcom jsme využili funkce AGPS. U modulu Microstrain jsme měřili bez použití Kalmanova filtru, který nemá vliv na statické měření. A dále u obou zařízení uBlox a u přijímače Novatel jsme využili online korekcí ze statické sítě Czepos (DGPS nebo RTK).

Porovnání modulů v přesnosti měření výšky nad elipsoidem (WGS84) je vidět na grafu 8.15 a porovnání v přesnosti měření polohy (zeměpisné šířky a délky) je zobrazeno v grafu 8.16. Porovnání viditelnosti satelitů všech GNSS zařízení je znázorněno v grafu 8.17.



Obrázek 8.15: Graf porovnání všech GNSS zařízení v měření výšky



Obrázek 8.16: Graf porovnání všech GNSS zařízení v měření zeměpisné šířky a délky

Jak je vidět, zcela nejpřesnější modul, se kterým jsme měřili, je Novatel OEM628, který při použití RTK měření s připojením ke statické síti Czepos, má nepřesnost v měření přibližně 1 m. Kdybychom ještě dále filtrovali tato data a vykreslili jen ty, která mají status *fix*, přesnost by se zvýšila dokonce na 4-5 cm.

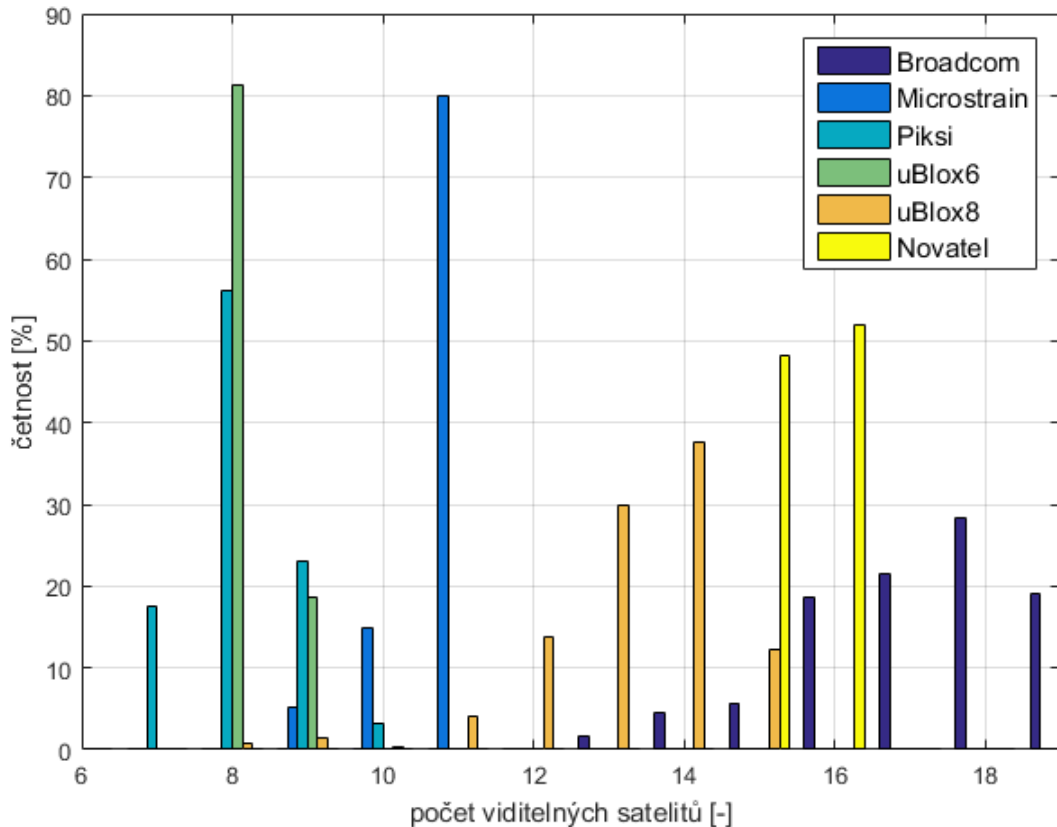
Kvůli tomu velmi záleží i na tom, kolik procent času si je zařízení schopné tato velmi přesná fixní data udržet. Celkem jsme provedli dva testy, kde jsme všechna tato zařízení testovali (18. března 2016 a 4. dubna 2016). V tabulce 8.2 je přehledně zaznamenána přesnost jednotlivých přijímačů. Procenta zde udávají část z celkového času měření, kdy zařízení měla status *single*, *float* nebo *fix*. Pokud nepoužijeme jednu z diferenčních metod (DGPS nebo RTK) bude status vždy *single*. Teprve když použijeme k měření diferenční metodu, jsme schopni získat status *float* nebo *fix*. Označení *single* nám signalizuje, že

přesnost měření je obvykle v řádu metrů. U statusu *float* už získáme přesnost několika decimetrů (přesnost větší než 1 m) a označení výsledku za *fix* značí velmi přesné zaměření v řádu centimetrů. Určení této přesnosti vyplývá ze složitých matematických výpočtů založených na tzv. řešení ambiguit (nejednoznačnosti).

