

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ
PROGRAM GEODÉZIE A KARTOGRAFIE
OBOR INŽENÝRSKÁ GEODÉZIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE
NÁVRH AUTONOMNÍHO SENSORU POLOHY
A DRUHOTNÉHO URČENÍ PARAMETRŮ ATMOSFÉRY
S VYUŽITÍM LOW-COST GNSS PŘIJÍMAČE

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Vyskočil, Ph.D.
Katedra geomatiky

červen 2022

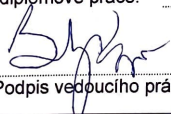
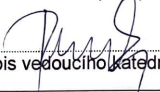
Bc. Lukáš BĚLOCH

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE


Příjmení: Běloch	Jméno: Lukáš	Osobní číslo: 477134
Zadávající katedra: K155 - Katedra geomatiky		
Studijní program: geodézie a kartografie		
Studijní obor: inženýrská geodézie		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Návrh autonomního senzoru polohy a druhotného určení parametrů atmosféry s využitím low-cost GNSS přijímače	
Název diplomové práce anglicky: Design of autonomous position and secondary estimation of atmospheric parameters sensor with the use of low-cost GNSS	
Pokyny pro vypracování: 1. Návrh technologického řešení senzoru s možností vzdáleného přenosu dat 2. Realizace prototypu návrhu 3. Testování 4. Analýza a zpracování naměřených dat	
Seznam doporučené literatury:	
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Zdeněk Vyskočil, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: 9.2.2022	Termín odevzdání DP v IS KOS: 15.5.2022 <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</small>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

Datum převzetí zadání	 Podpis studenta(ky)
-----------------------	---

ABSTRAKT

Tato práce se věnuje návrhu a realizaci Low-cost GNSS zařízení pro autonomní sledování polohy a určení parametrů atmosféry. Úvodní část se zabývá samotnou technologií GNSS, popisem komunikačních protokolů a návrhem GNSS zařízení. Praktická část je zaměřena na realizaci GNSS zařízení a konfiguraci jednotlivých částí a komponent.

Na závěr se tato práce zabývá testováním GNSS sestav a zpracováním měřených dat.

KLÍČOVÁ SLOVA

GNSS, NTRIP, NMEA, RTCM, U-Blox, Raspberry Pi, G-Nut, Nízkonákladový přijímač

ABSTRACT

This thesis is dedicated to design and implement Low-cost GNSS device for autonomous position monitoring and for determining parameters of the atmosphere. The first part deals with a GNSS technology, description of communication protocols and design of GNSS device. The practical part is focused to implement of GNSS device and to configuration of parts and components. At last concerns the thesis deals with testing of GNSS devices and with processing of measured data.

KEYWORDS

GNSS, NTRIP, NMEA, RTCM, U-Blox, Raspberry Pi, G-Nut, Low-cost receiver

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma „Návrh autonomního sensoru polohy a druhotného určení parametrů atmosféry s využitím low-cost GNSS přijímače“ jsem vypracoval samostatně. Použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v seznamu zdrojů.

V Praze dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat Ing. Zdeňku Vyskočilovi, Ph.D. za vedení mé práce a vstřícný přístup, který umožnil dokončení této práce. Dále bych rád poděkoval GNSS týmu z GOP, především Ing. Janu Doušovi, Ph.D. za skvělé téma a nápady při zpracování a Ing. Michaelovi Kalovi za spolupráci při řešení.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za podporu a pochopení, které mi bylo poskytnuto nejen při psaní této práce, ale i při celém studiu.

Obsah

1	Cíle práce	13
2	Rešerše	14
3	Technologie GNSS	15
3.1	Globální navigační satelitní systémy - GNSS	15
3.1.1	Kosmický segment	16
3.1.2	Kontrolní a řídicí segment	17
3.1.3	Uživatelský segment	17
3.2	GNSS signál	19
3.3	GNSS observace	19
3.4	Vlivy působící na přesnost měření	20
3.5	Metody zpracování GNSS měření	23
4	Komunikační protokoly a formáty	25
4.1	Transportní komunikační protokoly	25
4.1.1	TCP	25
4.1.2	NTRIP	25
4.1.3	FTP	26
4.2	Komunikační formáty streamované	27
4.2.1	NMEA	27
4.2.2	RTCM	34
4.2.3	UBX	35
4.3	Výměnné formáty souborové	36
4.3.1	RINEX	36
5	Návrh technologického řešení senzoru	38
5.1	Hardware	38
5.1.1	Přijímače	38
5.1.2	Antény	41
5.1.3	Minipočítače	43
5.1.4	Ostatní součástky	45
5.2	Software	46

5.2.1	G-NUT software	46
5.2.2	Aplikace GNSS-logger	47
5.2.3	Knihovna RTKLIB	47
5.3	Možné verze senzoru	48
5.3.1	Use case 1 - Vytyčení bodu, sběr dat, přesná navigace	48
5.3.2	Use case 2 - Sledování vzdáleného pohybujícího se objektu	49
5.3.3	Use case 3 - Určování parametrů atmosféry	50
5.3.4	Use case 4 - Dlouhodobé sledování posunů povrchu	51
6	Realizace prototypu návrhu	54
6.1	Základní zapojení komponent	54
6.2	Nastavení přijímače	54
6.2.1	U-blox	54
6.2.2	Septentrio	57
6.3	Konfigurace minipočítače z řady Raspberry Pi	58
6.4	Řešení s využitím G-NUT software	59
6.5	Řešení s využitím aplikace GNSS-logger	60
7	Testování	61
7.1	Test funkčnosti zařízení	61
7.2	Test kvality dat	62
7.3	Test pokročilých funkcí	63
8	Analýza a zpracování dat	66
8.1	Časové zpoždění příchozích dat	66
8.2	Parametry kvality dat	67
8.2.1	Porovnání GOPB a GOPC	68
8.2.2	Porovnání GOPB a GOPS	68
8.2.3	Porovnání GOPB a GOPE	68
8.3	Parametry troposféry	70
8.4	Poloha a její přesnost	71
	Seznam zkratk	74
	Literatura	76

A Seznam příloh	82
A.1 Elektronické přílohy	82

Seznam obrázků

3.1	GNSS/RNSS družice v provozu v závislosti na roce a systému od roku 1978 do 2020, autor: Prof. Dr. Thomas Purfürst [17]	17
3.2	GNSS frekvence, zdroj: [35]	19
3.3	Obecné rozdělení metod určování polohy pomocí GNSS, zdroj: [1]	24
4.1	Talker-listener schéma, autor: Lukáš Běloch	27
4.2	Schéma struktury UBX, autor: Lukáš Běloch	35
5.1	SparkFun - ZED-F9P, zdroj: [60]	39
5.2	simpleRTK2B-F9P V3, zdroj: [57]	39
5.3	C099-F9P Application Board, zdroj: [33]	40
5.4	simpleRTK3B Pro, zdroj: [58]	41
5.5	ANN-MB-00, zdroj: [30]	42
5.6	ANT2B-SUR, zdroj: [31]	42
5.7	TOP106, zdroj: [63]	43
5.8	Srovnání Raspberry Pi Zero a Raspberry Pi B, autor: Lukáš Běloch	43
5.9	Moduly Xbee, zdroj: [66]	45
6.1	Schéma zapojení, SW Fritzing, autor: Lukáš Běloch	54
6.2	U-center - ovládací lišta, autor: Lukáš Běloch	55
6.3	U-center - pokročilé nastavení, autor: Lukáš Běloch	56
6.4	Septentrio - náhled webové aplikace	57
6.5	RxTool - náhled aplikace	58
6.6	Schéma řešení - G-Nut, autor: Lukáš Běloch	59
7.1	Test 7.2 - umístění antén, autor: Lukáš Běloch	63
8.1	Časové zpoždění příchozích dat	66
8.2	Zobrazení indikátorů kvality stanic	67
8.3	GOPB, GOPE: Skyplot - SNR	69
8.4	QC - GOPB (GPS, GLO, GAL)	70
8.5	Parametry troposféry - ZTD	70

Seznam tabulek

4.1	Zpráva NMEA	27
4.2	NMEA příkaz	28
4.3	Indetifikátor vysílače	28
4.4	NMEA zpráva - GGA věta	29
4.5	Popis částí GGA věty	29
4.6	NMEA zpráva - GST věta	29
4.7	Popis částí GST věty	30
4.8	NMEA zpráva - GSA věta	30
4.9	Popis částí GSA věty	30
4.10	NMEA zpráva - GLL věta	31
4.11	Popis částí GLL věty	31
4.12	NMEA zpráva - GSV věta	31
4.13	Popis částí GSV věty	32
4.14	NMEA zpráva - RMS věta	32
4.15	Popis částí RCM věty	33
4.16	NMEA zpráva - ZDA věta	33
4.17	Popis částí ZDA věty	33
4.18	Typy RTCM vět	34
4.19	Popis schématu struktury UBX	35
4.20	Druhy UBX zpráv	35
4.21	Pojmenování souboru - RINEX verze 2.11	36
4.22	Pojmenování souboru - RINEX verze 3.04	37
5.1	Specifikace modulu ZED-F9P	38
5.2	Specifikace SparkFun - ZED-F9P	38
5.3	Specifikace simpleRTK2B-F9P V3	39
5.4	Specifikace C099-F9P Application Board	40
5.5	Specifikace modulu mosaic-X5	40
5.6	Specifikace simpleRTK3B Pro	41
5.7	Specifikace ANN-MB-00	41
5.8	Specifikace ANT2B-SUR	42
5.9	Specifikace TOP106	43

5.10	Specifikace Raspberry Pi Zero W	44
5.11	Specifikace Raspberry Pi Zero 2 W	44
5.12	Specifikace Raspberry Pi 4 Model B - 2GB RAM	45
7.1	Parametry testu 7.1	61
7.2	Parametry testu 7.2	62
7.3	Parametry testu 7.3	64
8.1	Poloha stanice GOPC	71
8.2	Poloha stanice GOPB	71
8.3	Poloha stanice GOPS	72
8.4	Poloha stanice GOPD	72
8.5	Poloha stanice GOPE	72

Úvod

Technologie GNSS, umožňující určení pozice na Zemi pomocí signálů z družic obíhajících Zemi, již dávno není otázkou pouze armády. Od přelomu tisíciletí se stále častěji uplatňuje v civilním sektoru. Základní využití nachází v navigaci automobilové, lodní a letecké dopravy, pro lokalizaci zvířat a sledování pohybu vozidel. Mezi pokročilejší aplikace, kde je vyžadovaná větší přesnost, můžeme řadit geodetické měření a vytyčování bodů, určování pohybů tektonických desek nebo řízení autonomních vozidel, například v zemědělství.

Do budoucna má technologie GNSS potenciál uplatnit se ve velkém množství aplikací, kde zatím není plně využita. Zásadní překážkou jsou vysoké pořizovací náklady. Cena profesionální GNSS sestavy pro přesnější měření se pohybuje v řádu několika desítek tisíc korun. Tento aspekt ovlivňuje pořízení GNSS zařízení tam, kde lze pozorovanou hodnotu zjistit i jiným, levnějším způsobem. Také pokud vytváříme síť autonomních pozorovacích GNSS stanic, její cena bude vysoká nebo síť nebude dostatečně hustá.

Zde se na scénu dostává uplatnění Low-cost GNSS zařízení.

1 Cíle práce

Cílem práce je vytvoření návrhu a realizace Low-cost GNSS zařízení pro účely určení polohy a parametrů atmosféry. Nedílnou součástí bude i hodnocení kvality dat a přesnosti polohy.

V návrhu bude pracováno s vícero různými komponentami a bude jednoduše popsána i jejich konfigurace.

V neposlední řadě by tato práce měla otestovat možnost užití různých softwarů pro Low-cost aplikaci a vytvořit základní přehled k budoucím, složitějším Low-cost GNSS projektům.

2 Rešerše

Tématu sestavení Low-cost GNSS zařízení se věnuje diplomová práce "Vývoj nízkonákladového GNSS zařízení" [21]. V této práci byl použit a testován přijímač s modulem NEO-M8P-2 propojený s deskou Arduino. Testování přesnosti polohy zařízení bylo prováděno metodou RTK s použitím dvou antén umístěných na bodech o známých souřadnicích.

Obdobným tématem se zabývá diplomová práce "Testování GNSS modulu UBLOX 9. generace" [9]. Zde byl testován přijímač s modulem ZED-F9P propojený s deskou Arduino. V této práci byla použita statická metoda měření i metoda RTK. Poloha nízkonákladového GNSS zařízení určena metodou RTK byla porovnána s polohou určenou profesionální GNSS sestavou.

Článek "Ublox F9P for geodetic measurement" [3] se zabývá sestavením a testováním Low-cost GNSS zařízení pro účely výuky geodézie a geoinformatiky. V tomto projektu byl užit modul ZED-F9P propojený s deskou Arduino a zároveň i s počítačem Raspberry Pi. Testována byla statická metoda měření a metoda RTK.

Určení parametrů troposféry ze sítě stanic je popsáno v článku "European GNSS troposphere monitoring for meteorological applications" [5] Zde je věnována pozornost určení parametrů troposféry a softwaru, který toto umožňuje. V závěru článku je demonstrován příklad využití této aplikace.

3 Technologie GNSS

Technologie GNSS určování polohy je známa snad stejnému množství populace jako internet. Díky prvnímu funkčnímu globálnímu systému NAVSTAR GPS, umožňující tento způsob určení pozice, je častěji označována jako technologie GPS, což na vlastním principu nic nemění. V této kapitole budou vysvětleny základní principy technologie, vlivy na její přesnost a segmenty umožňující její používání.

3.1 Globální navigační satelitní systémy - GNSS

Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí vysvětluje pojem GNSS jako souhrnný termín užívaný k obecnému označení globálních družicových systémů. [62]

Mezi tyto systémy patří zejména:

- **The Global Positioning System (GPS)**

Americká služba, která poskytuje služby určování polohy, navigace a času. Tento projekt je dnes vyvíjen a spravován U.S. Space Force a započal již v roce 1973 (plně funkční od roku 1995). [41] [42]

- **Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS)**

Služba, v současné době spadající pod Ruskou Federaci, započala svou existenci v Sovětském svazu v roce 1982 vypuštěním satelitu Kosmos-1413. V roce 1995 byla služba plně funkční, avšak kvůli omezení financí pro vesmírný průmysl došlo k úpadku a systém se před začátkem obnovy v roce 2002 nedal prakticky využívat ani na území Ruska. [38]

- **Galileo**

Galileo je evropský, civilní systém, který nabízí lepší polohovou přesnost (pro otevřené služby) než ostatní systémy. První testovací družice byla vypuštěna v roce 2005, hlavním cílem této mise bylo získat frekvence přidělené Mezinárodní telekomunikační unií (ITU). První dvě družice samotného systému byly vypuštěny až v roce 2011. Ačkoliv ještě nedosáhl plného počtu družic kosmického segmentu, od roku 2019 poskytuje základní služby v plně funkčním režimu. [37]

- **BeiDou Navigation Satellite System (BDS)**

Vývoj čínského družicového systému sahá do roku 2000, kdy byl zprovozněn systém BDS-1, sloužící pro poskytování regionálních služeb pro Čínu. V roce 2020 byla dokončena výstavba BDS-3, kterou lze již řadit mezi GNSS. [32]

Všechny tyto systémy svým signálem pokrývají celou planetu a je možné je v různých kombinacích používat současně, mluvíme tak o multi-GNSS.

Díky většímu množství družic a signálů na různých frekvencích lze určit polohu s větší přesností, měřit v zastavěných oblastech, minimalizovat multipath a lépe určovat zpoždění signálu (chyba troposféry a ionosféry). [17]

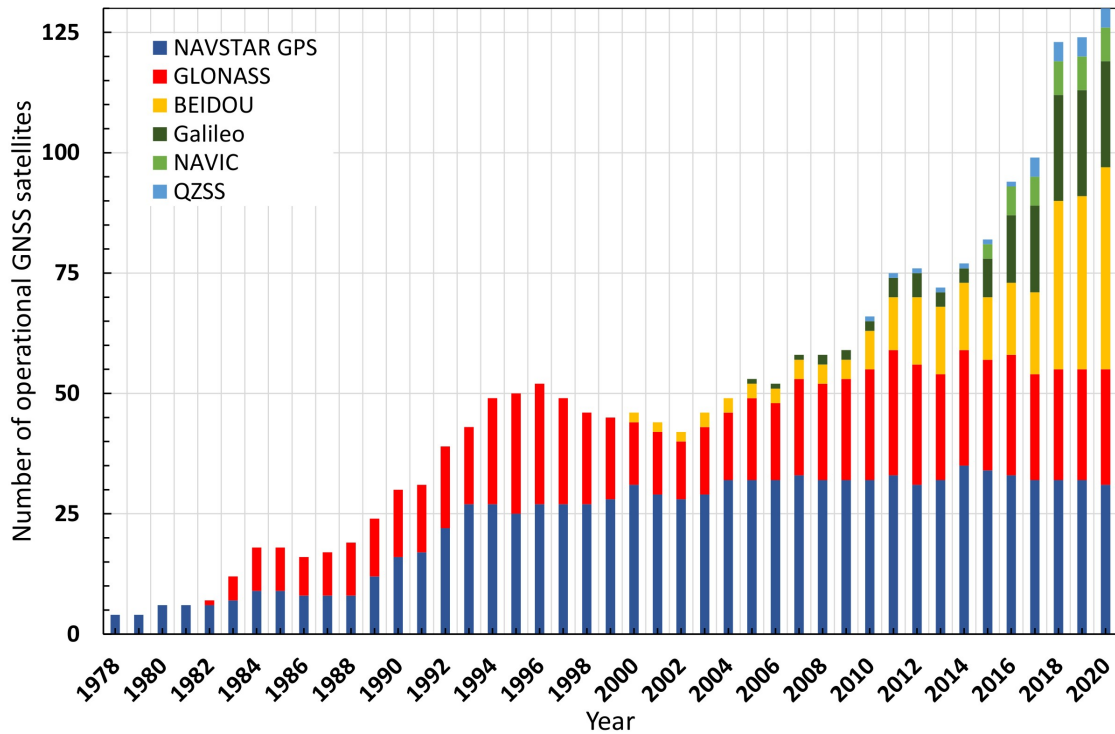
Z předchozí věty vyplývá, že systémy mají totožný způsob fungování (kap. 3.3). Navíc i jejich struktura a rozdělení do segmentů je velice podobná.

