



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

VYUŽITÍ LEVNÉHO GPS PŘIJÍMAČE K PŘESNÉMU NAVEDENÍ NA PŘISTÁNÍ

USE A CHEAP GPS RECEIVER FOR PRECISE LANDING GUIDANCE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Trčka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Šplíchal, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Letecký ústav
Student:	Bc. Ondřej Trčka
Studijní program:	Letecká a kosmická technika
Studijní obor:	Technologie provozu letadlové a letištní techniky
Vedoucí práce:	Ing. Miroslav Šplíchal, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Využití levného GPS přijímače k přesnému navedení na přistání

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vlastnosti moderních vicesystémových GPS přijímačů umožňují uvažovat o jejich využití k přesnému vedení malých letadel po optimální přistávací trajektorii. Úkolem práce je zhodnotit reálnost takového použití, zejména s důrazem na identifikaci chyb a odchylek ve vedení letadla. Součástí práce budou i praktické experimenty s malým GPS přijímačem.

Cíle diplomové práce:

Provést rešerši dostupných nízkonákladových modulů GPS přijímačů s ohledem na jejich technické parametry a vybrat nejvýhodnější modul pro testování.

U vybraného GPS přímače ověřit dostupnou přesnot měření ve vertikální rovině s identifikací prvků, které mohou mít dopad na přesnot vertikálního určení polohy.

Provést verifikační měření s cílem ověřit možnost přesného vedení letadla po přistávací trajektorii.

Seznam doporučené literatury:

HRDINA, Zdeněk, Petr PÁNEK a František VEJRAŽKA. Rádiové určování polohy: Družicový systém GPS. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999, 259 s. ISBN 80-01-01386-3.

KAPLAN, Elliott D a Christopher J HEGARTY. Understanding GPS: principles and applications. 2nd ed. Boston: Artech House, 2006, xvii, 703 s. : il. ISBN 1-58053-894-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Předložená diplomová práce se zabývá využitím levného GPS přijímače k přesnému navedení na přistání. Teoretická část diplomové práce obsahuje základní informace o funkci globálních navigačních satelitních systémů a současné využití těchto systémů v letecké dopravě včetně popisu stanovených požadavků na přesnost GNSS v letectví. V praktické části je provedeno porovnání dostupných nízkonákladových přijímačů na trhu, proveden výběr dvou přijímačů pro verifikační měření, provedeno verifikační měření s cílem ověření schopnosti vertikálního vedení po sestupové trajektorii a provedena identifikace faktorů, které mají vliv na přesnost měření. Ze zaznamenávaných hodnot měření jsou provedeny přehledné záznamy v tabulkách a grafech. Závěrečná statistická analýza poskytuje přehled o odchylkách a chybách obou zvolených a testovaných přijímačů a umožňuje reálné zhodnocení přesnosti a využitelnosti pro přesné vertikální vedení po přistávací trajektorii.

ABSTRACT

Presented master's thesis deals with the use of cheap GPS receiver for precise landing guidance. The theoretical part of the master's thesis contains basic information about global navigation satellite systems function and current use of these systems in air transportation including the description of the specified requirements for GNSS accuracy in aviation. The practical part contains comparison of available low-cost receivers at the market, selection of two receivers for verification measurements, verification measurements with the goal of verifying capability of vertical guidance on descending trajectory and identification of factors that affect measuring accuracy. Results are presented in tables and charts. The statistical analysis at the end provides overview of deviations and errors of both selected and tested receivers and allows to evaluate precision and usability for precise vertical guidance on landing trajectory.

KLÍČOVÁ SLOVA

Globální družicový polohový systém, přesnost navigace, navigační systémy letadel, vertikální navedení na přistání.

KEYWORDS

Global Navigation Satellite System, navigation accuracy, aircraft navigation systems, landing vertical guidance.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TRČKA, Ondřej. *Využití levného GPS přijímače k přesnému navedení na přistání*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149388>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Miroslav Šplíchal.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že předložená práce je mým původním autorským dílem, které jsem vypracoval samostatně. Veškerou literaturu a další zdroje, z nichž jsem při zpracování čerpal, v práci řádně cituji a jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V dne 23. 5. 2023

.....