	SINGLE		FLOAT		FIX	
	1.	2.	1.	2.	1.	2.
Broadcom	100 %	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Microstrain	100 %	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Piksi	0 %	0 %	42,5 %	18 %	57,5 %	82 %
uBlox6	10,5 %	1 %	86,5 %	94,5 %	3 %	4,5 %
uBlox8	1 %	0 %	98,5 %	50 %	0,5 %	50 %
Novatel	0,5 %	0,5 %	54,5 %	20,5 %	45 %	79 %

Tabulka 8.2: Přehled kvality měření u všech GNSS přijímačů

Důležitým parametrem všech testovaných modulů i je doba, za jakou je schopen získat velmi přesná řešení (*fix*). Například modul Novatel je schopen poskytnout toto fixní řešení během několika sekund. Oproti tomu modul Piksi získá fixní body až za několik minut či dokonce desítky minut. Moduly uBlox poskytnou *fix* zpravidla během několika minut.



Obrázek 8.17: Graf porovnání všech GNSS zařízení v počtu využitých satelitů

9 Využití GNSS pro malé bezpilotní prostředky

Ze statických testů vyplývá, že nejpřesnějším a nejspolehlivějším GNSS zařízením je modul Novatel OEM628 a to především při jeho post-procesovém zpracování, kdy dosahuje řádově centimetrové přesnosti a to u více jak 95 % naměřených bodů. Proto jsme tento modul vybrali pro dynamické testování. Pro porovnání jsme jako druhý modul použili uBlox NEO-M8N s Kalmanovým filtrem, který se v této konfiguraci používá v současně prodávaných komerčních bezpilotních prostředcích.

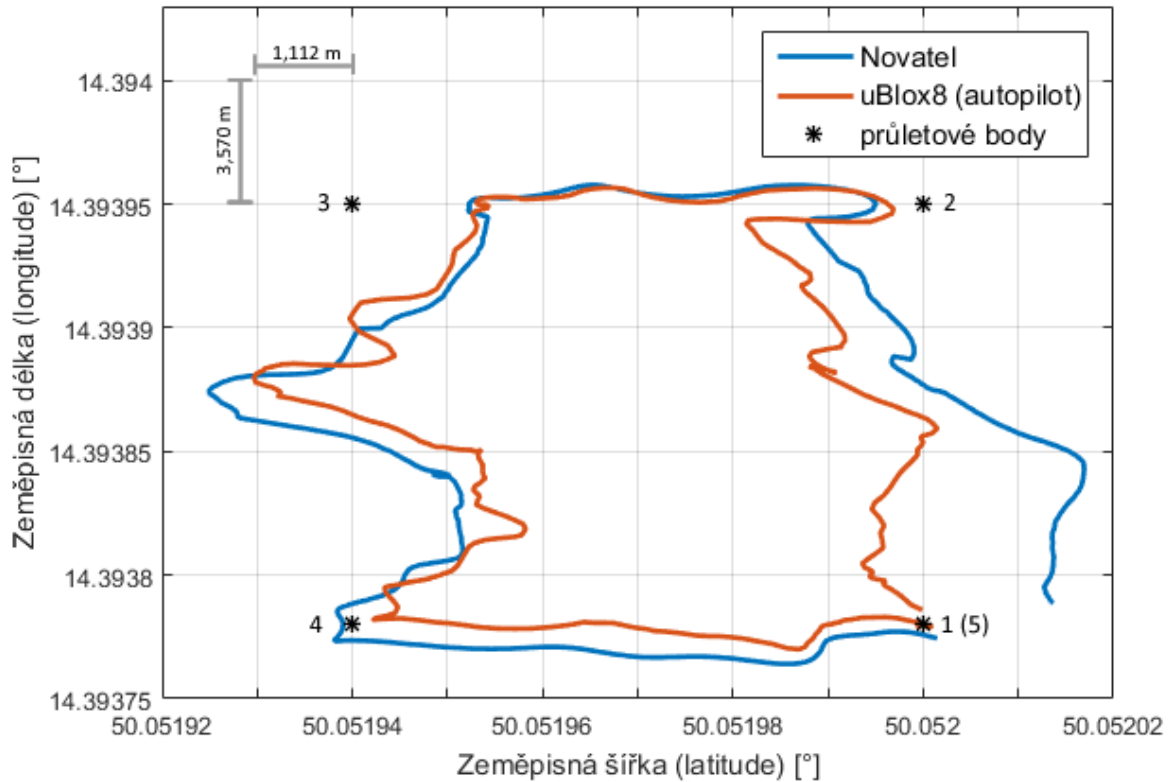
Jako bezpilotní prostředek jsme využili koaxiální hexakoptéru, na které jsme vytvořili zástavbu s oběma testovanými moduly. Přijímač uBlox byl připojený k mikrokontroléru ArduPilot, který má v sobě implementovaný Kalmanův filtr a je schopen si data z letu ukládat do své paměti. Zároveň tato data používá i jako navigační v případě použití auto-pilotního režimu. Modul Novatel byl připojený přes sériovou linku k modemu Microhard, který data bezdrátově posílal k druhému modemu, který byl přes ethernet připojený k počítači. V počítači jsme data ukládali do souboru pomocí knihovny RTKLIB. Celá zástavba hexakoptéry je vidět na obrázku 9.1.