3.1.1 Kosmický segment

Základním prvkem GNSS je konstelace družic. Družice obíhají po několika oběžných drahách kolem země (MEO, GEO) s určitým sklonem. Volba těchto parametrů závisí na:

- plánovaném území pokrývaném službou
- koncová přesnost polohy uživatele
- dostupnost družic (dostatek viditelných družic pro výpočet polohy)
- vlastnosti družic (velikost, hmotnost, náklady na rozmístění a údržbu)

GNSS družice vysílají na nosných frekvencích dálkoměrné signály a navigační zprávu. Kromě částí nutných k provozu, jako jsou pohonné systémy, palubní počítač a solární panely, obsahují velmi přesné atomové hodiny, přijímač, vysílač a některé i koutový odražeč (pro určení přesných drah). [7] [22] [34]



Obrázek 3.1: GNSS/RNSS družice v provozu v závislosti na roce a systému od roku 1978 do 2020, autor: Prof. Dr. Thomas Purfürst [17]

3.1.2 Kontrolní a řídicí segment

Kontrolní a řídicí segment se většinou skládá z pozemních monitorovacích stanic, řídicích center a nahrávacích stanic (antén). Segment je zodpovědný za:

- údržbu systému
- provoz služeb
- sledování družic za účelem určení:
 - přesných efemerid
 - parametrů chodu hodin
 - parametrů atmosféry
- zaslání korekcí dráhy a navigačních zpráv (palubních efemeridů) [7] [34]

3.1.3 Uživatelský segment

Uživatelský segment lze rozdělit na vojenský (potřeba autorizace) a civilní (volně dostupný). Segment je tvořen různorodými GNSS přístroji složených minimálně z antény a přijímače.

- **Anténa** je první část GNSS zařízení, která zpracovává přijímaný signál z družic. GNSS anténa je určena pouze k přijímání signálu, slouží k přeměně energie elektromagnetických vln na elektrickou energii. [65].

Mezi důležité vlastnosti patří schopnost zpracovávat frekvence používaných GNSS signálů (1.1-1.6GHz), co nejvíce eliminovat multipath, rušivé signály, signály přicházející pod nízkým elevačním úhlem a měla by mít i dobrý poměr polarizace os. Anténa GNSS zařízení stejně tak jako anténa družice mají pravo-otočivou kruhovou polarizaci (right-hand circular polarization - RHCP). Ovšem při odrazu signálu od libovolného objektu (multipath) může dojít k změně na LHCP (left-hand circular polarization). Tyto nechtěné signály by měla anténa maximálně potlačovat. [18]

Výsledek zpracování GNSS je vztažen zpravidla k tzv. Referenčnímu bodu antény (ARP), který je často umístěn v horizontálním středu spodní části antény. Skutečné měření však probíhá v pomyslném bodě, který není identický s ARP a nazývá se Fázové centrum antény (APC).

Vzdálenost fázového centra od ARP je pro každou anténu jiná, a navíc se mění v závislosti na azimutu, výškovém úhlu dopadu a intenzitě přijímaného signálu. Tato změna polohy se označuje jako variace fázového centra (PCV). V mnoha případech je znalost fázového centra nutností, proto se provádí kalibrace antén.[13] [14]

- **Přijímač** GNSS zařízení má za primární úkol přijímaný signál filtrovat, převést z analogové podoby na digitální, demodulovat a extrahovat z něj pseudovzdálenosti, fázi nosné vlny, Dopplerovu frekvenci a navigační data.

Princip samotného fungování přijímače není pro tuto práci relevantní a je popsán například v přednášce "Acquisition strategies of GNSS receiver" [11] nebo přednášce "GNSS signály a přijímač" [8].

Důležitým parametrem u přijímačů je čas od zapnutí přístroje po první získanou polohu GNSS zařízení požadované přesnosti, tzv. Time To First Fix (TTFF). Režimy spuštění rozdělujeme na:

- **Cold (studený) start**

Přijímač nemá žádné informace (byl třeba dlouhou dobu vypnut) a musí si je znovu získat (především almanach) což je časově náročné.

– **Hot/Warm (Horký/Teplý) start**

Přijímač má uloženou přibližnou polohu, korekci hodin a almanach s předchozího spuštění. TTFF je zde poměrně krátký. [8] [11]

Přijímače můžeme rozdělit podle:

– **přijímaných frekvencí**

jednofrekvenční, dvoufrekvenční a více frekvenční

– **počtu kanálů**

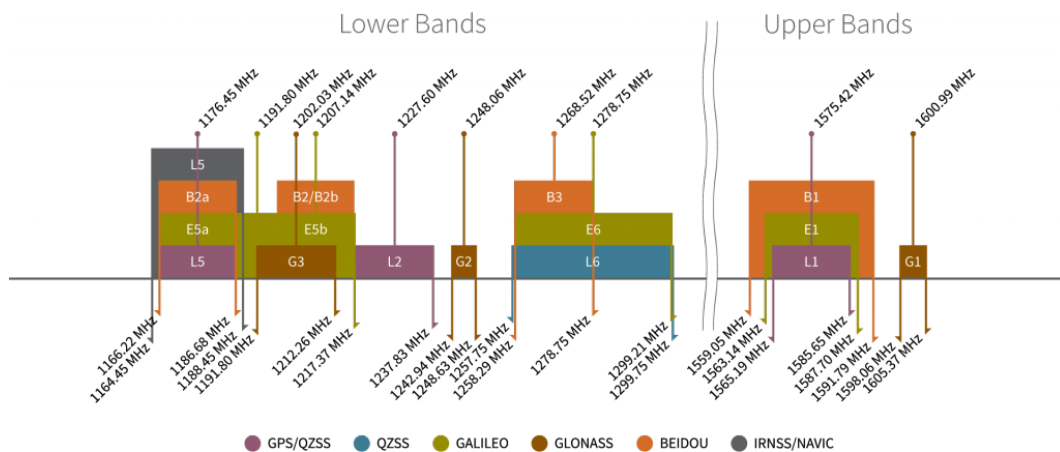
jednokanálové a vícekanálové

– **přijímaných systémů**

GPS, GLONASS, Galileo, BDS [25]

3.2 GNSS signál

Pro určení tranzitního času mezi družicemi a přijímačem se využívá modulace nosných vln pseudonáhodným kódem (PRN) a navigační zprávou. Frekvence nosných vln se pohybují mezi 1100 MHz a 1600 MHz, viz Obr 3.2 . Bylo tak zvoleno, protože tyto frekvence zajišťují dobrý průchod atmosférou a dostatečnou přesnost.



Obrázek 3.2: GNSS frekvence, zdroj: [35]

3.3 GNSS observace

Samotná délka observace na konkrétním bodě závisí na přístupu. Volíme mezi statickými metodami, kdy observace trvá jednotky minut, hodiny, ale i déle a kinematickými metodami, které určují polohu z několikasekundových observací. Observační měření můžeme rozdělit na:

1. Kódové měření

Základní a nejjednodušejí představitelný typ GNSS měření spočívá v určení rozdílů času vyslaného a přijímaného. Tento údaj lze získat ze sledování PRN kódu z družice a porovnáním s kopií PRN kódu generovaný přijímačem.

Při znalosti rychlosti šíření elektromagnetického záření lze dopočítat vzdálenost mezi družicí a přijímačem. Jelikož tato délka obsahuje několik chyb, včetně chyb hodin (viz. kapitola 3.4) označuje se jako **pseudovzdálenost**.

2. Fázové měření

Jedná se o přesnější metodu. V tomto případě je určován fázový posun nosné vlny, který dokážeme velice dobře určit. Problém nastává s počtem ambiguit (počet celých vln). Počáteční fázové ambiguitity pro jednotlivé družice je třeba určovat spolu s neznámými parametry souřadnic přijímače a korekcí hodin na přijímači a jako prvotní odhad pro výpočet se použije pseudovzdálenost.

3. Dopplerovské měření

Jelikož se družice a přijímač vůči sobě vzájemně pohybují, vlivem Dopplerova jevu dochází ke změně frekvence. Při určování polohy lze proto měřit a zaznamenávat navíc i Dopplerovský posun.

4. Měření síly signálu

Tzv. Signal to Noise Ratio (SNR) udává poměr síly signálu k šumu. Obvykle je tato hodnota nejvyšší v zenitu a nejnižší u obzoru (signál je nejslabší).

Pro různé účely zpracování se využívají různé typy observací, ale nejvíce využívané jsou nepochybně pseudovzdálenosti pro okamžité určení polohy a následují fázová měření pro vysoce přesné aplikace.

3.4 Vlivy působící na přesnost měření

Nejčastější rozdělení rušivých vlivů je podle lokalizace:

1. Družice

- **Chyba družicových hodin**

Jelikož celý systém je založen na čase, na palubě družic jsou velmi přesné atomové hodiny, ovšem i ty mají své chyby. Signály se šíří rychlostí světla, z toho vyplývá, že chyba 1 μ s se odpovídá zhruba 300 m.

První z chyb je **Stabilita hodin** (zpoždění atomových hodin), následuje **Relativistický efekt** (hodiny jsou ovlivněny jevy podle teorie relativity) a poslední se nazývá **Zpoždění signálu** (korekce hodin v navigační zprávě jsou vztaženy pouze ke kombinaci vln, při použití jedné frekvence tak musí být znám rozdíl mezi vlnou L1 a kombinací vln). Celková chyba družicových hodin je zaslána v navigační zprávě a odpovídá přesnosti kódových měření.

- **Chyba v efemeridách družic**

Družice v navigační zprávě vysílají efemeridy, tj. přesné informace o své dráze, které jsou do družic nahrávány z pozemského řídicího segmentu a aktualizují se v určitém časovém intervalu. Mezitím dochází k ovlivňování dráhy družice (gravitačními i negravitačními vlivy), chyba polohy družice je v tomto případě okolo 2 m. V post-processingu se využívají přesné efemeridy, které jsou generovány analýzou pozorování monitorovacích stanic a jejich přesnost dosahuje řádu cm.

- **Geometrická konfigurace družic**

Tento faktor významně ovlivňuje přesnost určení polohy uživatele pomocí GNSS, proto využití více GNSS systémů je pro uživatele většinou přínosem právě z důvodu většího počtu pozorovaných družic. Vliv konstelace družic na měření je popsán parametry DOP.

2. Přijímač a jeho okolí

- **Multipath**

Pojem v překladu znamená vícecestné šíření signálu, ovšem často zahrnuje všechny chyby nepřímých "non-LOS" (line-of-sight) signálů. Projevuje se především v zastavěném prostředí, kde se signál může i několikanásobně odrazit od země a dalších objektů, může být výrazná, závisí na typu měření [23]. Odražený signál urazí před vstupem do přijímače delší dráhu než LOS signál (dorazí do přijímače až po LOS signálu). Dále se předpokládá, že amplituda odraženého signálu je nižší, míra degradace závisí na materiálu, od kterého se odrazí.

Multipath je nežádoucí vliv, který je třeba minimalizovat. Existuje několik způsobů, jak odražený signál přímo eliminovat nebo identifikovat:

– **Polarizace antény**

Jak už bylo zmíněno v kapitole 3.1.3, LOS signály jsou RHCP, po odrazu se jejich polarita mění (po prvním odrazu na LHCP). GNSS antény však přijímají především RHCP vlny. Problém může nastat při vícenásobném odrazu.

– **Konstrukční řešení antény**

Pro utlumení signálů pod nízkým elevačním úhlem, např. signály odražené od země, lze anténu podložit kovovou destičkou, či použít speciální soustavu kovových kruhů tzv. "Choke ring".

– **Vhodné umístění antény**

• **Chyba staničních hodin**

V GNSS přijímačích se nepoužívají atomové hodiny, ale levné krystalové hodiny. To má za následek menší přesnost určení času, chybu lze však opravit korekcí hodin přijímače určené spolu s dalšími neznámými parametry.

• **Variace fázového centra**

Variace fázového centra byla zmíněna v kapitole 3.1.3. Pro její určení lze použít jak laboratorní, tak polní měření. Od roku 2000 je často používaná metoda Absolutního robotické určení fázové variace. Práce na toto téma: [28].

3. Atmosférické poruchy

Následující chyby se vyskytují při průchodu různými vrstvami atmosféry.

Při výpočtu polohy potřebujeme tyto chyby znát, či jejich vliv jinak eliminovat. Existují i aplikace, kdy je nutné je výpočetně určit.

• **Vliv ionosféry**

Ionosféra je ionizovaná část Zemské atmosféry rozprostírající se ve výšce 50 - 1100 km. Sluneční záření zde vytváří volné elektrony a ionty, které ovlivňují rádiové vlny. Ionosféra je disperzním prostředím, index lomu je závislý na frekvenci vlny, proto může být celkový obsah elektronů (TEC) odhadován z měření dvoufrekvenčního GNSS přijímače. Stav ionosféry je velice proměnlivý, závisí na lokaci, ročním období, fázi dne aj.

K modelování ionosféry se používá více přístupů. Neznámějším je Klobucharův model, jehož koeficienty jsou zasílané v navigační zprávě. Dalšími přesnými modely jsou Globální Ionosférické Mapy. Ty jsou určované z dat permanentních GNSS stanic ze sítě IGS. [15]

- **Vliv troposféry**

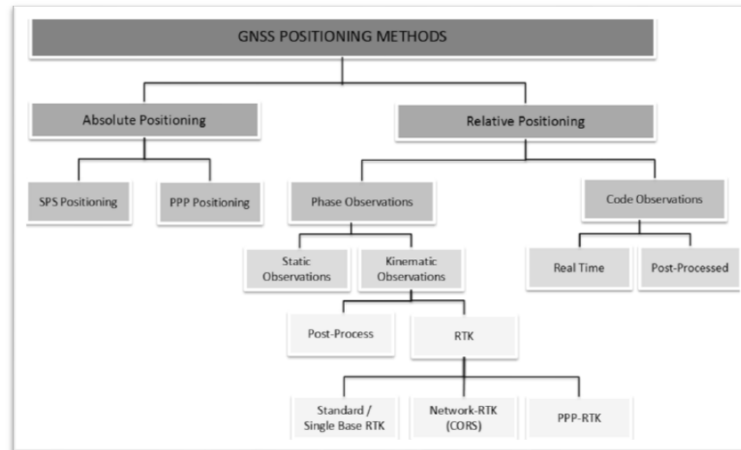
Troposféra je nejspodnější část atmosféry. Nachází se zde přibližně 80% hmotnosti celé atmosféry a 99% veškeré její vlhkosti. Pro frekvenci GNSS signálů je toto prostředí nedisperzní, všechny GNSS signály se zpožďují stejně. Při malých elevačních úhlech urazí signál v troposféře delší cestu, než když se družice pohybuje okolo zenitu.

Při modelování troposféry se často můžeme setkat s tzv. Celkovým troposférickým zpožděním (Zenith Total Delay - ZTD), který buď známe a zavádíme do řešení, anebo jej pro danou stanici určujeme jako časově proměnný parametr. ZTD se skládá ze dvou částí:

- **Suchá (dry/hydrostatic)** - je způsobena přítomností suchých plynů a závisí na teplotě a tlaku. Tvoří 90% zpoždění. Lze snadno modelovat užitím zákonů o ideálních plynech.
- **Vlhká (wet/component)** - je způsobena vodní párou a je závislá na počasí. Těžko se zjišťuje pomocí klasických meteorologických měření. Lze ji zjistit technologií GNSS a použít i třeba při předpovědi počasí.

3.5 Metody zpracování GNSS měření

V této kapitole budou uvedeny pouze metody užití v návrhu (kap. 5) nebo realizaci (kap. 6) GNSS zařízení. Obrázek 3.3 zobrazuje základní rozdělení metod.



Obrázek 3.3: Obecné rozdělení metod určování polohy pomocí GNSS, zdroj: [1]

- **RTK**

RTK, neboli Real Time Kinematic, je kinematická metoda využívající fázové měření a tok korekcí v reálném čase. Jedná se o diferenční řešení eliminující celou řadu chyb jak z uživatelského, tak kosmického segmentu, ale významně redukuje i vliv šíření signálu atmosférou. Výsledkem je vzájemná poloha přijímačů, přičemž je poloha Roveru určovaná s použitím referenční stanice Base (známy souřadnice). Pro přenos korekcí, určených referenční stanicí, musí být mezi nimi zajištěno datové spojení. Měření probíhá zpravidla několik sekund a přesnost se pohybuje v řádu mm-cm.[22]

- **Statická fázová metoda**

Při vyhodnocení měření statickou metodou pracujeme v post-processingu (po ukončení měření). I zde využíváme diferenční zpracování měření. Observace může trvat minuty, hodiny, ale i dny. Přesnost je v tomto případě v jednotkách mm. [22]

- **PPP**

Precise Point Positioning je metoda autonomní i absolutní, což znamená, že k přesnému určení polohy stačí jediný přijímač, přesné polohy družic a opravy hodin družic. Nevýhodou je delší čas od zahájení měření k dosažení vyšší přesnosti (konvergence). Pro dosažení centimetrové přesnosti se tato doba pohybuje okolo 15 minut (1 sec. měření) [29]. Při observaci 24 hodin lze určovat polohu s přesností lepší než 1 cm [16].