Ondřej Trčka

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Miroslavu Šplíchalovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, konzultace a za velmi vstřícný a trpělivý přístup během vypracovávání této diplomové práce.

Rád bych také poděkoval svým rodičům a přítelkyni za podporu, bez které by tato práce nemohla být dokončena.

OBSAH

Úvod	12
1 Globální navigační satelitní systémy	13
1.1 Základní popis funkce GNSS	13
1.2 Typy GNSS	15
1.2.1 GPS	16
1.2.2 GLONASS	17
1.2.3 Galileo.....	17
1.2.4 BeiDou	18
2 Současné využití GNSS v letectví	19
2.1 Standardizace GNSS v letectví.....	19
2.1.1 Aircraft Based Augmentation	19
2.1.2 Satellite Based Augmentation	20
2.1.3 Ground Based Augmentation.....	20
2.2 Požadavky na přesnost GNSS v letectví.....	21
3 Srovnání a Výběr GNSS přijímačů.....	25
3.1 Srovnávací analýza GNSS přijímačů.....	25
3.2 Výběr přijímačů a jejich specifikace	32
3.2.1 Modul 3DR.....	32
3.2.2 Modul Navio2	33
3.3 Komunikační protokoly GNSS přijímačů.....	35
4 Verifikační měření pro ověření vertikální přesnosti.....	37
4.1 Statické měření.....	37
4.2 Dynamické měření	42
5 Vyhodnocení naměřených výsledků	44
5.1 Modul 3DR – sada měření č. 1	45
5.2 Modul 3DR – sada měření č. 2	47
5.3 Modul 3DR – sada měření č. 3	49
5.4 Modul 3DR – sada měření č. 4	51
5.5 Modul Navio2 – sada měření č. 1.....	53
5.6 Modul Navio2 – sada měření č. 2.....	55
5.7 Modul Navio2 – sada měření č. 3.....	57
5.8 Modul Navio2 – sada měření č. 4.....	59
5.9 Závěrečné vyhodnocení měření	61
6 Zhodnocení přesnosti a využitelnosti.....	63
Závěr.....	65
Citační zdroje.....	67
Citace obrázků a tabulek	71

Seznam obrázků	72
Seznam tabulek	73

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Popis AJ/RJ	Popis CZ
ABAS	<i>Aircraft Based Augmentation System</i>	
AFCS	<i>Automatic Flight Control System</i>	System automatického řízení letu
AL	<i>Alert Limit</i>	Limit varování
ALT	<i>Altitude</i>	Výška
ANP	<i>Actual Navigation Performance</i>	Aktuální navigační výkon
APV	<i>Approach with Vertical guidance</i>	Přiblížení s vertikálním vedením
BDS	<i>BeiDou Navigation Satellite System</i>	Satelitní navigační systém BeiDou
Bpv		Balt po vyrovnání
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>	Vícenásobný přístup s kódovým dělením
CS	<i>Control Segment</i>	Řídicí středisko
ČÚZK		Český úřad zeměměřický a katastrální
DOP	<i>Dilution Of Precision</i>	Rozptyl přesnosti
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>	Vícenásobný přístup s frekvenčním dělením
FMS	<i>Flight Management System</i>	System řízení letu
FOC	<i>Full Operational Capability</i>	Plná operační schopnost
FTDI	<i>Future Technology Devices</i>	Název firmy, která vyrábí polovodičové součástky
GBAS	<i>Ground Based Augmentation System</i>	
GCS	<i>Ground Control Segment</i>	Pozemní řídicí segment
GDOP	<i>Geometric dilution of precision</i>	Parametr geometrické přesnosti
GEO	<i>Geostationary Earth Orbit</i>	Geostacionární oběžná dráha Země
GGA	<i>Global Positioning System Fix Data</i>	
GLL	<i>Geographic position, latitude and longitude and time</i>	
GLONASS	<i>Global'naya Navigatsionnaya Sputnikova Sistema</i>	Ruský globální satelitní navigační systém
GLS	<i>GPS Landing System</i>	GPS přistávací systém
GMS	<i>Ground Mission Segment</i>	Pozemní segment mise
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>	Globální navigační satelitní systém
GPS	<i>Global Positioning System</i>	Globální polohový systém
GSA	<i>GPS DOP and Active Satellite</i>	GPS DOP a aktivní satelity
HAL	<i>Horizontal Alert Limit</i>	Horizontální limit varování
HDOP	<i>Horizontal Dilution of Precision</i>	Horizontální rozptyl přesnosti
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>	Mezinárodní organizace civilního letectví
IGSO	<i>Inclined Geostationary Orbit</i>	
INS	<i>Inertial Navigation System</i>	Inerciální navigační systém
IOV	<i>In Orbit Validation</i>	
LPV	<i>Localizer Performance with Vertical guidance</i>	
MCX	<i>Micro coaxial</i>	Mikro koaxiální
MEO	<i>Medium Earth Orbit</i>	
MCS	<i>Main Control Station</i>	Centrální uzel řídicího segmentu
MSL	<i>Mean Sea Level</i>	Střední hladina moře
NAVSTAR	<i>NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System</i>	
GPS		
NMEA	<i>National Marine Electronics Association</i>	
NSE	<i>Navigation System Error</i>	Chyba navigačního systému