Obrázek 9.1: Zástavba koaxiální hexakoptéry

Po vzletnutí letounu jsme řízení přepnuli do auto-pilotního režimu, aby obletěl postupně čtyři předem určené body ve tvaru obdélníku. Ke každému z těchto bodů se letoun musel přiblížit na vzdálenost menší než 1 m (určováno podle modulu uBlox).

Po letu jsme stáhli polohová data z uBlox modulu, která byla uložena v mikrokontroléru ArduPilot. Data z přijímače Novatel jsme post-procesově zpracovali v RTKLIB za použití korekčních dat ze statické referenční sítě Czepos. Výsledek a porovnání obou zařízení je vidět v grafu 9.2.



Obrázek 9.2: Graf porovnání modulu Novatel a uBlox8 při dynamickém testování

Z grafu je vidět, že se výsledná poloha těchto dvou modulů často liší o vzdálenost větší než 1 m. Pokud předpokládáme, že přesněji svou polohu zaměří modul Novatel (což vyplývá ze statických testů - viz grafy 8.12 a 8.16), pak je patrné, že modul autopilota chybně zaměřil průletový bod a došlo zde tedy k nepřesné navigaci (viz první průletový bod č.1). Tento fakt je potřeba brát v úvahu především při plánování letové trasy. Výkyvy letounu mezi průletovými body 1-2 a 3-4 byly způsobeny zhoršenými povětrnostními podmínkami.

10 Závěr

Tato práce se zabývala GNSS systémy a jejich využitím pro bezpilotní prostředky. Byly zde popsány základní principy a metody měření, struktura těchto systémů, současné družicové sítě a jejich rozšiřující systémy, parametry GNSS přijímačů a faktory ovlivňující přesnost měření.

K vypracování byly využity některé technologie, infrastruktury a prostředky, jako např. RTK měření, NTRIP protokol, česká statická síť referenčních stanic Czepos, síť triangulačních a nivelačních bodů a knihovna RTKLIB.

Velkou část této práce byla věnována především statickému testování vybraných GNSS modulů. Celkem bylo otestováno šest přijímačů s odlišnými parametry a v různých konfiguracích. Bylo zjištěno, že nejpřesnějším testovaným modulem je Novatel OEM628 a zcela nejpřesnější metodou měření je post-procesové zpracování s korekcemi ze statické sítě Czepos.

V poslední části práce byl použit modul, který je běžně používán v současných komerčních bezpilotních prostředcích, tedy uBlox NEO-M8N s Kalmanovým filtrem, a porovnán v dynamickém testu s modulem, který byl podle statických testů nejpřesnější, tedy Novatel OEM628 s post-procesovými korekcemi. K tomu byla využita koaxiální hexakoptéra v autopilotním režimu. Z výsledků bylo zjištěno, že autopilotní navigace může být ve skutečnosti o více jak 1 m nepřesnější, což je potřeba brát v úvahu při plánování trasy letu.

Z ověřené přesnosti testovaných modulů vyplývá vhodnost jejich použití pro různé aplikace. Pro mapování terénu, kde je kladen velký důraz na přesnost, je vhodné použít více-frekvenční přijímač založený na fázovém měření (např. námi testovaný modul Novatel) společně s post-procesovými korekcemi z některé ze statických sítí GBAS. Cena dvou-frekvenčního fázového přijímače společně s dvou-frekvenční anténou se pohybuje okolo 200 tis. Kč.

Naopak pro monitorování prostoru, kde není kladen takový důraz na přesnost jako spíše na zpracování v reálném čase, je vhodné použít přijímač který je schopen zpracovávat diferenční korekce online (např. modul uBlox8) v použití společně s RTKLIB knihovnou. Cena jednofrekvenčního modulu založeného na kódovém měření se pohybuje v řádu tisíců korun.