Zdroje kapitoly 3: [4] [10] [12] [19] [24]

4 Komunikační protokoly a formáty

Komunikační protokoly a formáty definují množinu pravidel vzájemné komunikace mezi dvěma nebo více uzly.

4.1 Transportní komunikační protokoly

V dnešní době existuje mnoho protokolů, které umožňují komunikaci mezi servery, zasílání dat, posílání e-mailů, ale i komunikaci mezi GNSS přijímači a ostatními elektronickými součástkami a počítači. V této práci je použito následujících protokolů. [46]

4.1.1 TCP

Transmission Control Protocol je spolehlivý transportní protokol, který zajišťuje, že odeslaný paket bude přijat. Dokáže detekovat chyby či ztracená data a dokud nejsou data správně přijata, opakuje přenos. K rozlišení aplikací mu slouží čísla portů (FTP: 20,21, HTTP: 80). Často se používá ve spojení TCP/IP, což je hlavní protokol Internetu. [61]

4.1.2 NTRIP

Networked Transport of RTCM via Internet Protocol je jeden z nejpoužívanějších protokolů pro transport korekčních GNSS dat, ovšem je možné ho použít i pro přenos dat měřených. Protokol byl vydán v roce 2004 německou agenturou BKG.

Protokol je založený na HTTP a používá transportní protokol TCP/IP. NTRIP obsahuje čtyři elementy:

- NTRIP Source
Generuje GNSS data ve formě streamu.
- NTRIP Server
Prostřednictvím NTRIP Casteru poskytuje data (z NTRIP Source) NTRIP Clientu. Definuje "mountpoint" (ID) každého NTRIP Source.
- NTRIP Caster
Server, který zpracovává požadavky a odpovědi NTRIP Clienta a NTRIP Serveru, spravuje uživatele a oprávnění přístupu k datům.

- NTRIP Client

Pokud je NTRIP Client NTRIP Casterem autorizován a zašle oprávněný požadavek, dojde k TCP/IP spojení mezi nimi a NTRIP Client začne přijímat data. [48]

4.1.3 FTP

FTP, neboli File Transfer Protocol, slouží pro přenos souborů mezi počítači. Jeho výhodou je nezávislost na operačním systému, dokonce je podporován i v některých webových prohlížečích nebo ve správčích souborů. Protokol funguje na principu client-server.

Komunikace a přenos dat

- Klient vytvoří TCP spojení ze svého náhodného portu na příkazový port 21 FTP serveru.
- V aktivním režimu FTP protokolu klient odešle informaci na jakém portu naslouchá. Server následně vytvoří s tímto portem datový kanál ze svého TCP portu 20.
- V pasivním režimu FTP protokolu (klient za firewallem) odešle server IP adresu a číslo portu. Datové spojení pak otevře klient.

Přístup k FTP serveru je chráněn přihlašovacím jménem a heslem. K mnoha serverům se však lze připojit bez hesla jako anonymní uživatel. [36]

Z hlediska bezpečnosti má FTP protokol mnoho slabin, které je možno zneužít. Řešením je používání např. zabezpečeného FTP, FTPS.

FTP protokol nachází využití k přístupu k souborům i v oblasti GNSS. Příkladem může být využití FTP serverů v datových centrech permanentních GNSS stanic, kde jednotlivé organizace poskytují např. observační či navigační rinexy a metadata stanic.

4.2 Komunikační formáty streamované

Zprávy v těchto formátech jsou přenášeny datovými toky nejčastěji (u GNSS) skrz protokoly TCP a NTRIP v reálném čase. Data je tedy možno okamžitě zpracovávat a vyhodnocovat, či dočasně uchovávat v paměti nebo souboru a následně převádět do formátu souborového.

4.2.1 NMEA

Zkratka NMEA, National Marine Electronic Association, je označení pro mezinárodní organizaci sdružující výrobce elektroniky, distributory, vzdělávací instituce zabývající se o námořní průmysl a komunikaci.

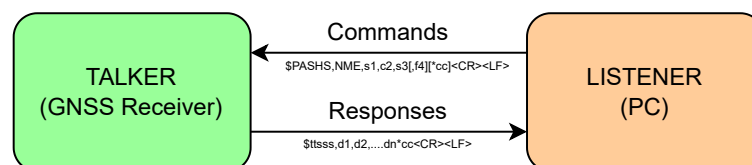
Organizace vydala v roce 1983 první verzi standardu NMEA 0183. V této práci se budeme věnovat verzi 4.11.

Tento standart označuje zařízení jako vysílače (talkers) a posluchače (listeners). Komunikace probíhá příkazy (commands) a odpověďmi (responses) použitím ACSII znaků ve větách s pevně danou strukturou. [47]

$$\$tss,d1,d2,\dots,dn*cc<CR><LF>$$

Parametr	Význam
\$	Začátek věty
tt	Identifikace vysílače/posluchače
sss	Konkrétní druh zprávy
d1,d2,...,dn	Datová pole
*	Konec datového pole
cc	Kontrolní součet
<CR><LF>	Ukončení řádku a přechod na nový

Tab. 4.1: Zpráva NMEA



Obrázek 4.1: Talker-listener schéma, autor: Lukáš Běloch

- Příkazy

\$PASHS,NME,s1,c2,s3[,f4][*cc]

Parametr	Význam
\$PASHS	Hlavička příkazu
NME	Typ příkazu (NMEA)
s1	Druh datové zprávy
c2	ID portu
s3	Povolení (ON) nebo zákaz (OFF) zprávy
f4	Výstupní rychlost

Tab. 4.2: NMEA příkaz

Příklad: \$PASHS,NME,GGL,A,ON,1*6D - NMEA příkaz k povolení odesílání zprávy typu GGL s 1 sekundovým intervalem. [2] [27]

- Odpovědi

Odpovědi jsou posluchači předávány v pravidelném časovém intervalu.

První dva znaky "tt" označují identifikátor vysílače.

Parametr	System
GA	GALILEO
GB	BDS
GL	GLONASS
GP	GPS
GN	GNSS

Tab. 4.3: Identifikátor vysílače

Nejčastějším typům vět, znaky "sss", užívaných GNSS, jsou věnovány následující kapitoly. [47]

1. GGA – Global Positioning System Fix Data

Věta obsahuje nejpoužívanější základní data pro navigaci: čas, polohu přijímače a informaci o kvalitě určení polohy.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
\$-GGA	hhmmss.ss	ddmm.mm	a	dddmm.mm	a	x	xx	x.x	x.x	M	x.x	M	x.x	xxxx	*hh
\$-GGA	161710.00	5004.87290	N	01423.52966	E	1	12	2.05	343.6	M	44.4	M	-	-	*4F

Tab. 4.4: NMEA zpráva - GGA věta

Pozice	Hodnota	Příklad
1	Čas (UTC)	16h 17m 10s
2	Zeměpisná délka	50° 4.87290'
3	N/S (sever/jih)	N
4	Zeměpisná šířka	14° 23.52966'
5	E/W (východ/západ)	E
6	Indikátor GPS kvality: 0 = fix není k dispozici, 1 = GPS fix, 2 = DGPS fix, 3 = PPS fix, 4 = RTK fix, 5 = RTK float, 6 = odhad, 7 = manuální vstup, 8 = simulační mód	1
7	Počet použitých družic	12
8	HDOP	2.05
9	Výška antény nad geoidem	343.5
10	Jednotky výšky antény (metr)	M
11	Rozdíl mezi elipsoidem WGS-84 a geoidem	44.4
12	Jednotky rozdílu (metr)	M
13	Stáří DGPS dat v sekundách	-
14	ID referenční stanice	-
15	Kontrolní součet	4F

Tab. 4.5: Popis částí GGA věty

2. GST – GPS Pseudorange Noise Statistics

Věta nese podrobnější informace o přesnosti určení polohy přijímače.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
\$-GST	hhmmss.ss	x	x	x	x	x	x	x	*hh
\$-GST	133635.00	36	10	6.0	79	2.5	3.9	3.9	*6D

Tab. 4.6: NMEA zpráva - GST věta

Pozice	Hodnota	Příklad
1	Čas přidružený k fixu GGA (UTC)	13h 25m 35s
2	RMS směrodatných odchylek pseudovzdáleností	36
3	Velikost hlavní poloosy elipsy chyb v metrech	10
4	Velikost vedlejší poloosy elipsy chyb v metrech	6
5	Orientace hlavní poloosy elipsy chyb ve stupních	79
6	Směrodatná odchylka zeměpisné šířky	2.5
7	Směrodatná odchylka zeměpisné délky	3.9
8	Směrodatná odchylka výšky	3.9
9	Kontrolní součet	6D

Tab. 4.7: Popis částí GST věty

3. GSA – GPS DOP and active satellites

V této větě jsou uvedeny identifikační čísla družic, použitých pro výpočet polohy a parametry přesnosti DOP.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
\$-GSA	a	a	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x.x	x.x	x.x	x.x	*hh
\$-GSA	A	3	06	25	12	17	24	19	02	-	-	-	-	-	1.06	0.66	0.84	1	*02

Tab. 4.8: NMEA zpráva - GSA věta

Pozice	Hodnota	Příklad
1	Režim volby (2D/3D) M = manuální, A = automatické	A
2	Typ fixování: 1 = není k dispozici, 2 = 2D fix, 3 = 3D fix	3
3-14	ID satelitů použitých pro fixování	6,25,12...
15	PDOP	1.06
16	HDOP	0.66
17	VDOP	0.84
18	ID GNSS systému 1 = GP, 2 = GL, 3 = GA, 4 = GB	1
19	Kontrolní součet	02

Tab. 4.9: Popis částí GSA věty

4. GLL – Geographic Position - Latitude/Longitude

Věta poskytuje informace o zeměpisné poloze včetně údajů o přesnosti.

	1	2	3	4	5	6	7	8
\$--GLL	ddmm.mm	a	dddmm.mm	a	hhmmss.ss	a	m	*hh
\$--GLL	5004.87389	N	01423.52498	E	120156.00	A	A	*7C

Tab. 4.10: NMEA zpráva - GLL věta

Pozice	Hodnota	Příklad
1	Zeměpisná délka	50° 4.87389'
2	N/S (sever/jih)	N
3	Zeměpisná šířka	14° 23.52498'
4	E/W (východ/západ)	E
5	Čas (UTC)	12h 01m 56s
6	Stav dat: A = platný, V = neplatný	A
7	Indikátor módu: A = autonomní, D = diferenční, E = odhadovaný, F = float RTK, M = manuální vstup, N = nefixovaný, P = přesný, R = RTK, S = simulátor	A
8	Kontrolní součet	7C

Tab. 4.11: Popis částí GLL věty

5. GSV – Satellites in view

Z této věty lze vyčíst informace o družicích. Vzhledem k tomu, že velikost NMEA věty může být maximálně 82 bytů, mohou být v této zprávě informace o omezeném množství družic. Zprávy tak přicházejí ve skupinách.

	1	2	3	4	5	6	7	8-n	n+1
\$--GSV	x	x	x	x	x	x	x	...	*hh
\$--GSV	2	2	06	25	51	075	36	...	*77

Tab. 4.12: NMEA zpráva - GSV věta

Pozice	Hodnota	Příklad
1	Celkový počet GSV vět ve skupině	2
2	Číslo aktuální GSV věty	2
3	Počet viditelných družic	6
4	Identifikační číslo první družice	25
5	Elevační úhel první družice ve stupních	51
6	Azimut první družice ve stupních	75
7	Odstup signálu od šumu (SNR) pro první družici	0.022
8-n	Údaje 4-7 pro další družice	...
n+1	Kontrolní součet	77

Tab. 4.13: Popis částí GSV věty

6. RMC – Recommended Minimum Navigation Information

Věta s nejmenším doporučeným množstvím informací pro navigaci.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
\$--RMS	hhmmss.ss	A	ddmm.mm	a	dddmm.mm	a	x.x	x.x	xxxx	x.x	a	m	s	*hh
\$--RMC	135944.00	A	5004.87377	N	01423.52159	E	0.022	-	230222	-	-	A	V	*1A

Tab. 4.14: NMEA zpráva - RMS věta

Pozice	Hodnota	Příklad
1	Čas (UTC)	13h 59m 44s
2	Status přijímače, A = v pořádku, V = varování	A
3	Zeměpisná délka	50° 4.87377'
4	N/S (sever/jih)	N
5	Zeměpisná šířka	14° 23.52159'
6	E/W (východ/západ)	E
7	Vodorovná rychlost v uzlech	0.022
8	Kurz pohybu ve stupních	-
9	Datum	23. únor 2022
10	Magnetická deklinace ve stupních	-
11	E/W (východ/západ)	-

12	Indikátor módu: A = autonomní, D = diferenční, E = odhadovaný, F = float RTK, M = manuální vstup, N = nefixovaný, P = přesný, R = RTK, S = simulátor	A
13	Navigační status: A = autonomní, D = diferenční, E = odhadovaný, M = manuální vstup, N = neplatné, S = simulátor, V = platný	V
14	Kontrolní součet	1A

Tab. 4.15: Popis částí RCM věty

7. ZDA – Time and Date

V této větě nejsou informace o poloze přijímače, ale pouze časové údaje.

	1	2	3	4	5	6	7
\$- -ZDA	hhmmss.ss	xx	xx	xxxx	xx	xx	*hh
\$- -ZDA	171943.00	25	02	2022	00	00	*76

Tab. 4.16: NMEA zpráva - ZDA věta

Pozice	Hodnota	Příklad
1	Čas (UTC)	17h 19m 43s
2	Den	25
3	Měsíc	2
4	Rok	2022
5	Místní posun času (hodin) od UTC	00
6	Místní posun času (minut) od UTC	00
7	Kontrolní součet	76

Tab. 4.17: Popis částí ZDA věty

4.2.2 RTCM

Pod touto zkratkou se skrývá název mezinárodní, neziskové, vědecké a vzdělávací organizace Radio Technical Commission for Maritime Services. Organizace vydává komunikační standardy pro různé obory. Jedním z nich je protokol RTCM SC-104. V roce 2004 byla vydána verze 3, která je v současné době aktuální a neustále se vyvíjející. [54] [55]

Protokol RTCM slouží převážně k přenosu DGNSS korekčních dat, ale i dat pro aplikace post-processingu (následného zpracování dat). RAW data jsou přenášena v binární podobě, proto je nutno je dekodovat. RTCM zprávy jsou děleny dle obsahu. Nejčastější typy zpráv jsou uvedeny v následující tabulce 4.18. [59]

Typ zprávy	Popis
1004	Observační data na frekvencích L1 a L2 systému GPS
1005	Poloha antény referenční stanice
1008	Sériové číslo antény
1012	Observační data na frekvencích L1 a L2 systému GLONASS
1013	Parametry systému - list odeslaných zpráv a rychlosti odeslání
1017	Kombinace GPS geometrických a ionosférických korekcí
1019	Efemeridy systému GPS
1020	Efemeridy systému GLONASS
1039	Kombinace GLONASS geometrických a ionosférických korekcí
1042	Efemeridy systému BDS
1045-1046	Efemeridy systému GALILEO
1071-1077	MSM 1-7 pro GPS
1081-1087	MSM 1-7 pro GLONASS
1091-1097	MSM 1-7 pro GALILEO
1121-1127	MSM 1-7 pro BDS
4072	Přiděleno firmě U-blox AG

Tab. 4.18: Typy RTCM vět

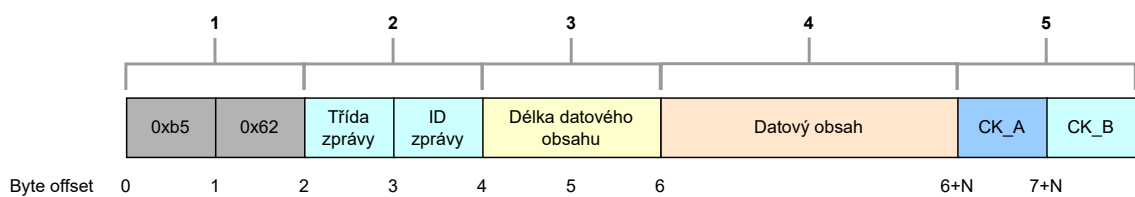
4.2.3 UBX

Komunikační protokol UBX je přímo určen pro přijímače od firmy U-blox.

Klíčové vlastnosti:

- Kompaktní - používá 8bitová binární data
- Chráněný kontrolním součtem
- Modulární - používá dvoustupňový identifikátor zprávy (Třídy, ID)

Struktura zprávy



Obrázek 4.2: Schéma struktury UBX, autor: Lukáš Běloch

Číslo	Popis
1	Každá zpráva začíná dvěma bajty obsahující synchronizační znaky
2	Třída zprávy (0x02 = RXM) a její ID (0x32 = RTCM)
3	Délka datového obsahu v bajtech
4	Datový obsah
5	Kontrolní součty

Tab. 4.19: Popis schématu struktury UBX

Jak už bylo řečeno, protokol UBX rozřazuje různé zprávy podle třídy a ID. Příklady jsou uvedeny v tabulce 4.20 .

Zpráva	Třída zprávy	ID	Popis
UBX-CFG-MSG	0x06	0x01	Nastavení zpráv
UBX-INF-ERROR	0x04	0x00	Error hláška
UBX-RXM-RAWX	0x02	0x15	Surová data měření GNSS
UBX-RXM-SFRBX	0x02	0x13	Vysílání navigačních zpráv

Tab. 4.20: Druhy UBX zpráv

4.3 Výměnné formáty souborové

Na rozdíl od dat streamovaných se k datům uložených v souborech dostaneme klidně i několik let nazpět. Pro přístup k těmto datům je tedy nejefektivnější využití FTP serveru.