PBN	<i>Performance Based Navigation</i>	Navigace založená na výkonu
PDOP	<i>Position Dilution of Precision</i>	Parametr přesnosti polohy
PL	<i>Protection Level</i>	Úroveň ochrany
PNT	<i>Positioning, Navigation and Timing</i>	
PPS	<i>Precise Positioning Service</i>	
PRN	<i>Pseudo Random Noise</i>	
REF	<i>Referential</i>	Referenční
RDSS	<i>Radio Determination Satellite Service</i>	
RMC	<i>Recommended Minimum Specific GPS/Transit Data</i>	
RNP	<i>Requiered Navigation Performance</i>	Požadovaný navigační výkon
RNSS	<i>Radio Navigation Satellite Services</i>	
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>	
SATNAV	<i>Satellite Navigation</i>	Satelitní navigace
SBAS	<i>Satellite Based Augmentation</i>	
SMS	<i>Short Message Service</i>	Krátká textová zpráva
SPS	<i>Standard Positioning Service</i>	
TLS	<i>Target Level of Safety</i>	Cílová úroveň bezpečnosti
TTA	<i>Time To Alert</i>	Čas do varování
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>	Logika tranzistor tranzistor
TSE	<i>Total System Error</i>	Celková chyba systému
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>	Bezpilotní prostředek
ULS	<i>Ultimate Logistic Service</i>	
USB	<i>Universal Serial Bus</i>	Univerzální sériová sběrnice
UTC	<i>Universal Coordinated Time</i>	Univerzální koordinovaný čas
VAL	<i>Vertical Alert Limit</i>	Vertikální limit varování
VDOP	<i>Vertical Dilution of Precision</i>	Vertikální rozptyl přesnosti
VTG	<i>Track Made Good and Ground Speed</i>	

ÚVOD

Zjišťování poloh bodů na zemském povrchu pomocí pozorování vzdálených objektů se provádí stovky let. Odrazná zrcadla na vrcholcích hor ustoupila používání výškových světlic a raket. Po staletí se využívá nebeská navigace založená na pozorování Slunce, hvězd a planet. Teprve s rozvojem vesmírného věku bylo možné vyvinout globální (vesmírné) systémy pro vysoce přesné určování polohy a navigaci. Možnost použít satelit pro určení polohy byla objevena roku 1957 týmem vedeným Dr. Richardem B. Kershnerem během monitorování radiového signálu prvního satelitu – Sputniku I. Tým svým zkoumáním zjistil, že frekvence vysílání se při pohybu satelitu mění díky Dopplerovu efektu. V závislosti na těchto frekvenčních změnách byli schopni určit pozici satelitu. Současné systémy používají kódový princip měření, který je založen na přesné poloze satelitů a časových značek v signálech z jednotlivých družic. Přesná pozice objektu je definována pomocí čtyř parametrů: zeměpisné šířky, zeměpisné délky, nadmořské výšky a času.