Testovaný modul Pixsi je stejně jako modul Novatel založený na fázovém měření. Má tedy předpoklad pro schopnost velmi přesného měření. Jeho použití pro bezpilotní prostředky však není vhodné z důvodu chybějící možnosti absolutního měření polohy, nespolehlivosti současného firmwaru a především kvůli dlouhé době inicializace, která trvá zpravidla okolo 15-20 minut.

Testované moduly Microstrain a uBlox6 nejsou samy o sobě vhodné pro navigaci či lokalizaci bezpilotních prostředků a to především z důvodu velmi malé přesnosti. Jejich přesnost se pohybuje okolo 2-5 m. Lze ji však zvýšit při použití inerciální jednotky a Kalmanova filtru.

Poslední modul Broadcom používaný v mobilních telefonech nelze použít pro přesnou lokalizaci. Jeho nepřesnost dosahuje 3-10 m.

Pro budoucí práci je zde velký potenciál v detailnějším dynamickém testování, které by určilo absolutní přesnost měření polohy GNSS modulů v pohybu. K tomu je potřeba sestavit speciální testovací zařízení (např. kolejnice s přesně zaměřenými polohovými body). Lze se také soustředit na různé typy GNSS antén a jejich umístění.

Literatura

- [1] *Globální družicový polohový systém*, <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=GNSS&redirect=no>
- [2] RAPLANT, Petr. *Družicové polohové systémy*, VŠB - TU Ostrava, 2002, 200 s., ISBN:80-248-0124-8, http://gis.vsb.cz/vojtek/content/gnps/files/_source/RAP02.pdf
- [3] H.DANA, Peter. *The Geographer's Craft Project*, Department of Geography, The University of Colorado at Boulder, http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html
- [4] *Satellite navigation*, https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_navigation
- [5] *SBAS Systems*, European Space Agency – navipedia, http://www.navipedia.net/index.php/SBAS_Systems
- [6] POPUGAEV, Alexander. *GNSS Antena*, Fraunhofer IIS, <http://www.iis.fraunhofer.de/en/ff/kom/leist/ergebnisse/gnssa.html>
- [7] KUMAR, G. Sateesh a BHUSHANA RAO, G. Sasi. *GPS Signal Short-Term Propagation Characteristics Modeling in Urban Areas for Precise Navigation Applications*, Department of ECE, Aditya Institute of Technology and Management, Department of ECE, Andhra University, 2013, http://file.scirp.org/Html/7-8501064_31523.htm
- [8] *Czepos*, <http://czepos.cuzk.cz/>
- [9] *NTRIP Component Names*, <http://lefebure.com/articles/ntrip-names/>
- [10] *Databáze bodových polí*, <http://bodovapole.cuzk.cz/>
- [11] TAKASU, Tomoji. *RTKLIB manual*, 2013, 181 s., http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf
- [12] *Samsung Galaxy S5 Teardown*, <http://www.techinsights.com/teardown.com/samsung-galaxy-S5-teardown/>
- [13] *LORD Microstrain GX4 Inertial Sensors*, <https://www.technimeasure.co.uk/lord-microstrain-gx4-inertial-sensors/>
- [14] *GPS Modules*, <https://pixhawk.org/peripherals/sensors/gps>

- [15] *uBlox Neo-M8N*, <http://www.banggood.com/NEO-M8N-Flight-Controller-GPS-Module-GYGPSV5-NEO-for-Pixhawk-APM-p-974362.html>
- [16] *Novatel OEM628*, <http://www.gpscom.ru/catalog.aspx?id=83&lang=eng>
- [17] *Introducing Piksi*, <https://www.swiftnav.com/piksi.html>
- [18] LÁSKA, Zdeněk, TEŠNAR, Martin, SLABÝ, Jaroslav a SUKUP, Jan. *Globální navigační satelitní systémy a jejich využití v praxi*, VUT v Brně, 2010, 67 s., učební texty k semináři, http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_08_1009.pdf
- [19] TRUHLÁŘ, Luboš. *Vývoj NTRIP casteru*, Diplomová práce, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2012, 76 s., <http://geo.fsv.cvut.cz/proj/dp/2013/lubos-truhlar-dp-2013.pdf>
- [20] ŘÍHA, Jan. *Moderní přístrojová technika*, Přírodovědecká fakulta UK v Praze, 2014, 74 s., <http://spszem.cz/storage/files/1364/Moderni-pristrojova-technika-TS-Niv-LS.pdf>
- [21] ČÁBELKA, Miroslav. *Úvod do GPS*, CITT Praha Akademie kosmických technologií, 2008, 21 s., https://www.natur.cuni.cz/geografie/geoinformatika-kartografie/ke-stazeni/vyuka/gps/skriptum-uvod-do-gps?student_welcome=1
- [22] SCHENK, Jan. *Geodetické sítě - Bodová pole*, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2004, 18 s., učební text, <http://igdm.vsb.cz/igdm/materialy/geosite.pdf>