4.3.1 RINEX

RINEX se poprvé objevil v roce 1989. Jedná se o výměnný formát surových dat nezávislý na přijímači (Receiver Independent Exchange Format). Formát je vzhledem ke své povaze velice používaný. V současné době je nejrozšířenější verze 2 a novější verze 3. V tomto formátu lze ukládat observační data, navigační zprávy a meteorologická data

. Verze 2 podporuje systémy GPS, GLONASS, Galileo a SBAS, zatímco verze 3 podporuje všechny systémy GNSS, RNSS a SBAS. Verze se liší i v názvu souborů.

- **RINEX verze 2.11** [52]

Název	ssssdddf.yyt
ssss	Označení stanice
ddd	Den v roce
f	Pořadové číslo/ znak v rámci dne (hmm)
yy	Rok
t	Typ souboru (o - observační, n - navigační, m - meteorologický)

Tab. 4.21: Pojmenování souboru - RINEX verze 2.11

- **RINEX verze 3.04**[53]

Název	XXXXMRCCC_N_YYYYDDDDHHMM_FFF_III_ST.rnx
XXXXMRCCC	Devítímístný název stanice
N	Zdroj (R - originální, S - streamovaný, U - neznámý)
YYYY	Rok
DDD	Den v roce
HHMM	Hodina, minuta
FFF	perioda vytváření souborů (př. 15M - 15 min, 01H - 1 h)
III	Frekvence dat (př. 01S - vteřinové, 05M - pětiminutové)
S	Systém (př. G - GPS, R - GLONASS, E - Galileo, M - mix)
T	Typ souboru (O - observační, N - navigační, M - meteorologický)

Tab. 4.22: Pojmenování souboru - RINEX verze 3.04

Struktura souborů je jasně definována, soubor je rozdělen na hlavičku a měřená data. V hlavičce observačních RINEXů jsou uvedena nejdůležitější data o měření jako: datum, satelitní systém, typ antény a přijímače, přibližná poloha a další. Kompletní popis RINEXu je uveden v dokumentacích na stránkách IGS. Observační RINEXy jsou obvykle komprimované Hatanaka kompresí. Pro jejich dekompresi je zapotřebí software *RNXCMP*.

5 Návrh technologického řešení senzoru

5.1 Hardware

Pro hledání optimálního řešení senzoru, ale i z osobní zvědavosti, bude v projektu pracováno s více druhy jednotlivých komponent.

5.1.1 Přijímače

Základním přijímačem jsou v této práci desky s modulem **ZED-F9P**. [26]

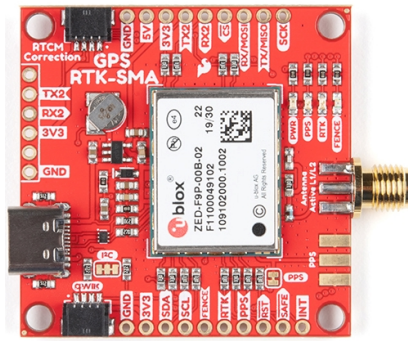
Výrobce	U-blox
GNSS systémy (vlny)	GPS (L1C/A, L2C), GLO (L1OF, L2OF), GAL (E1, E5b), BDS (B1I, B2I), QZSS (L1C/A, L1S, L2C), SBAS (L1C/A)
Rozhraní	UART (2x), SPI, USB, DDC
Výstupní protokoly	NMEA, UBX binary, RTCM, SPARTN
Vstupní napětí	2.7 – 3.6 V
Spotřeba energie	62mA (3.3V)
Pracovní teplota	-40 – +85°C

Tab. 5.1: Specifikace modulu ZED-F9P

SparkFun GPS-RTK-SMA Breakout - ZED-F9P (Qwiic) [60]

Výrobce	Sparkfun
Rozměry	43.5 x 43.2 mm
Vstupní napětí	3.3 nebo 5 V
Spotřeba energie	62 – 118mA (3.3V)
Rozhraní	USB-C, GPIO: USB, UART (2x), SPI, I2C
Konektor antény	SMA
Cena	cca. 5 300Kč bez DPH, E-shop: Sparkfun
Poznámka	Rozměry a rozhraní splňují kritéria projektu.

Tab. 5.2: Specifikace SparkFun - ZED-F9P

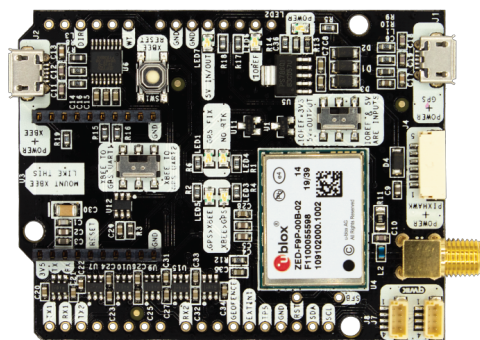


Obrázek 5.1: SparkFun - ZED-F9P, zdroj: [60]

simpleRTK2B-F9P V3 [57]

Výrobce	Ardusimple
Rozměry	70 x 53 mm
Vstupní napětí/spot	5 V
Spotřeba energie	182mA (3.3V)
Rozhraní	mikro USB, GPIO: UART (2x), I2C, zásuvka pro modul Xbee
Konektor antény	SMA
Cena	cca. 5 700 Kč bez DPH, E-shop: Ardusimple
Poznámka	Rozměry a rozhraní splňují kritéria projektu.

Tab. 5.3: Specifikace simpleRTK2B-F9P V3



Obrázek 5.2: simpleRTK2B-F9P V3, zdroj: [57]

C099-F9P Application Board [33]

Výrobce	U-blox
Rozměry	110 x 55 mm
Vstupní napětí	6 - 12 V
Spotřeba energie	500mA (3.3V)
Rozhraní	mikro USB, Bluetooth, WiFi GPIO: UART (2x), SPI, I2C
Konektor antény	SMA
Cena	cca. 5 800 Kč bez DPH, E-shop: Mouser
Poznámka	Deska je pro projekt předimenzovaná a zbytečně velká.

Tab. 5.4: Specifikace C099-F9P Application Board



Obrázek 5.3: C099-F9P Application Board, zdroj: [33]

Druhým použitým modulem je **mosaic-X5**. [20]

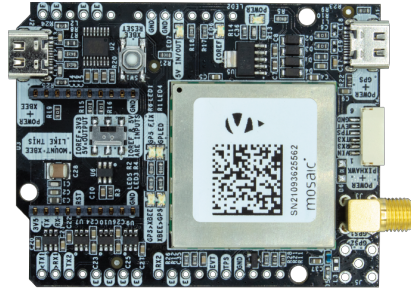
Výrobce	Septentrio
GNSS systémy (vlny)	GPS (L1C/A, L2PY, L2C, L2P, L5), GLO (L1OF, L2OF, L2OC, L3OC), GAL (E1, E5a, E5b, E5), BDS (B1I, B1C, B2a, B2I, B3), QZSS (L1C/A, L2C, L5), SBAS (L1, L5)
Rozhraní	UART (4x), SPI, USB, Ethernet, SDIO, GPIO
Výstupní protokoly	NMEA, SBF, RTCM, RINEX, CMR
Vstupní napětí	3.3 V +/- 5%
Spotřeba energie	182 – 333mA (3.3V)
Pracovní teplota	-40 – +85°C

Tab. 5.5: Specifikace modulu mosaic-X5

simpleRTK3B Pro [58]

Výrobce	Ardusimple
Rozměry	70 x 53 mm
Vstupní napětí	4.5-5 V
Spotřeba energie	300mA (5V)
Rozhraní	USB - C, GPIO: UART (2x), I2C, zásuvka pro modul Xbee
Konektor antény	SMA
Cena	cca. 13 800 Kč bez DPH, E-shop: Ardusimple
Poznámka	Modul má lepší parametry než jsou základní požadavky.

Tab. 5.6: Specifikace simpleRTK3B Pro



Obrázek 5.4: simpleRTK3B Pro, zdroj: [58]

5.1.2 Antény

ANN-MB-00 [30]

Výrobce	U-blox
Rozměry	60.0 x 82.0 x 22.5 mm
Vstupní napětí	3.0 – 5.0 V
Spotřeba energie	15mA (5V)
Uchycení	magneticky, dvěma šrouby
Konektor antény	SMA
Fázové centrum	H: ve středu antény, chyba L1: +-10mm, L2: +-15mm
Horizontal/Vertical	V: L1: 8.9mm, L2: 7.6mm
Cena	cca. 1 200 Kč bez DPH, E-shop: Ardusimple

Tab. 5.7: Specifikace ANN-MB-00



Obrázek 5.5: ANN-MB-00, zdroj: [30]

ANT2B-SUR [31]

Výrobce	Ardusimple
Rozměry	ø146.5 x 62.5 mm
Vstupní napětí	3.0 – 5.5 V
Spotřeba energie	< 45mA (3.3V)
Uchycení	šroubem
Konektor antény	TNC
Fázové centrum	H: ve středu antény, chyba L1, L2: +-3mm
Horizontal/Vertical	V: L1: 46.5mm, L2: 50.5mm
Cena	cca. 2 200 Kč bez DPH, E-shop: Ardusimple

Tab. 5.8: Specifikace ANT2B-SUR



Obrázek 5.6: ANT2B-SUR, zdroj: [31]

TOP106 [63]

Výrobce	Sparkfun
Rozměry	ø148 x 55.5 mm
Vstupní napětí	3.3 – 12 V
Spotřeba energie	< 45mA (3.3V)
Uchytení	šroubem
Konektor antény	TNC
Fázové centrum	H: ve středu antény, chyba L1, L2: +-2mm
Horizontal/Vertical	V: L1: 39.6mm, L2: 43.6mm
Cena	cca. 3 000 Kč bez DPH, E-shop: Sparkfun

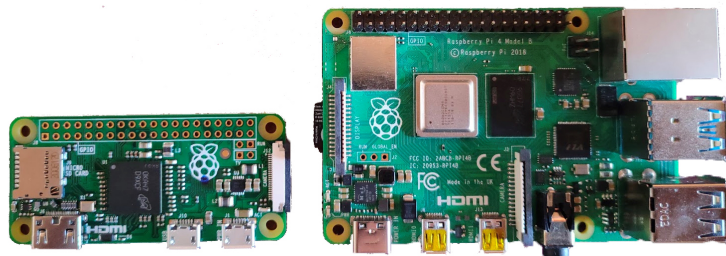
Tab. 5.9: Specifikace TOP106



Obrázek 5.7: TOP106, zdroj: [63]

5.1.3 Minipočítače

Minipočítače budou sloužit pro příjem zpráv z přijímače a budou je dále zpracovávat, distribuovat a zobrazovat. V této práci budou použity různé typy počítačů značky Raspberry Pi. Bylo tak zvoleno z důvodu nízké ceny, vysoké variability a spolehlivosti.



Obrázek 5.8: Srovnání Raspberry Pi Zero a Raspberry Pi B, autor: Lukáš Běloch

Raspberry Pi Zero W [49]

Rozměry	60 x 30 x 5 mm
Vstupní napětí	5 V
Procesor	Broadcom BCM2835
Jádro	ARM1176JZF-S
Počet jader	1
Architektura	ARMv6Z (32-bit)
Operační paměť	512 MB
Operační systém	Raspberry Pi OS (32 bit)
Rozhraní	WiFi, Bluetooth, mikro USB, HDMI, GPIO
Cena	cca. 297 Kč, E-shop: RPishop.cz

Tab. 5.10: Specifikace Raspberry Pi Zero W

Raspberry Pi Zero 2 W [50]

Rozměry	60 x 30 x 5 mm
Vstupní napětí	5 V
Procesor	Broadcom BCM2710A1
Jádro	Cortex-A53
Počet jader	4
Architektura	ARMv7 (64-bit)
Operační paměť	512 MB
Operační systém	Raspberry Pi OS (64 bit)
Rozhraní	WiFi, Bluetooth, mikro USB, HDMI, GPIO
Cena	cca. 410 Kč, E-shop: RPishop.cz

Tab. 5.11: Specifikace Raspberry Pi Zero 2 W

Raspberry Pi 4 Model B - 2GB RAM [51]

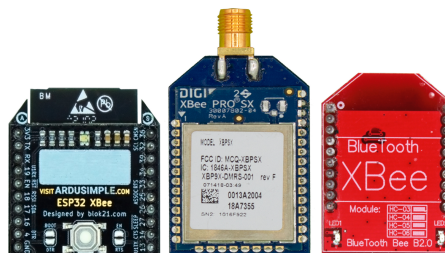
Rozměry	56.5 x 85.6 x 11 mm
Vstupní napětí	5 V
Procesor	Broadcom BCM2711
Jádro	Cortex-A72
Počet jader	4
Architektura	ARMv8 (64-bit)
Operační paměť	2 000 MB
Operační systém	Raspberry Pi OS (64 bit)
Rozhraní	Ethernet, WiFi, Bluetooth, USB (4x), HDMI (2x), GPIO
Cena	cca. 1 349 Kč, E-shop: RPishop.cz

Tab. 5.12: Specifikace Raspberry Pi 4 Model B - 2GB RAM

5.1.4 Ostatní součástky

Moduly Xbee

Pomocí komunikačních modulů Xbee lze rozšířit přijímače o další funkce. Na desky zejména od firmy ArduSimple lze tak snadno nainstalovat rádiový, WiFi nebo Bluetooth modul. [66]



Obrázek 5.9: Moduly Xbee, zdroj: [66]

Adaptér Raspberry Pi pro simpleRTK

Umožňuje snadné spojení simpleRTK (UART1) na GPIO Raspberry Pi. [43]

HUAWEI E3372H-320

LTE USB modem slot na SIM.

5.2 Software

V této práci bude využito následujících softwarů.

5.2.1 G-NUT software

Vývoj softwaru byl zahájen v roce 2011 Ing. Janem Doušou Ph.D. a Ing. Pavlem Václavovicem Ph.D na Geodetické observatoři Pecný spadající pod VÚGTK.

Od roku 2018 je údržba i vývoj software provozován ve spin-off společnosti G-Nut Software, s.r.o. [40]

Software je zaměřen především na:

- Polohové řešení metodou GNSS
Program *Geb* zajišťuje určení pozice metodou PPP
- Kvalitu GNSS dat
Důležitou částí softwaru je program *Anubis*. Lze s ním pracovat v režimu real-time nebo post-processing. Hlavní náplní programu je vytváření souborů obsahující kvalitu dat (formát XML, XTR). V režimu real-time je možné provádět převod dat z RTCM streamu do RINEX.
- Monitorování stavu troposféry pomocí GNSS
SW G-Nut je také schopen určovat parametry troposféry konkrétně ZTD, horizontální troposférické gradienty i přímá (šikmá) zpoždění signálu od jednotlivých družic. Pro tuto aplikaci je určen nástroj Tefnut, který dokáže pracovat i v reálném čase.

Software *G-Nut* umožňuje:

1. Řešení s využitím vzdáleného zpracování dat
Surová data jsou v tomto případě poskytována z GNSS zařízení přímo na NTRIP server a zpracování dat probíhá na vzdáleném serveru.
2. Řešení s využitím lokálního zpracování dat
Software je implementován na počítači. Na vzdálený server přicházejí již data zpracovaná (poloha přijímače, parametry atmosféry, apod.)

5.2.2 Aplikace GNSS-logger

První verzi vytvořil v roce 2021 Ing. Štěpán Hodík a je dostupná na <https://github.com/DilnaC004/GNSS-logger>.

Programovacím jazykem byl zvolen Python. Aplikace umožňuje čtení dat ze sériového portu počítače, jejich ukládání a následný převod do formátu RINEX. Data se ukládají do hodinových souborů a název je tvořen aktuálním datem ve formátu *yyyy_mm_dd_hh_mm_ss*. Základním observačním intervalem je 1 s.

Pro vytváření výsledných RINEXů pracuje *GNSS-logger* s NMEA zprávami (GGA, ZDA) a UBX (RAWX, SFRBX), z čehož vyplývá, že aplikace je navržena pro práci s přijímači od společnosti Ublox. Měřená data jsou ukládána do dočasných souborů a jejich konverze je prováděna funkcí *CONVBIN* z knihovny *RTKLIB*. Důležitým volitelným parametrem je možnost odesílání vytvořených souborů na FTP server.

Výhodou této aplikace je dostupnost a jednoduchost kódu, která umožňuje nasazení i na méně výkonných počítačích a snadnou úpravu kódu. Nevýhodou, že pracuje pouze s jednou vlnou GNSS signálu.[39]

5.2.3 Knihovna RTKLIB

Tento open-source program obsahuje řadu nástrojů, které umožňují práci s daty a určování polohy. Program je spustitelný jak v grafickém okně, tak i v okně terminálovém. Navíc jednotlivé funkce jdou spustit samostatně. Mezi nejzajímavější nástroje, a v této práci využitelné, patří:

- **RTKPOST**

Tento nástroj je určen pro post-processingové určení polohy. Na vstupu jsou observační RINEXy a navigační data. Výstupem je pak soubor s příponou *POS*, který obsahuje informace o zpracování a lze ho zobrazit formou grafu funkcí *RTKPLOT*.

- **CONVBIN**

Jak už bylo výše zmíněno, aplikace převádí surová data do formátu RINEX.

- **STR2STR**

Tato funkce má na vstupu stream dat a dokáže je dále rozesílat. Přijímat data může ze sériového portu, TCP portu, NTRIP klienta a souboru. Odesílání umožňuje na TCP port, NTRIP server a do souboru.[56]

5.3 Možné verze senzoru

GNSS nachází využití při mnoha aplikacích. Nízkonákladové přijímače tak umožňují vysokou variabilitu. V této části bude představeno několik teoretických návrhů sestavení komponent pro dané situace.