Přistání letadla je považováno za jeden z nejnáročnějších manévřů. Je to dáno především tím, že během přistání letadlo snižuje svoji výšku, čímž zmenšuje bezpečnou vzdálenost od případných překážek, a zároveň stoupá obtížnost pilotáže zejména z toho důvodu, že stoupají nároky na reakční dobu, kterou musí pilot mít v případě nějaké nečekané situace, a to všechno ve chvíli, kdy je zátěž pilota výrazně vyšší než obvykle díky celé řadě přípravných úkonů, které před přistáním musí provést.

Během meteorologicky nepříznivých podmínek jsou navíc piloti v situaci, kdy jejich vnímání prostoru je omezeno na sledování přístrojů. Je důležité, aby jim palubní přístroje v této situaci poskytovaly nejpřesnější možné informace.

Vertikální složka přiblížení je faktor, který v této situaci hraje zásadní roli, proto se tato diplomová práce zaměřuje výhradně na schopnost GNSS systémů poskytnout dostatečně přesnou informaci o vertikální poloze, která může sloužit například pro přesné vedení po přistávací trajektorii.

Cíle diplomové práce:

- Popsat globální navigační satelitní systémy a zaměřit se na jejich využití v letectví.
- Provést rešerši dostupných nízkonákladových GPS přijímačů.
- Provést výběr vhodného modulu GPS přijímače pro testování.
- Provést verifikační měření a ověřit přesnost vertikálního vedení.
- Zhodnotit přesnost a využitelnost zvolených levných přijímačů pro účel přesného vedení po přistávací trajektorii.

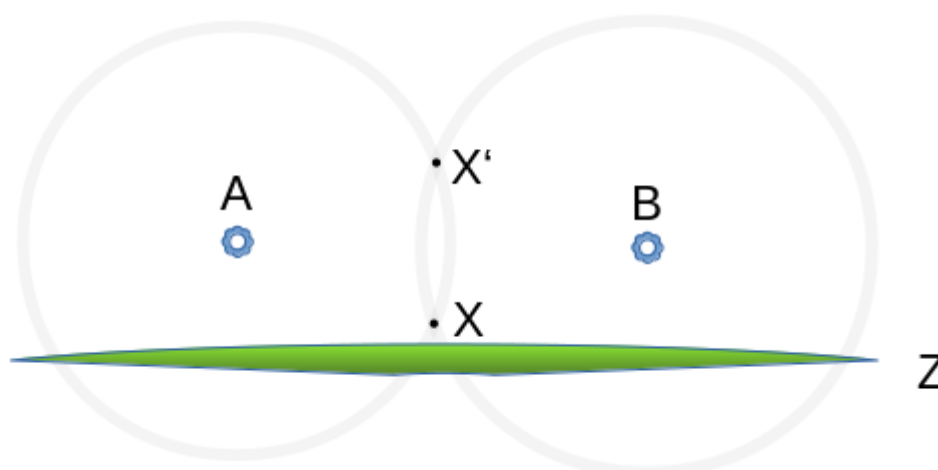
1 GLOBÁLNÍ NAVIGAČNÍ SATELITNÍ SYSTÉMY

Globální navigační satelitní systémy (GNSS, *Global Navigation Satellite System*) se používají pro vysoce přesné určování polohy a navigaci [1].

1.1 Základní popise funkce GNSS

Jedná se o dálkoměrný systém, tj. družice vysílají navigační zprávu, kde uvádějí (kromě jiného) své označení, polohu a čas vyslání. Přijímač, jehož poloha je určována, musí přijmout tyto signály alespoň od čtyř různých družic. Pro každou z družic lze z rozdílu času vyslání signálu družicí a přijetí signálu přijímačem vypočítat jejich vzájemnou vzdálenost.