5.3.1 Use case 1 - Vytyčení bodu, sběr dat, přesná navigace

Měření bodů je typická geodetická činnost, při které je třeba rychle vytyčit nebo zaměřit určitý bod v terénu s přesností pohybující se v řádu mm-cm. Stejný přístup je nutný i při navigaci, například při řízení stavebních strojů pracujeme s okamžitou polohou. Navíc tyto dvě aplikace spojuje to, že při nich potřebujeme grafický výstup a často i ovládání.

Řešení

Pro tento příklad je vhodná metoda měření RTK, pro kterou musí být zajištěn tok korekcí. K ovládání a zobrazování dat lze použít mobilní telefon, minipočítač s obrazovkou, tablet a případně i notebook (OS: Android, Windows, Linux). Příkladem volně dostupných aplikací pro mobilní zařízení: SW Maps, GNSS Surveyor.

Rozdělení podle způsobu přijímání korekcí:

1. Korekce ze sítě referenčních stanic

Tento typ řešení je pro běžné použití nejméně náročný, a v současné době i velice používaný. Sestavu před vlastním měřením postačí zapnout, počkat na inicializaci sítě, fix řešení a určování polohy je zahájeno.

Komponenty sestavy:

- Anténa - kalibrovaná ANT2B-SUR, TOP106
- Přijímač - Sparkfun, simpleRTK2B, C099-F9P
- Mobilní zařízení s internetem (Mobilní telefon, PC s USB modemem)

Propojení a funkce:

Mobilní zařízení je USB kabelem spojeno s přijímačem. Skrz toto připojení jsou přijímači poskytována korekční data a zpět se navrací již vypočtená poloha, jejíž hodnota je vhodně zaznamenána nebo zobrazena.

2. Korekce z vlastní báze

V tomto případě je řešení mírně složitější, avšak není závislé na internetové síti. Tato verze je složena ze dvou částí. Stanice base tvoří přijímač s anténou umístěnou na známém bodě. Tato stanice zasílá korekční data části druhé, která se nazývá rover a slouží k samotnému měření. Vzhledem k tomu, že je vhodné mít obě sestavy blízko sebe, lze ke komunikaci mezi nimi zvolit rádiové spojení.

Komponenty sestavy:

- Anténa (2x) - kalibrovaná ANT2B-SUR, TOP106
- Přijímač (2x) - Sparkfun, simpleRTK2B, C099-F9P
- Mobilní zařízení
- Rádiový modul (2x) - Xbee
- Napájení pro Base

Propojení a funkce:

Base stanice je pouze propojení antény, přijímače a rádiového modulu.

U roveru jsou korekční data přenášena pomocí rádiového modulu do přijímače a z něho je pak odesílána poloha mobilnímu zařízení, skrz spojení tvořené USB kabelem.

5.3.2 Use case 2 - Sledování vzdáleného pohybujícího se objektu

Téměř v každém objektu, který se dokáže pohybovat, se vyskytuje nějaký typ GNSS zařízení. Najdeme ho v autech, v dronech, na lodích, dokonce i na některých zvířatech. Tyto, často pouze GPS, lokátory uživateli zasílají polohu s přesností v řádu několika metrů a jejich účel lokalizace je tímto splněn. Avšak například pro autonomní vozidla a jiná podobná zařízení, nemusí být tato přesnost dostačující.

Jeden příklad za všechny. Mějme RC loď, která je určena pro mapování dna sonarem a zaměřování výšky hladiny vody. Loď je automaticky řízena počítačem po předem zadané trase. Abychom předešli srážce s břehy, či jinými objekty na vodě, musí loď plout po vodě s určitou přesností. Měřená data a polohu si může ukládat na svůj lokální disk nebo je odesílat na počítač umístěný na souši. V obou případech je nutná poloha v centimetrech pro vyhodnocení měření, ale v případě druhém

nemusíme plavidlo vůbec vyzvedávat z vody a data lze v reálném čas sledovat i z několik kilometrů vzdáleného počítače. Navíc je možné v případě neočekávané situace, změnit kurz, či lehce dohledat uvíznuté plavidlo. GNSS aparatura často není jediným senzorem k určení polohy na těchto zařízeních, využívají se gyroskopy a akcelerátory, ale z GNSS dat získáváme absolutní polohu.

Řešení

Řešení bude velice podobné Verzi 1. Proto zde bude uveden pouze jedno, kdy řídicí počítač (na souši) je od autonomního zařízení vzdálen na desítky kilometrů.

K odesílání dat bude potřeba internet, a tedy lze využít metodu RTK s korekčními daty ze sítě referenčních stanic.

Komponenty sestavy:

- Anténa - ANN-MB-00
- Přijímač - Sparkfun, simpleRTK2B
- Minipočítač s USB modemem
- Napájení, solární panel

Propojení a funkce:

Přijímač je zapojen přes sériový port do minipočítače a odtud je i napájen. Počítač poskytuje přijímači korekce a dostává vypočtené souřadnice. Ty využije pro vyhodnocení své polohy vzhledem k plánované trase, popřípadě změni kurz a následně spolu s měřenými daty je dočasně uschová ve své paměti, anebo rovnou odešle prostřednictvím internetu na vzdálený počítač.

5.3.3 Use case 3 - Určování parametrů atmosféry

Pro určování parametrů atmosféry potřebujeme anténu stanice pevně umístěnou na jednom místě. Nezáleží, zda bude na nějakém konkrétním bodě. Ať budou měřená data jen distribuována, či lokálně zpracovávána a odesílána, je potřebný přístup k internetu. Z těchto důvodů je ideálním umístěním antény na střeše, kde má dostatečný výhled a počítač má přístup k WiFi.

- Anténa - ANN-MB-00, ANT2B-SUR, TOP106
- Přijímač - Sparkfun, C099-F9P, simpleRTK2B, simpleRTK3B
- Minipočítač

Propojení a funkce:

Přijímač je zapojen přes sériový port do minipočítače a odtud je i napájen.

V nejjednodušším případě počítač data distribuuje přes NTRIP caster. Zpracování a vyhodnocení pak probíhá na vzdáleném serveru.

5.3.4 Use case 4 - Dlouhodobé sledování posunů povrchu

Sledování posunů svahů je v ČR běžné, zejména v poddolovaných územích, ale i tam, kde se projevuje nějaká větší seismická aktivita. Svahy jsou často osazeny body, které se měří v delších časových rozestupech, či nepřetržitě. Stroje k tomu využívané, nepatří mezi nejlevnější a ve volném prostoru jsou náchylné na zničení. Proto i zde by mohly nízkonákladové GNSS sestavy najít své uplatnění.

Řešení

Jelikož budou antény připevněny po celou dobu k jednomu bodu, využijeme zde metodu statickou. Můžeme tak dosáhnout i přesnosti polohy v jednotkách milimetrů [22]. Uvažujme, že tyto stanice se nachází v oblastech bez elektrické sítě. Je tedy třeba zajistit přísun elektrické energie jiným způsobem, nabízí se solární panely, či větrná elektrárna.

Rozdělení podle způsobu zpracování a distribuce dat:

1. Lokální zpracování dat s offline přenosem

Tato verze počítá s pravidelnou návštěvou jednotlivých stanic a s kontaktním přetažením dat na pevný disk.

Komponenty sestavy:

- Anténa - ANT2B-SUR, TOP106
- Přijímač - Sparkfun, simpleRTK2B, simpleRTK3B
- Minipočítač
- Napájení

Propojení a funkce:

Přijímač je k počítači připojen prostřednictvím sériového portu a předává mu měřená data. Ta jsou v počítači zpracována do formy RINEXu. K přenosu RINEXů k uživateli dojde automaticky po připojení flash disku. Přehrané soubory se následně vymažou uvnitř počítače. K vyhodnocení dat pak již dochází na počítači uživatele.

2. Lokální zpracování dat s online přenosem

Zde předpokládáme, že v místě přijímače je dostupný mobilní internet.

Komponenty sestavy:

- Anténa - ANT2B-SUR, TOP106
- Přijímač - Sparkfun, simpleRTK2B, simpleRTK3B
- Minipočítač s USB modemem
- Napájení

Propojení a funkce:

Od předchozí verze se liší pouze tím, že vytvořené RINEXy se prostřednictvím LTE modemu odesílají na vzdálený FTP server.

3. Online streamování dat se zpracováním na vzdáleném serveru

Máme obdobný předpoklad. V místě je dostupný mobilní internet s kvalitním připojením. Pokud by tato podmínka nebyla splněna, docházelo by ke ztrátě dat.

Komponenty sestavy:

- Anténa - ANT2B-SUR, TOP106
- Přijímač - Sparkfun, simpleRTK2B, simpleRTK3B
- Minipočítač s USB modemem
- Napájení

Propojení a funkce:

Měřená data z přijímače jsou z minipočítače streamovaná na NTRIP caster. Odtud si je koncový uživatel v reálném čase bere a zpracovává.

4. Komplexní řešení sítě pozorovaných stanic

Využití výše uvedených typů pro sledování větší části povrchu v reálném čase pomocí sítě GNSS stanic, by bylo jak časově neefektivní, tak finančně náročné. Jednotlivé stanice by obsahovaly příliš mnoho komponent a navíc by každá z nich musela být pokryta mobilním signálem a mít předplacený internet. Proto se zde nabízí řešení s využitím rádiových modulů a jednoho počítače.

Komponenty sestavy:

- Antény - ANT2B-SUR, TOP106
- Přijímače - Sparkfun, simpleRTK2B, simpleRTK3B
- Rádiové moduly - Xbee
- Výkonný minipočítač s USB modemem
- Napájení

Propojení a funkce:

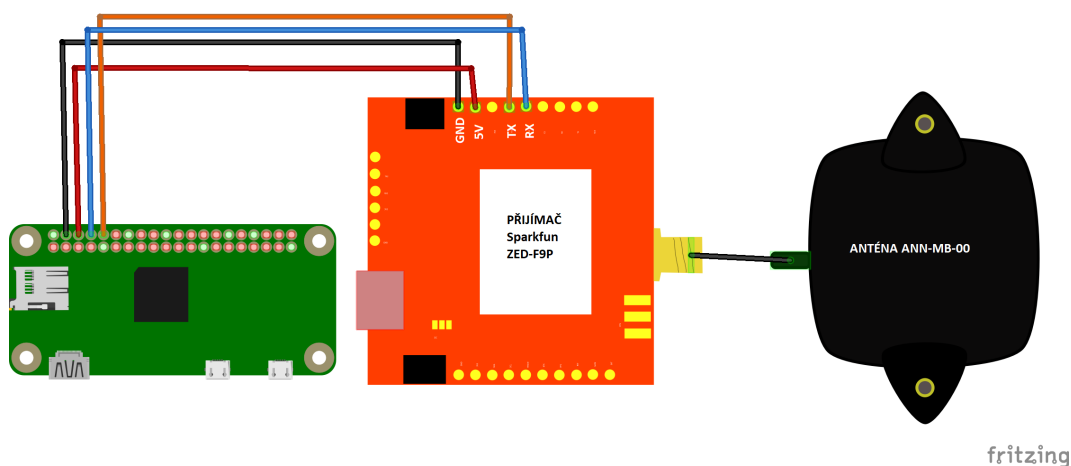
Jednotlivé stanice obsahují pouze anténu umístěnou na pevném bodě, přijímač a k němu napojený rádiový modul. Modul odesílá data na počítač (ideálně umístěný ve středu sítě). Počítač tak může přijímat data z více rádiových modulů, rozřazovat podle adres a buďto dále distribuovat prostřednictvím internetu, nebo zpracovávat a vyhodnocovat.

6 Realizace prototypu návrhu

V této práci bude realizován prototyp Verze 3 a částečně Verze 4. Sestava komponent bude vypadat takřka totožně, lišit se tedy bude pouze práce s daty. V této kapitole bude popsáno zapojení komponent, konfigurace přijímačů a nastavení minipočítače pro různé softwary.

6.1 Základní zapojení komponent

Nejjednodušší propojení Raspberry Pi a přijímače je pomocí USB kabelu. Skrz toto spojení probíhá jak napájení, tak i komunikace. Pro spolehlivější propojení lze využít GPIO dle obrázku 6.1.



Obrázek 6.1: Schéma zapojení, SW Fritzing, autor: Lukáš Běloch

6.2 Nastavení přijímače

Tato část se věnuje jednoduchému popisu způsobu konfigurace přijímačů. Konkrétní požadované výstupy byly již zmíněny v předchozích kapitolách, včetně detailnějšího popisu zpráv.

6.2.1 U-blox

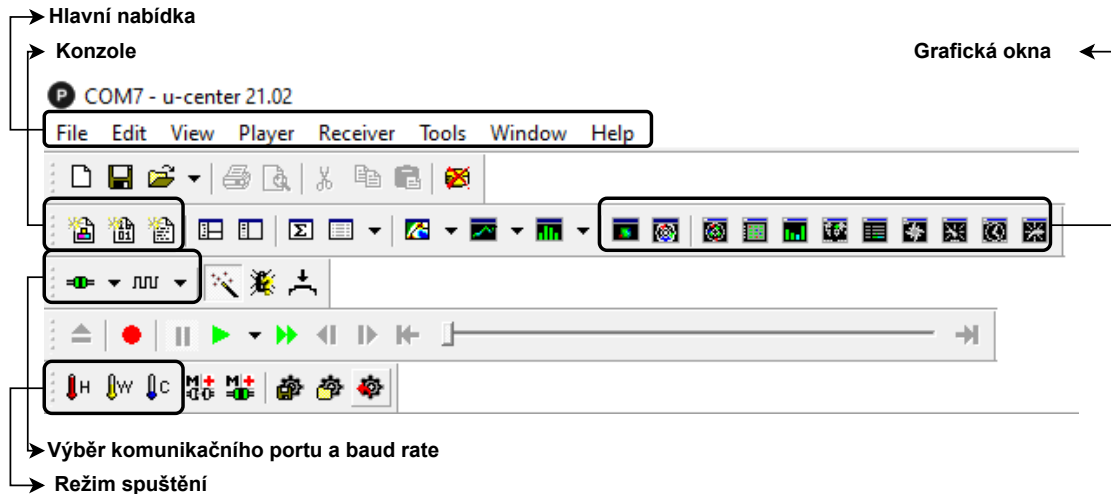
- **U-center**

Pro konfiguraci a vyhodnocení dat z přijímačů od firmy U-blox byl vytvořen software *u-center*. V současné době jsou dvě verze. Starší *u-center* je sice pomalejší a vzhledově neatraktivní, ale na rozdíl od novější verze *u-center2* má více ovládacích prvků a nástrojů. Zde si uvedeme pouze starší verzi, jelikož nová

je velice intuitivní. Program je, spolu s dokumentací, dostupný na:


<https://www.u-blox.com/en/product/u-center>

Po spuštění programu se nám otevře okno, kde horní část tvoří ovládací lišta a ve zbytku okna je prostor pro vybrané nástroje.



Obrázek 6.2: U-center - ovládací lišta, autor: Lukáš Běloch

Z nich určitě nejvíce zaujmou Grafická okna, která zobrazují skyplot, družice využitě při počítání polohy, poloha, rozptyl apod.

Pro kontrolu správné konfigurace jsou však vhodnější konzole, kde lze po stisknutí ikony  zobrazovat pouze jeden konkrétní typ zprávy.

Pro samotnou konfiguraci čipu z řady ZED-F9P využijeme záložku *View - Generation 9 Configuration View*.

V záložce základní konfigurace (*GNSS Configuration*) je možné nastavit pouze přijímané družicové systémy a jejich vlny. Pro provedení změny je třeba ji odeslat do paměti přijímače. Pokud chceme změnu aplikovat ihned, zvolíme možnost **RAM**. Ovšem zde je třeba dávat pozor, protože uložení do paměti RAM se po vypnutí zařízení vymaže. Pro změnu, která se projeví po restartu zařízení a zůstane v něm uložená, zaškrtneme možnost **Flash**. Tento přístup volíme i u pokročilého nastavení.



Obrázek 6.3: U-center - pokročilé nastavení, autor: Lukáš Běloch

V pokročilém nastavení přímo zadáváme, které typy zpráv budou na výstupu a na jakém portu. Ty nejdůležitější jsou popsány v kapitole 4.2. Při rozkliknutí vybrané zprávy, zvolíme, zda ji chceme zapnout nebo vypnout, nastavíme do paměti a pokračujeme na další zprávu. Po výběru všech požadovaných zpráv odešleme změny do přijímače. Konfiguraci je vhodné také uložit do textového souboru. Takto uložené nastavení můžeme kdykoliv jednoduše nahrát a navíc je v textovém souboru možné provádět rychlejší změny.

• Zápis hexadecimálním kódem

Pokud převedeme hexadecimální kód, vygenerovaný *u-centrem*, do bajtového pole, je možné konfigurovat přijímač přes příkazovou řádku. Hex kód z *u-centra* je nutno doplnit o hlavičku (příklad python: [44]). U kódu z *u-center2* stačí kód pouze převést (příklad Java: [45]).

Zápis výsledného configuračního souboru do přijímače:

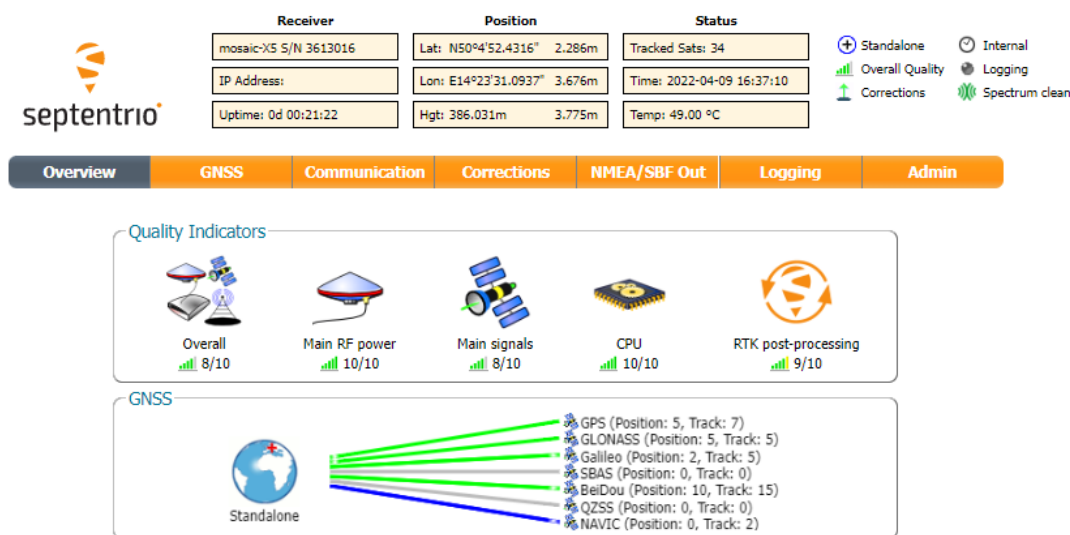
```
cat CFG-MSG-GGA-OFF.ubx > /dev/ttyACM0
```


6.2.2 Septentrio

• Septentrio Web Interface

Aplikaci otevíranou ve webovém prohlížeči, a tedy nezávislou na operačním systému počítače, hodnotím velice pozitivně. Tento prvek usnadňuje použití i na linuxových systémech. Aplikace je navíc velice intuitivní a snadno se s ní pracuje. Ke spuštění aplikace stačí po připojení zařízení otevřít <http://192.168.3.1/>.

Na hlavní stránce programu je zajímavý přehled o přijímaných družicích, různých připojeních a toku dat. Zaměříme-li se na horní část aplikace, uvidíme základní informace o zařízení, včetně polohy, a ovládací lištu.



Obrázek 6.4: Septentrio - náhled webové aplikace

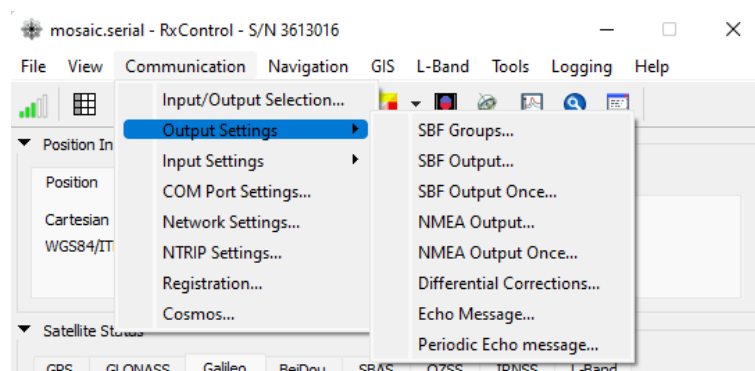
V jednotlivých záložkách najdeme:

- GNSS - nastavení módu (Statika, RTK), antény, jméno zařízení, agentury, informace o družicích, skyplot aj.
- Communication - nastavení ethernetu, TCP/IP portů, sériových portů, NTRIP casteru apod
- Corrections - nastavení vstupu a **výstupu korekcí (RTCM zpráv)**
- NMEA/SBF Out - nastavení výstupu NMEA a SBF (Septentrio Binary Format) zpráv
- Logging - vytváření záznamů měření
- Admin - správce zařízení a uživatelských profilů

• RxTools

Je program od společnosti Septentrio, který má velké množství nástrojů. Můžeme s ním konfigurovat přijímač, ukládat data, streamovat je, převádět na RINEX, lze nasimulovat viditelnost družic v místě a čase a naplánovat měření aj.

Pro konfiguraci přijímače použijeme nástroj RxControl. Nastavení se od webové aplikace liší pouze drobně. Pro výběr formátu zprávy a portu na kterém bude odesílána otevřeme záložku *Communication - Input/Output Selection*. Typ NMEA zprávy se volí v záložce *Communication - Output Settings - NMEA Output* a typ RTCM zprávy v *Communication - Output Settings - Differential Corrections*.



Obrázek 6.5: RxTool - náhled aplikace

6.3 Konfigurace minipočítače z řady Raspberry Pi

Nastavení minipočítače je popsáno v nesčetně návodech na internetu. Do Raspberry lze vybrat mezi několika operačními systémy. Zde byl zvolen Raspberry Pi OS, jelikož je spolehlivý, uživatelsky přívětivý a může být spuštěn i na deskách z řady ZERO. Jedná se o OS z rodiny Linux.

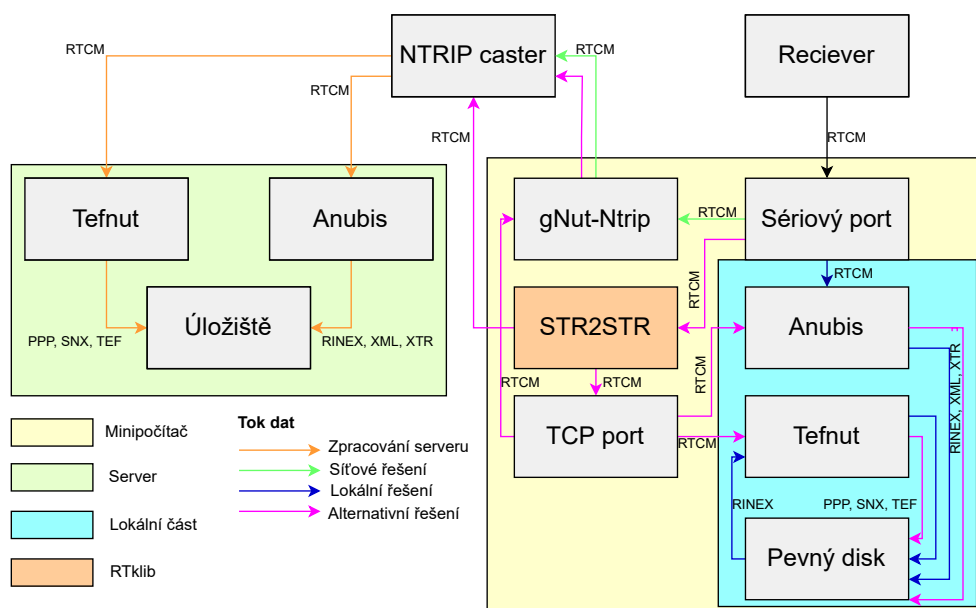
Po prvním spuštění sám systém provede uživatele základním nastavením. Pro tuto práci je navíc vhodné:

- povolit sériový port
- připojit k WiFi (k přístupu k zabezpečené síti postupujeme dle návodu [64])
- připravit *crontab* (automatické spouštění zadaných příkazů)
- aktivovat a nastavit VNC Server (pro vzdálený přístup)

6.4 Řešení s využitím G-NUT software

Ačkoliv všechny zdrojové kódy byly pro tuto práci autorovy plně k dispozici, **G-Nut** je nyní částečně komercializován, proto je zde uvedeno pouze schéma řešení a funkce jednotlivých částí konkrétní realizace Low-cost GNSS sensoru.

Realizováno bylo řešení se vzdáleným zpracováním dat, lokálním zpracováním dat i jejich kombinace. Jak je vidět z obr.6.6 hlavním rozdílem mezi řešeními je příjem dat koncových aplikací z rozdílných transportních komunikačních protokolů.



Obrázek 6.6: Schéma řešení - G-Nut, autor: Lukáš Běloch

- **gNut-Ntrip** - Nastaven přístup k sériovému nebo TCP portu, baud rate a údaje k přístupu na NTRIP caster.
- **STR2STR** - Nastaven přístup k sériovému portu, výstupnímu TCP portu a údaje k přístupu na NTRIP caster.
- **NTRIP caster** - Použitý je zde BKG Ntrip Caster. Pro seznámení byl vytvořen lokální caster a později byl použit online caster: <http://lotr.pecny.cz:2101/>.
- **Anubis** - V konfiguračním souboru je nastaven příslušný vstup (RTCM streamu), údaje k přístupu na NTRIP Caster, výstupní soubory (RINEX, XML, XTR), jejich umístění a hlavička RINEX souboru.
- **Tefnut** - V konfiguračním souboru je nastaven příslušný vstup (RINEX, RTCM stream), údaje k přístupu na NTRIP Caster, výstupní soubory (PPP, SNX2, TEF) a jejich umístění.

6.5 Řešení s využitím aplikace GNSS-logger

Pro naklonovanou aplikaci byla provedena instalace potřebných balíčků uvedených v souboru *requirements.txt*. V souboru aplikace *rinex_conv.py* bylo upraveno nastavení příkazu *convbin* tak, aby interval záznamu dat byl 5 sekund. V *crontabu* je pak příkaz pro spuštění aplikace po restartu:

```
@reboot python3 GNSS-logger/main.py -p /dev/ttyACM0
-b 9600 > $HOME/CRON/gnssl.log
```

Příkaz pro odstranění starších UBX souborů každou hodinu:

```
0 * * * * ls -t1 /home/pi/LOGS/Test/ | tail -n +3 |
xargs find /home/pi/LOGS/Test/ -name $1 | xargs sudo rm -r
> /dev/null
```

A poslední příkaz je ke spuštění jednoduchého skriptu, který po připojení externího disku překopíruje všechny RINEXy a následně je v Raspberry Pi smaže.

```
@reboot transferData > /dev/null

#!/bin/bash
#transferData by Lukas Beloch, 2022
ODIR="/media/pi/DATADRIVE" #name of flash drive
IDIR="/home/pi/RINEX/Test" #folder with RINEX
while true; do #loop
    if [ -d "$ODIR" ]; then #check if flash drive connected
        mkdir -p "$ODIR/RINEX" #make dir if not exist
        cp -n "$IDIR/"* "$ODIR/RINEX/" #copy files
        for file in "$IDIR"/*; do #check if transfer was ok
            if [[ -f "$ODIR/RINEX/${file##*/}" ]]; then
                rm -r $file #delete transfered files
            fi
        done
        echo "DONE"
    fi
    sleep 1
done
```

7 Testování

Pro zjištění vlastností sestav, softwaru a dat bylo provedeno následujících testů.

7.1 Test funkčnosti zařízení

Zadání

Tento test má za cíl ověřit fungování následujících položek:

1. Komunikace mezi minipočítačem a přijímačem
2. Zpracování dat G-Nut Software
3. Zpracování dat GNSS-logger

Parametry testu

Datum testu	10.1. - 28.2 2022
Označení sestavy	LOWCOST
Umístění	Praha - Strahov, parapet okna, směr sever
Přijímač	SPARKFUN ZED-F9P
Anténa	ANN-MB-00-00
Uchycení antény	magneticky
Počítač	Raspberry Pi Zero W
Software	gpsd, G-Nut, RTKLIB, GNSS-logger

Tab. 7.1: Parametry testu 7.1

Výsledky

1. Komunikace mezi minipočítačem a přijímačem byla úspěšně ověřena funkcí *gpsmon* z knihovny *gpsd*. Data byla zobrazována a kontrolována v terminálovém okně.
2. V první části se povedlo pomocí SW *G-Nut* přečíst data ze sériového portu a data dále byla odesílána na caster. Bohužel bylo zjištěno, že data získaná zpětně z casteru nejsou kompletní. Problém byl reportován a debugován, avšak ke konci tohoto testu nebyl zcela opraven.

Pro další odesílání byla použita funkce *str2str* z knihovny *RTKLIB*.

Přijímaná data byla v tomto případě v pořádku.

Test rinexování aplikací *G-Nut Anubis-RT* byl zdařilý. Vytvořené RINEXy obsahovaly měřená data.

3. Funkčnost aplikace *GNSS-logger* byla ověřena. RINEXy byly kompletní.

7.2 Test kvality dat

Zadání

Tento test má za cíl sběr dat pro:

1. Vyhodnocení a porovnání kvality dat paralelních měření různých sestav, porovnání s permanentní stanicí GOPE
2. Zjištění polohové přesnosti sestav při použití metody statické metody

Parametry testu

Datum testu	2.3 - 2.4 2022
Označení sestavy 1	GOPB
Umístění	GO Pecný, vyztužený komín
Přijímač	simpleRTK2B ZED-F9P
Anténa	AS-ANT2B-SUR
Uchycení antény	trojnožka zapuštěná v komínu
Počítač	Raspberry Pi Zero 2 W (Wi-Fi)
Označení sestavy 2	GOPC
Umístění	GO Pecný, vyztužený komín
Přijímač	SPARKFUN ZED-F9P
Anténa	ANN-MB-00-00
Uchycení antény	magneticky na zatížené podložce
Počítač	Raspberry Pi Zero W (Wi-Fi)
Software	G-Nut, RTKLIB

Tab. 7.2: Parametry testu 7.2

Výsledky

Sběr dat proběhl hladce, nad rámec očekávání. Výstupem testu jsou soubory ve formátu RINEX, které budou dále zpracovány a vyhodnoceny. Výsledky testu budou uvedeny v kapitole 8.



Obrázek 7.1: Test 7.2 - umístění antén, autor: Lukáš Běloch

7.3 Test pokročilých funkcí

Zadání

Tento test má za cíl ověřit:

1. Zpracování dat pomocí SW G-Nut přímo na minipočítači v sestavě
2. Odesílání dat na FTP server s využitím GNSS-logger
3. Možnost připojení více přijímačů k jednomu minipočítači
4. Možnost využití desky s modulem Septentrio mosaic-X5

Parametry testu

Datum testu	17.3 - 2.4 2022
Označení sestavy 1	GOPD
Umístění	Praha - ČVUT, FSv, střecha budovy B
Přijímač	simpleRTK2B ZED-F9P
Anténa	ANN-MB-00-00
Uchytení antény	magneticky na plechové střeše
Software	RTKLIB, GNSS-logger
Označení sestavy 2	GOPS
Umístění	Praha - ČVUT, FSv, střecha budovy B
Přijímač	simpleRTK3B Mosaic-X5
Anténa	TOP106
Uchytení antény	magneticky na plechové střeše
Software	G-Nut
Počítač	Raspberry Pi 4 2GB (ethernet)

Tab. 7.3: Parametry testu 7.3

Výsledky

1. Zpracovávání dat pomocí SW *G-Nut* na minipočítači bylo ověřeno jako funkční. V průběhu se ovšem vyskytovaly problémy. Prvním z nich byla nemožnost sestavení kódu knihovny *G-Nut* pomocí doporučeného systému *JamPlus*. Důvodem nejspíše bylo, že tento systém neumí pracovat s architekturou procesoru Raspberry Pi. Problém byl vyřešen použitím staršího typu systému *Jam*. Problémy s rozdílnou architekturou se drobně vyskytovaly i při práci s nástroji *G-Nut*. Ty byly reportovány vývojářům.

Hlavní náplň testu proběhla úspěšně, sledované využití CPU a RAM počítače softwarem *G-Nut* bylo velice mírné a software tak po celou dobu testu bez problému běžel a neznemožňoval ani spuštění jiných programů.

2. Podařilo se ověřit možnost aplikace *GNSS-logger* odesílat data na FTP server. Z testu vyplývá, že kvůli paměti počítače je důležitý odhad počtu měřených dní, jinak dojde ke ztrátě dat.
3. Tento test byl překvapivě úspěšný. Minipočítač zvládal samostatně napájet přijímače a data v pořádku přijímat a rozřazovat tak, že nedošlo k žádné ztrátě.
4. Při tomto testu nebyl využit plný potenciál desky, ale bylo ověřeno, že lze desku, bez jakýkoliv změn v sestavě, použít.

8 Analýza a zpracování dat

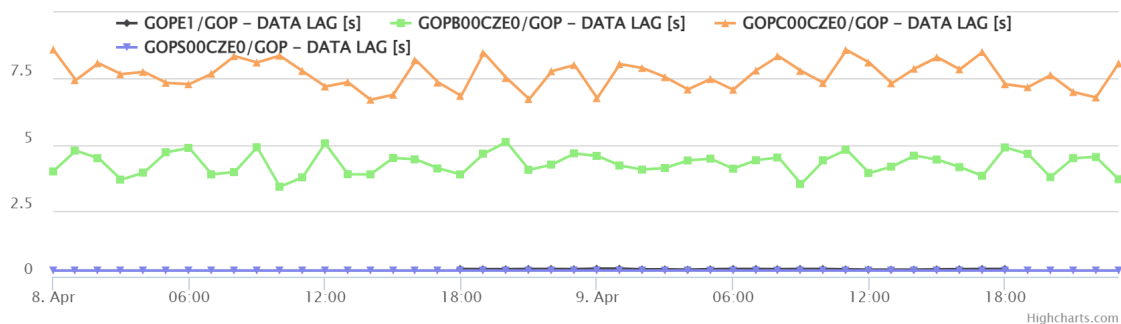
Tato kapitola se zabývá vyhodnocením kvality měřených hodinových dat, porovnáním s daty z permanentních stanic GOPE a GOP6 a zpracováním dat do podoby užitečných výsledků.

8.1 Časové zpoždění příchozích dat

Při práci s daty na vzdáleném serveru je důležitým parametrem, zejména při zpracování v reálném čase, jejich časové zpoždění. Graf 8.1 toto zpoždění ukazuje. Jedná se o rozdíl času měřené epochy a čas serveru v momentu příjmu zprávy dekodérem *G-Nut/Anubis*.

Zatímco u stanice GOPS s přijímačem od firmy Septentrio je zpoždění podobné stanici GOPE stabilně okolo 0.3 vteřiny, u stanic GOPB a GOPC s přijímači od firmy U-Blox se pohybuje v rozmezí několika sekund. Mohlo by se zdát, že problém souvisí s použitým minipočítačem či způsobem připojení k internetu. Toto bylo však vyvráceno pokusem, kdy do Raspberry Pi 4B připojeného do sítě Wi-Fi byly zapojeny dva přijímače a antény použité u stanic GOPB a GOPS. Zpoždění bylo u stejných sestav totožné jako v předchozích měřeních.