Určení polohy neznámého bodu v prostoru lze ukázat na následujícím názorném příkladu (Obrázek 1). Pro zjednodušení je náčrt umístěn do dvourozměrného prostoru. V něm se pohybují satelity GNSS systému označené A a B nad zemským povrchem



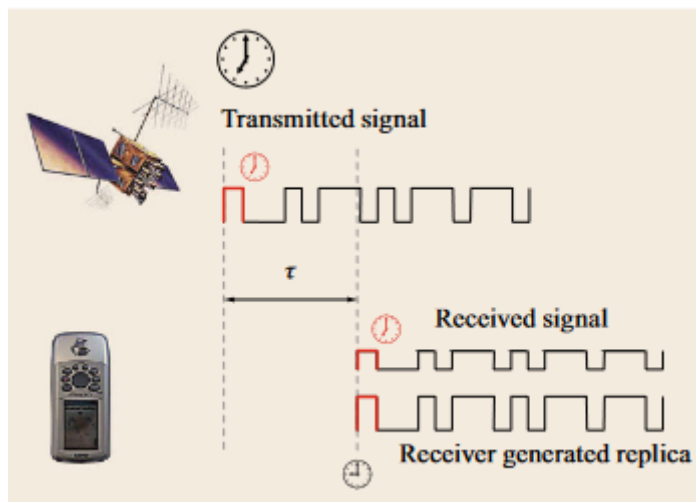
Obrázek 1: Základní funkce GNSS

označeným Z. Vzdálenost neznámého bodu od jednotlivých satelitů je vyznačena šedým mezikružím se středem v bodech A a B. Z geometrie vyplývá, že úloha má 2 možná řešení označená X a X'. Toto by za obecných okolností platilo a samotné body A a B by na určení polohy nebyly dostatečné, svoji roli ale v tomto případě hraje i skutečnost, že hledáme polohu neznámého bodu, který se nachází na zemském povrchu, díky tomuto faktu může výpočetní mechanismus GNSS přijímače vyloučit bod X' z možných řešení a zůstane bod X jako jediná možnost. Protože se pohybujeme v třírozměrném prostoru, a navíc existuje i čtvrtá neznámá (čas), díky které můžeme považovat prostor za čtyřrozměrný, potřebujeme k přesnému určení polohy navýšit odpovídajícím způsobem i počet satelitů GNSS systému na 4.

Případnou nepřesnost měření (a s tím spojené určení polohy) lze do jisté míry redukovat dalším zvyšováním počtu satelitů, které se k určení polohy použijí [2].

Signály GNSS jsou elektromagnetické vlny šířící se rychlostí světla. Pro tyto signály byly zvoleny signálové frekvence v rádiovém spektru mezi 1,2 a 1,6 GHz, protože umožňují měření s odpovídající přesností, umožňují uživatelům disponovat přiměřeně jednoduchým vybavením a netrpí útlumem v atmosféře za běžných povětrnostních podmínek. Charakteristickým rysem všech signálů GNSS je modulace harmonické

rádiové vlny (označované jako nosná) s charakteristickým kódem PRN (*Pseudo Random Noise*), což je binární posloupnost nul a jedniček. Informace je přenášena kanálem o šířce pásma 1-10 MHz. Základní měření prováděné GNSS přijímačem je doba potřebná k šíření signálu GNSS ze satelitu k přijímači. Toho lze dosáhnout sledováním modulace PRN kódu signálu, jak je znázorněno na obrázku (Obrázek 2) [1], [3].