Po rozsáhlejší analýze a pozorování příchozích dat bylo zjištěno, že časy epoch jednotlivých systémů z přijímače U-Blox se často liší v 1 milisekundě. SW *Anubis* však tyto epochy považoval za jiné a čekal na správnou epochu. Pokud se ji nedočkal, po intervalu 10 sekund uložil správně přijaté epochy. Výsledné zpoždění je pak průměrem kompletních epoch a epoch, kde jeden nebo více systémů (nejčastěji GLONASS) mělo odlišný čas epochy.

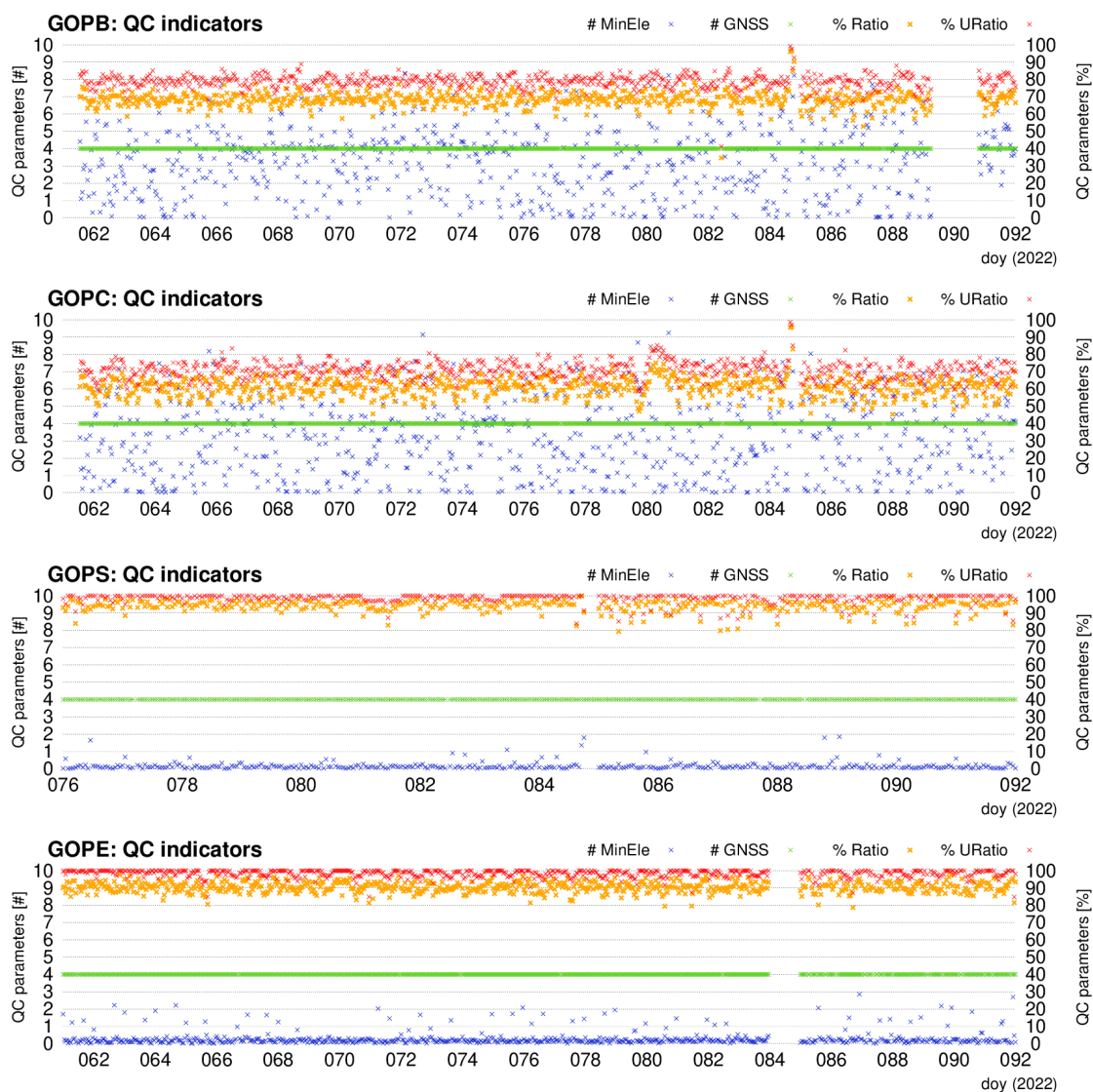


Obrázek 8.1: Časové zpoždění příchozích dat

8.2 Parametry kvality dat

Hodnocení kvality dat a zjišťování příčin problému bylo provedeno na základě těchto indikátorů získaných použitím SW *Anubis*:

- **MinEle** - nejnižší elevační úhel sledovaných družic
- **GNSS** - počet použitých družicových systémů
- **Ratio** - poměr očekávaných observací ku měřeným observacím
- **URatio** - poměr očekávaných observací ku měřeným observacím nad elevační maskou (10°)



Obrázek 8.2: Zobrazení indikátorů kvality stanic

8.2.1 Porovnání GOPB a GOPC

Totožné: místo, přijímač, připojení k internetu. **Rozdílné:** anténa, počítač. Indikátory kvality těchto dvou Low-cost stanic jsou si velice podobné.

- **MinEle** - Nejnižší zaznamenaná elevace družice se pohybuje různě v intervalu 0-10°. Z tohoto testu lze usoudit, že obě antény mají buď zakrytý výhled nad celým obzorem, nebo antény či přijímače nejsou schopny správně přijímat signál o nízkých elevačních úhlech.
- **Ratio/URatio** - Zde se ukazuje, že lepší anténa na stanici GOPB má výrazný vliv na počet observací. Měřených observací je v průměru o 10% více, navíc jejich počet je stabilnější, *Ratio* zde vykazuje menší rozptyl. Přesto je u stanice GOPB *URatio* na hodnotě cca 80%, což by mohlo ukazovat na zakrytí výhledu, či jiný problém GNSS zařízení.

8.2.2 Porovnání GOPB a GOPS

Podobné: anténa. **Rozdílné:** místo, přijímač, počítač, připojení k internetu. Rozdíl v kvalitě dat Low-cost stanic jiných značek je výrazný.

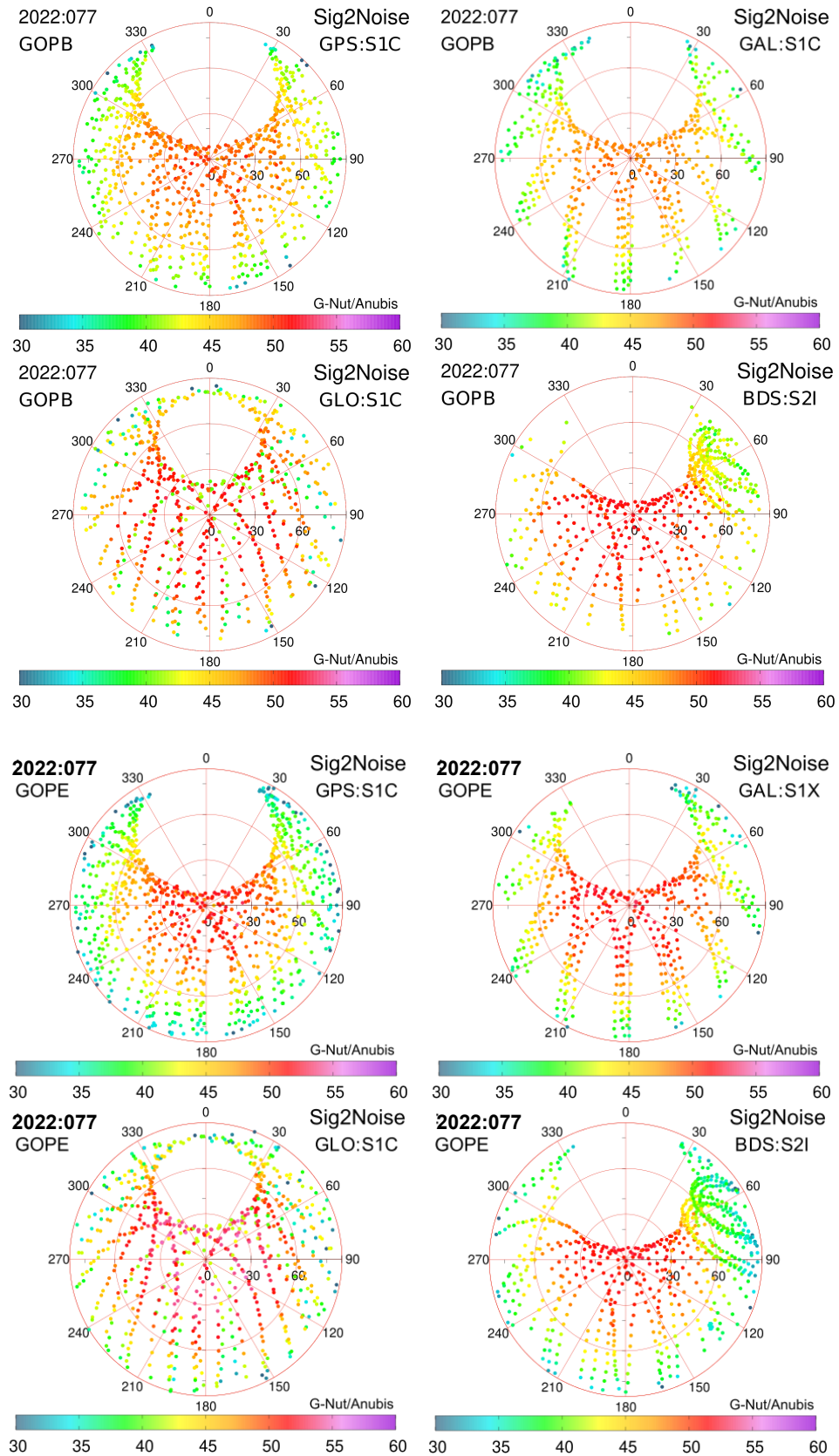
- **MinEle** - Stanice GOPS přijímá data z družic o nízkých elevacích. Antény obou stanic jsou si svými parametry velice podobné, proto můžeme nemožnost antény přijímat data o nízkých elevačních úhlech vyloučit.
- **Ratio/URatio** - Jelikož hodnoty stanice GOPS se pohybují nad 90%, můžeme i zde vyloučit možnost, že se problém vyskytuje u antény stanice GOPB.

8.2.3 Porovnání GOPB a GOPE

Totožné: místo. **Rozdílné:** přijímač, anténa, počítač, připojení k internetu. Na porovnání s mezinárodní referenční stanicí GOPE lze nejlépe demonstrovat kvalitu dat Low-cost zařízení.

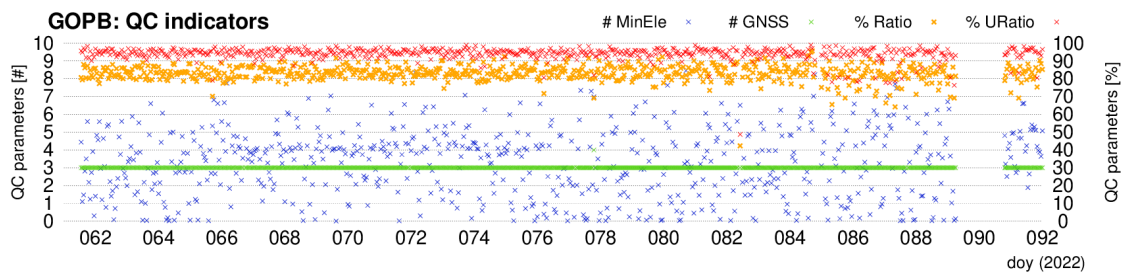
- **MinEle** - Z tohoto porovnání vyplývá, že velký rozptyl minimálních elevací není způsoben omezeným výhledem, ale problém spočívá v samotném přijímači. Z obrázku 8.3 je vidět, že přijímač stanice GOPB neregistruje signály družic s nízkým SNR, které se často vyskytují blízko obzoru.

Singal to noise ratio



Obrázek 8.3: GOPB, GOPE: Skyplot - SNR

- Ratio/URatio** - I zde budeme hledat problém v přijímači. Pokud nahlédneme do samotných souborů kvality ve formátu XTR, zjistíme, že celkově nízké *Ratio/URatio* je způsobené tím, že zařízení není schopné správně měřit signály ze systému BDS. To je navíc umocněno viditelností družic systému BDS-2 umístěných na geosynchronní orbitě (IGSO). Očekávaných observací u tohoto systému je proto mnohem více. *Ratio* bez systému BDS je zobrazeno v obr. 8.4

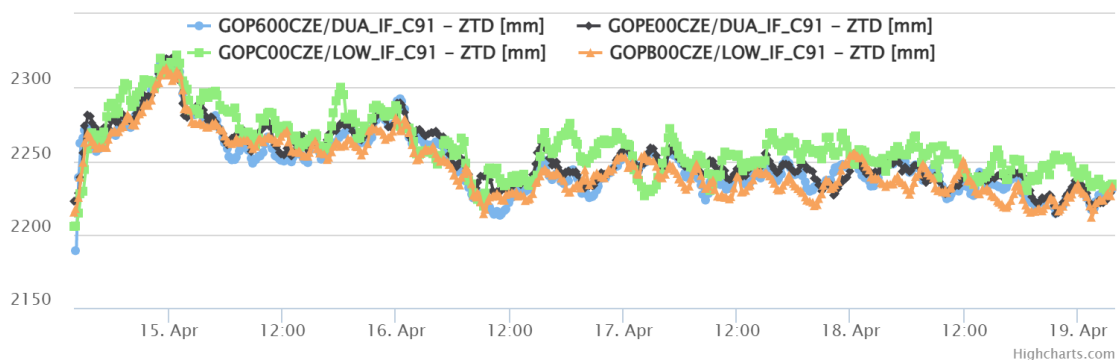


Obrázek 8.4: QC - GOPB (GPS, GLO, GAL)

8.3 Parametry troposféry

Obrázek 8.5 zobrazuje graf ZTD počítaný SW *G-Nut/Tefnut* z dat jednotlivých stanic. Pro eliminaci vlivu ionosféry je zde použita kombinace "iono free".

Pro ověření vhodnosti Low-cost stanic pro tuto aplikaci, jsou data z nich srovnávána s permanentními stanicemi GOPE a GOP6, které k tomuto účelu slouží již delší dobu. Z grafu je patrné, že stanice GOPB, až na nějaké drobné odchylky, kopíruje hodnoty referenčních stanic. U stanice GOPC, jejíž součástí je méně kvalitní anténa ANN-MB-00, jsou odchylky vyšší a hodnoty se často úplně vychylují od ostatních stanic.



Obrázek 8.5: Parametry troposféry - ZTD

8.4 Poloha a její přesnost

V desktopové verzi programu *RTKPOST* z knihovny *RTKLIB* byla spočtena denní poloha GNSS zařízení a určena její přesnost. Bylo voleno dva přístupy:

- **Statická metoda**

Výpočty probíhaly pro hodinová řešení s využitím systémů GPS, Galileo a BDS . Poloha stanic byla určena dvěma výpočty. První využívá referenční stanici GOPE a druhý referenční stanici CPRG, obě dvě jsou ze sítě CZEPOS. GOPE, B = 49° 54' 49.33285" N, L = 14° 47' 08.23214" E, Hel = 592.594 m CPRG, B = 50° 07' 30.82619" N, L = 14° 27' 21.80473" E, Hel = 356.025 m

- **Metoda PPP** Výpočty probíhaly pro 5 minutová řešení s využitím systémů GPS, Galileo.

Konfigurace výpočtů jsou uvedeny v přílohách.

Výpočet	Zem. šířka - B [°,N]	Zem. délka - L [°,E]	Výška - Hel [m]	σ_N [mm]	σ_E [mm]	σ_U [mm]	fix %
GOPE	49°54'49.20039"	14°47'08.19941"	592.653	2.8	2.0	6.3	26
CPRG	49°54'49.20097"	14°47'08.19694"	592.619	4.6	4.5	37	9
PPP	49°54'49.21892"	14°23'08.23263"	592.450	2.3	7.2	14	X

Tab. 8.1: Poloha stanice GOPC

Výpočet	Zem. šířka - B [°,N]	Zem. délka - L [°,E]	výška - Hel [m]	σ_N [mm]	σ_E [mm]	σ_U [mm]	fix %
GOPE	49°54'49.20495"	14°47'08.22004"	592.846	0.6	1.6	2.8	79
CPRG	49°54'49.20520"	14°47'08.22018"	592.787	3.8	4.8	26	74
PPP	49°54'49.22392"	14°47'08.25225"	592.769	1.1	4.8	8.3	X

Tab. 8.2: Poloha stanice GOPB

Výpočet	Zem. šířka - B [°,N]	Zem. délka - L [°,E]	výška - Hel[m]	σ_N [mm]	σ_E [mm]	σ_U [mm]	fix %
GOPE	50°06'14.01173"	14°23'16,21509"	305.384	3.3	7.2	26	61
CPRG	50°06'14.01206"	14°23'16,21523"	305.311	1.5	1.7	4.5	83
PPP	50°06'14.03038"	14°23'16.24752"	305.352	1.0	2.4	4.4	X

Tab. 8.3: Poloha stanice GOPS

Výpočet	Zem. šířka - B [°,N]	Zem. délka - L [°,E]	výška - Hel[m]	σ_N [mm]	σ_E [mm]	σ_U [mm]	fix %
GOPE	50°06'14.02021"	14°23'16,21163"	305.242	6.8	2.7	4.9	30
CPRG	50°06'14.01984"	14°23'16.21055"	305.192	4.0	5.3	49	50

Tab. 8.4: Poloha stanice GOPD

Výpočet	Zem. šířka - B [°,N]	Zem. délka - L [°,E]	výška - Hel[m]	σ_N [mm]	σ_E [mm]	σ_U [mm]	fix %
CPRG	49°54'49.32703"	14°47'08.22554"	592.861	6.4	5.4	25	59
PPP	49°54'49.34534"	14°47'08.25775"	592.619	1.0	2.3	3.4	X

Tab. 8.5: Poloha stanice GOPE

Z tabulek stanice lze vyčíst, že při využití statické metody vzdálenost referenční stanice významně ovlivňuje konečnou polohu roveru, přesnost určení této pozice a počet fixních měření. Nejméně přesně, i vzhledem k počtu fixovaných měření, určují pozici stanice GOPC a GOPD, které využívaly anténu ANN-MB-00. Stanice GOPS a GOPB vykazují podobnou přesnost jako profesionální stanice GOPE.

Výpočet polohy metodou PPP se od statické metody liší v centimetrech. U všech stanic je rozdíl přibližně stejný a bude spočívat v samotné podstatě metody, či způsobu konfigurace. Stanice GOPD zpracovávala pouze jednofrekvenční měření, a proto u ní nemohla být (při dané konfiguraci) využita metoda PPP.

Závěr

Hlavní cílem práce bylo navrhnout a realizovat autonomní Low-cost GNSS zařízení pro potřeby určení polohy a parametrů atmosféry. Součástí práce je popis technologie GNSS, popis používaných komunikačních protokolů a formátů, návrh GNSS senzorů pro různé aplikace, samotná realizace GNSS zařízení, jeho testování a analýza dat.

V průběhu testování byly upravovány a zdokonalovány používané softwary tak, aby je bylo možné používat na Low-cost komponentech. V této části bylo největším úspěchem nasazení SW *G-Nut* na počítač Raspberry Pi a opravy chyb související s nedokonalostí nízkonákladových přijímačů. To probíhalo v součinnosti s vývojáři.

Pro účely sběru dat a hlavního testování byly realizovány čtyři odlišné GNSS sestavy. Sestavy se lišily v použitém přijímači, anténě, počítači, softwaru nebo umístění. Data těchto stanic byla analyzována. Hodnocena byla kvalita GNSS dat, přesnost v určení pozice a možnost použití realizovaných zařízení pro určení parametrů troposféry. Z této analýzy vyplývá vhodnost jednotlivých komponent a konfigurací sestav. Nejméně vhodné jsou pro tuto práci sestavy s anténou AN-MB-00. Přijímač s modulem mosaic-X5 od firmy Septentrio vykazoval velmi dobré výsledky a v průběhu práce s ním nebyly žádné komplikace. U přijímače s modulem ZED-F9P od firmy U-blox se objevovaly problémy, zejména pak v kvalitě dat, ale ve výsledku je modul ZED-F9P pro aplikaci řešeného tématu vhodný. Pokud uvážíme i cenu komponent, nejlepší GNSS zařízení pro tento projekt je ve složení: přijímač s modulem ZED-F9P, anténa ANT2B-SUR a počítač Raspberry Pi 2W. Celková cena této sestavy je přibližně 8 500 Kč.

Obsah této diplomované práce a její výsledky budou sloužit jako základ pro budoucí, složitější projekty využívající Low-cost GNSS zařízení.

Seznam zkratek

ARP	Antenna Reference Point - Referenční bod antény
APC	Antenna Phase Center - Fázové centrum antény
BDS	BeiDou - Globální navigační družicový systém (CN)
DGNSS, DGPS	Differential GNSS (GPS) - Diferenciální GNSS (GPS)
DOP	Dilution of precision - Snížení přesnosti v závislosti na geometrické konfiguraci družic
GEO	Geostationary orbit - Geostacionární dráha
GLONASS	Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistema - Globální navigační družicový systém (Ruská federace)
GNSS	Global Navigation Satellite Systems - Globální navigační družicové systémy
GOP	Geodetická observatoř Pecný
GPS	Global Positioning System - Globální polohový systém (USA)
HDOP	Horizontal DOP - Horizontální DOP
HTTPS	Hypertext Transfer Protocol Secure - Protokol umožňující zabezpečenou komunikaci v počítačové síti
ID	Identification - Identifikace
ITU	The International Telecommunication Union - Mezinárodní telekomunikační unie
LOS	Line-of-sight - Přímá viditelnost
MEO	Medium Earth Orbit - Střední oběžná dráha
MSM	The Multiple Signal Messages - Observační zprávy pro GNSS
NMEA	National Marine Electronics Association - Národní sdružení pro loďní elektroniku

PCO	Phase Center Offset - Fázové centrum antény
PCV	Phase Center Variation - Variace fázového centra
PDOP	Position DOP - Prostorový DOP
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services - Radiotechnická komise pro námořní služby
RAM	Random Access Memory - Polovodičová paměť s přímým přístupem
SSH	Secure Shell - Zabezpečený komunikační protokol v počítačových sítích
TEC	Total electron content - Celkový obsah elektronů
TTF	Time to first fix - Čas do prvního fixu
UTC	Coordinated Universal Time - Koordinovaný světový čas
VDOP	Vertical DOP - Vertikální DOP
VESOG	Výzkumná a experimentální síť pro observace s GNSS
VÚGTK	Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický

Literatura

- [1] ALKAN, Reha et al. Usability of GNSS Technique for Cadastral Surveying. 04 2015.
- [2] ASHTECH. *ProFlex™ Lite Series Reference manual*, 4 2011. Dostupné z: https://manualzz.com/doc/o/cstp0/pflite_rm_en_c.pdf-nme--enabling-disabling-nmea-messages.
- [3] DAVID ZAHRADNÍK, Štěpán Hodík Z. V. UBLOX F9P FOR GEODETIC MEASUREMENT. *The Civil Engineering Journal*. 2022.
- [4] DAWOUD, Safaa. GNSS principles and comparison. *Potsdam University*. 2012. Dostupné z: https://www.snet.tu-berlin.de/fileadmin/fg220/courses/WS1112/snet-project/gnss-principles-and-comparison_dawoud.pdf.
- [5] DOUŠA, Jan et al. European GNSS troposphere monitoring for meteorological applications. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. nov 2021, 906, č. 1, s. 012058. doi: 10.1088/1755-1315/906/1/012058. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/906/1/012058>.
- [6] DOUŠA JAN, Václavovic Pavel. *G-Nut/Anubis*, 1 2020. Dostupné z: https://gnutsoftware.com/themes/gnut/assets/files/anubis_manual.pdf?v3.
- [7] HOFMANN-WELLENHOF, Bernhard; LICHTENEGGER, Herbert a WASLE, Elmar. *GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [8] ING. JAKUB KOSTELECKÝ, Ph.D. Teoretická geodézie 2, GNSS signály a přijímač. ČVUT Praha, 2020.
- [9] JAN, Šíkola. Testování GNSS modulu Ublox 9. generace. Master's thesis, České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum., 2020.
- [10] KARAIM, Malek et al. GNSS error sources. *Multifunctional Operation and Application of GPS*. 2018, s. 69–85.
- [11] KHAN, Rafiullah et al. Acquisition strategies of GNSS receiver. In: *International Conference on Computer Networks and Information Technology*. IEEE,

2011. s. 119–124. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6020917>.
- [12] KRATOCHVÍL, Vlastimil. GE07 Geodézie III. 2012. Dostupné z: https://www.fce.vutbr.cz/ged/opvk/inovace/blok_C/GE07/Texty_GNSS.pdf.
- [13] KRATOCHVÍL, Vlastimil. *Geodézie III, Globální navigační satelitní systémy (GNSS)* [online]. [cit. 28-03-2022]. Dostupné z: https://www.fce.vutbr.cz/ged/opvk/inovace/blok_C/GE07/Texty_GNSS.pdf.
- [14] KUNYSZ, Waldemar. Antenna phase center effects and measurements in GNSS ranging applications. In: *2010 14th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics & the American Electromagnetics Conference*. IEEE, 2010. s. 1–4.
- [15] MEMARZADEH, Yahya. *Ionospheric modeling for precise GNSS applications*. Citeseer, 2009.
- [16] NOSEK, Jakub. Testování metody Precise Point Positioning. Master's thesis, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav geodézie, Brno, 2020. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/191184>. Diplomová práce.
- [17] PURFÜRST, Thomas. Evaluation of Static Autonomous GNSS Positioning Accuracy Using Single-, Dual-, and Tri-Frequency Smartphones in Forest Canopy Environments. *Sensors*. 2022, 22, č. 3. ISSN 1424-8220. doi: 10.3390/s22031289. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/3/1289>.
- [18] RAO, B Rama; MCDONALD, K a KUNYSZ, Waldemar. *GPS/GNSS Antennas*. Artech House, 2013.
- [19] RUSTAMOV, Rustam B a HASHIMOV, Arif M. *Multifunctional Operation and Application of GPS*. BoD–Books on Demand, 2018.
- [20] SEPTENTRIO. *Mosaic-X5*, 9 2021. Dostupné z: <https://www.septentrio.com/en/products/gnss-receivers/gnss-modules/mosaic#specifications-datasheet>.
- [21] ŠTĚPÁN, Hodík. Vývoj nízkonákladového GNSS zařízení. Master's thesis, České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum., 2019.

- [22] ŠTRONER, Martin. Globální navigační satelitní systémy (GNSS). *České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební*. 2008, [cit. 29-03-2022]. Dostupné z: https://k154.fsv.cvut.cz/wp-content/uploads/2022/01/GNSS_obs.pdf.
- [23] TEUNISSEN, Peter JG a MONTENBRUCK, Oliver. *Springer handbook of global navigation satellite systems*, 10, 1.2.4. Springer, 2017.
- [24] TEUNISSEN, Peter JG a MONTENBRUCK, Oliver. *Springer handbook of global navigation satellite systems*. 10. Springer, 2017.
- [25] TICHÝ, Tomáš. ZPRACOVÁNÍ KÓDOVÝCH MĚŘENÍ GLOBÁLNÍCH NAVIGAČNÍCH SYSTÉMŮ. *Katedra vyšší geodézie, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze*. [cit. 29-03-2022]. Dostupné z: <https://mat.fsv.cvut.cz/komisevstev/18sk/files/tichy.pdf>.
- [26] U-BLOX. *ZED-F9P module*, 2022. Dostupné z: <https://www.u-blox.com/en/product/zed-f9p-module#tab-documentation-resources>.
- [27] VOJTEK, David. *Formáty a komunikační protokoly, GLOBÁLNÍ NAVIGAČNÍ A POLOHOVÉ SYSTÉMY* [online]. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. [cit. 28-02-2022]. Dostupné z: https://geoinformatika-1.vsb.cz/vojtek/content/gnps/files/_prez/09/09_prezentace.pdf.
- [28] WÜBBENA, Gerhard et al. Absolute GNSS antenna calibration with a robot: repeatability of phase variations, calibration of GLONASS and determination of carrier-to-noise pattern. In: *Proceedings of the IGS Workshop*. 2006. s. 8–12.
- [29] ZDENĚK LUKEŠ, Leoš Mervart. *Metoda PPP s řešením ambiguit v reálném čase* [online]. 2013. Dostupné z: <https://starfos.tacr.cz/cs/result/RIV%2F68407700%3A21110%2F13%3A00203527#result-main>.
- [30] *u-blox GNSS Multiband antenna ANN-MB-00 (IP67)* [online]. [cit. 09-03-2022]. Dostupné z: <https://www.ardusimple.com/product/ann-mb-00-ip67/>.
- [31] *Survey GNSS Multiband antenna (IP66)* [online]. [cit. 09-03-2022]. Dostupné z: <https://www.ardusimple.com/product/survey-gnss-multiband-antenna/>.

- [32] *BeiDou Navigation Satellite System* [online]. [cit. 25-03-2022]. Dostupné z: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/System/>.
- [33] *C099-F9P Application Board* [online]. [cit. 09-03-2022]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/u-blox/C099-F9P-0?qs=DPoM0jnrROUhCVovuHN3bg%3D%3D>.
- [34] *Navipedia. GNSS Science Support Centre / GSSC* [online]. [cit. 28-03-2022]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Main_Page.
- [35] *GNSS Constellations, Radio Frequencies and Signals, Tallysman* [online]. [cit. 02-04-2022]. Dostupné z: <https://www.tallysman.com/gnss-constellations-radio-frequencies-and-signals/>.
- [36] *File Transfer Protocol - Wikiwand* [online]. [cit. 08-03-2022]. Dostupné z: https://www.wikiwand.com/en/File_Transfer_Protocol.
- [37] *European GNSS Service Centre* [online]. [cit. 25-03-2022]. Dostupné z: <https://www.gsc-europa.eu/galileo>.
- [38] *Aplikační centrum GLONASS* [online]. [cit. 25-03-2022]. Dostupné z: https://www.glonass-iac.ru/en/about_glonass/.
- [39] *DilnaC004/GNSS-logger, GitHub* [online]. Dostupné z: <https://github.com/DilnaC004/GNSS-logger>.
- [40] *G-Nut Software s.r.o.* [online]. Dostupné z: <https://gnutsoftware.com/>.
- [41] *Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics* [online]. [cit. 25-03-2022]. Dostupné z: <https://www.gps.gov/systems/gps/>.
- [42] *Global Positioning System - Wikipedia.* [online]. [cit. 25-03-2022]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System.
- [43] *Raspberry Pi 4 Model B - 2GB RAM* [online]. [cit. 09-03-2022]. Dostupné z: <https://www.ardusimple.com/radio-links/>.
- [44] *Neo FreeRunner GPS - Openmoko* [online]. [cit. 10-04-2022]. Dostupné z: http://wiki.openmoko.org/wiki/Neo_FreeRunner_GPS#Basic_Setup.

- [45] *Convert Hex String to byte Array in Java* [online]. [cit. 10-04-2022]. Dostupné z: <https://www.tutorialspoint.com/convert-hex-string-to-byte-array-in-java>.
- [46] *Komunikační protokoly* [online]. [cit. 28-02-2022]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/do/ics/el/sitmu/law/html/komunikacni-protokoly.html>.
- [47] *GPSD - NMEA* [online]. [cit. 28-02-2022]. Dostupné z: <https://gpsd.gitlab.io/gpsd/NMEA.html>.
- [48] *GNSS Science Support Centre / GSSC* [online]. [cit. 10-04-2022]. Dostupné z: <https://gssc.esa.int/wp-content/uploads/2018/07/NtripDocumentation.pdf>.
- [49] *Raspberry Pi Zero W* [online]. [cit. 09-03-2022]. Dostupné z: <https://rpishop.cz/zero/647-raspberry-pi-zero-w-4053199547425.html>.
- [50] *Raspberry Pi Zero 2 W* [online]. [cit. 09-03-2022]. Dostupné z: <https://rpishop.cz/zero/4311-raspberry-pi-zero-2-w-5056561800004.html>.
- [51] *Raspberry Pi 4 Model B - 2GB RAM* [online]. [cit. 09-03-2022]. Dostupné z: <https://rpishop.cz/raspberry-pi-4b/1599-raspberry-pi-4-model-b-2gb-ram-765756931175.html#description-anchor>.
- [52] *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11* [online]. Dostupné z: <https://files.igs.org/pub/data/format/rinex211.txt>.
- [53] *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 3.04* [online]. Dostupné z: <https://files.igs.org/pub/data/format/rinex304.pdf>.
- [54] *RTCM* [online]. [cit. 28-02-2022]. Dostupné z: <https://www.rtcn.org/>.
- [55] *Výukové materiály Geoinformatika* [online]. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. [cit. 28-02-2022]. Dostupné z: <https://geoinformatika-1.vsb.cz/pmzgnss/cv05/cv05.html>.
- [56] *RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning* [online]. Dostupné z: <http://www.rtklib.com/>.

- [57] *simpleRTK2B-F9P V3* [online]. [cit. 09-03-2022]. Dostupné z: <https://www.ardusimple.com/product/simplertk2b-f9p-v3/>.
- [58] *simpleRTK3B Pro* [online]. [cit. 09-03-2022]. Dostupné z: <https://www.ardusimple.com/product/simplertk3b-x5/>.
- [59] *SNIP - RTCM 3 Message List* [online]. Copyright © SubCarrier Systems Corp. [cit. 28-02-2022]. Dostupné z: <https://www.use-snip.com/kb/knowledge-base/rctm-3-message-list/>.
- [60] *SparkFun GPS-RTK-SMA Breakout - ZED-F9P (Qwiic)* [online]. [cit. 09-03-2022]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/16481>.
- [61] *TCP/IP – Wikipedie* [online]. [cit. 09-03-2022]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/TCP/IP>.
- [62] *Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí* [online]. [cit. 25-03-2022]. Dostupné z: <http://www.slovníkcuzk.eu/index.php>.
- [63] *GNSS Multi-Band L1/L2 Surveying Antenna (TNC) - TOP106* [online]. [cit. 14-03-2022]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/17751>.
- [64] *HOWTO Connect Raspi to eduroam* [online]. [cit. 10-04-2022]. Dostupné z: <https://inrg.soe.ucsc.edu/howto-connect-raspberry-to-eduroam/>.
- [65] *Anténa – Wikipedie* [online]. [cit. 28-03-2022]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Ant%C3%A9na>.
- [66] *Xbee* [online]. [cit. 09-03-2022]. Dostupné z: <https://www.ardusimple.com/product/raspberry-adapter-for-simplertk2b/>.

A Seznam příloh

A.1 Elektronické přílohy

Příloha 1: Konfigurační soubory přijímače U-Blox - Ublox.zip

Příloha 2: Testovací data ve formátu RINEX - Data.zip

Příloha 3: Soubory obsahující kvalitu dat - QC.zip

Příloha 4: Konfigurace RTKlib static - stat.conf

Příloha 5: Konfigurace RTKlib static - ppps.conf