Obrázek 2: Základní princip měření pseudovzdálenosti [1]

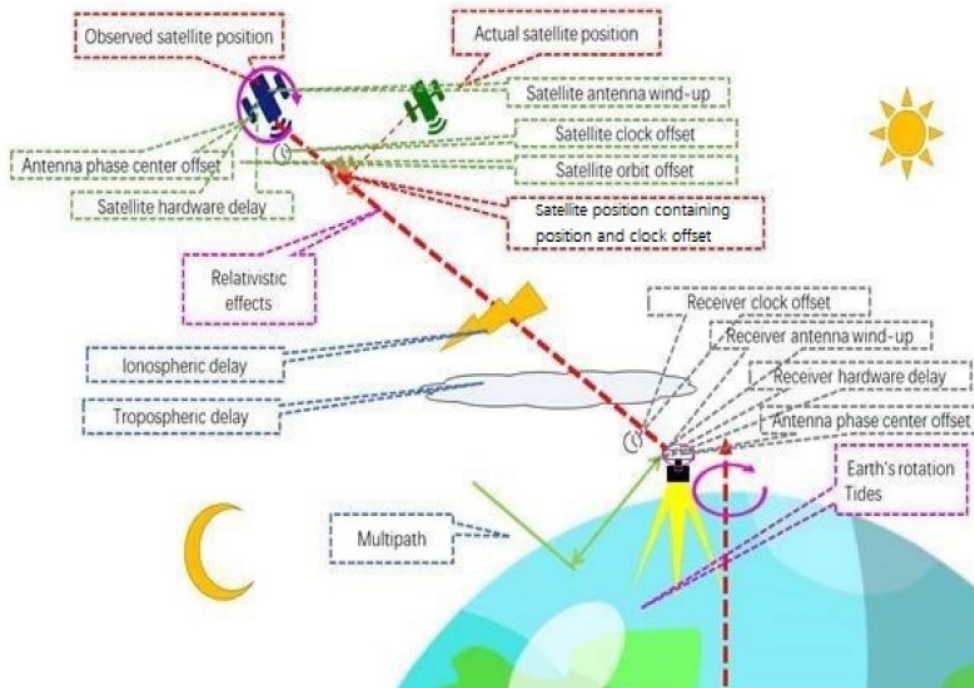
Hlavní zdroje chyb v určování polohy GNSS se týkají jak samotných satelitů systému (chyby na oběžné dráze satelitu, posunutí hodin satelitu, posunutí středu fáze), tak i GNSS přijímačů (hodinový offset, hardwarové zpoždění přijímače, offset fázového středu antény), zpoždění v ionosféře a troposféře, odrazy od zemského povrchu [1]. Grafické znázornění chyb je vyobrazeno obrázku (Obrázek 3).

Jedním z nejběžnějších zdrojů nepřesnosti je zpoždění v troposféře, které má velmi proměnlivý charakter, protože je založeno na zpoždění přenosu elektromagnetických vln prostředím s měnící se hustotou. Hustota prostředí se mění díky změnám teplot, tlaku a koncentrace vodních par [1].

Zpoždění v ionosféře je důležitým a závažným faktorem způsobujícím nepřesnost určení polohy, protože dochází k degradaci signálu průchodem prostředím nasyceným nabitými částicemi [1].

Odrazy od zemského povrchu způsobují tzv. multipath-delay a jsou dalším z významných zdrojů chyb v určování polohy. Vysílaný signál se odrazí od různých částí zemského povrchu s proměnlivými charakteristikami (vodní hladina, různě silná vrstva sněhu apod.) a takto odražený signál mívá proti originálu změněné důležité vlastnosti jako změny v polarizaci, amplitudě, fázi nebo frekvenci. Jeden signál se může odrazit i do více různých směrů a přijímač potom přijímá kromě signálu v originálním tvaru tentýž signál v několika různě deformovaných podobách [1].

Příčiny na straně přijímače (hodinový offset, hardwarové zpoždění, offset fázového středu antény) souvisejí zpravidla s tím, jak je přijímač vyráběn. Při výrobě jsou použity různé návrhy elektronických obvodů a k jejich realizaci součástky s různými výrobními tolerancemi parametrů. Výsledkem může být stav, kdy přijímač "vnímá" signál jiný, než který reálně přijímá.



Obrázek 3: Hlavní zdroje chyb GNSS [2]

1.2 Typy GNSS

Od konce května 2022 je k dispozici více než 130 satelitů (Tabulka 1) pro plně funkční globální satelitní navigační systémy, mezi které patří GPS (*Global Positioning System*), Galileo, GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikova Sistema*) a BDS (*BeiDou Navigation Satellite System*). Tyto systémy jsou nejpoužívanějšími satelitními systémy pro určování polohy, navigaci a měření času (PNT), např. přesné určení oběžné dráhy a služby založené na poloze.

Tabulka 1: Počet multi-GNSS satelitů na oběžné dráze (do roku 2022), zpracováno podle [2]

Systém	Blok	Signál	Počet operačních satelitů
GPS	IIR	L1 L2	7
	IIR-M	L1 L2	7
	IIF	L1 L2 L5	12
	III/IIIF	L1 L2	5
GLONASS	M	G1 G2	22
	K	G1 G2 G3	1
Galileo	IOV	E1 E6 E5a/b/ab	3
	FOC	E1 E6 E5a/b/ab	19
BDS-2	MEO	B1 B2 B3	3
	IGSO	B1 B2 B3	7
	GEO	B1 B2 B3	5
BDS-3	MEO	B1 B3 B1C B2 a/b	24
	IGSO	B1 B3 B1C B2 a/b	3
	GEO	B1 B3	2

V poslední době se rozvíjí možnost lomené, odražené a rozptýlené signály z GNSS dokonce i využívat pro snímání zemského povrchu a atmosféry s potenciálními aplikacemi v environmentálním dálkovém průzkumu.

Všechny družice GPS, GLONASS a Galileo přebírají konstelaci střední oběžné dráhy Země (MEO, *Medium Earth Orbit*), zatímco konstelace BDS se skládá z družic MEO, družic na geostacionární oběžné dráze (GEO, *Geostationary Earth Orbit*) a družic na šikmé geosynchronní dráze (IGSO, *Inclined Geostationary Orbit*). [1]

1.2.1 GPS

Global Positioning System (GPS) dříve nazývaný Navstar GPS je satelitní radionavigační systém vyvinutý a provozovaný USA. Do plně funkčního stavu byl uveden 17. 7. 1995. Vysílá na frekvencích L1 (1575,42 MHz), L2 (1227,60 MHz) a L5 (1176,45 MHz), na tyto nosné vlny se moduluje P-kód, C/A kód, L1C nebo L2C kód. Všechny družice vysílají na stejných frekvencích, ale každá družice používá odlišnou sekvenci kódů. GPS poskytuje geolokační a časové informace přijímači GPS kdekoli na Zemi nebo v její blízkosti se čtyřmi nebo více satelity GPS. GPS může poskytovat přesné funkce určování polohy vojenským, civilním a komerčním uživatelům po celém světě. GPS využívá vícenásobný přístup s kódovým dělením (CDMA, *Code Division Multiple Access*). [1]

GPS se skládá ze tří segmentů: kosmický segment (satelitní konstelace), pozemní řídicí/monitorovací segment (sít') a uživatelský systém (zařízení pro příjem uživatelů).

1. Kosmický segment se oficiálně skládá z 24 satelitů v 6 orbitálních rovinách MEO, známých jako základní 24slotová konstelace. Od června 2011 jsou 3 z 24 základních orbitálních slotů rozšířeny tak, aby obsahovaly 2 satelity, tzn. konstelace GPS byla rozšířena na 27 satelitů. V současné době je na oběžné dráze v provozu 31 satelitů GPS. Družice obíhají ve výšce cca 20 200 km s inklinací 55 stupňů a doba oběhu je přibližně 12 hodin. Tím je zajištěno, že prakticky všude v jakýkoliv okamžik jsou nad obzorem minimálně 4 viditelné družice. V praxi těchto viditelných družic může být až 12. V České republice je běžně k dispozici okolo 7-8 družic v daný okamžik.
2. Řídicí segment je tvořen monitorovacími stanicemi po celém světě (Kwajalein, Diego Garcia, Ascension, Cape Canaveral, Hawaii) a hlavní řídicí stanicí (MCS, *Main Control Station*) v Colorado Springs. Monitorovací stanice neustále provádí sběr dat z družic a předávají je do MCS. Zde jsou data zpracována a vypočteny přesné údaje o oběžných drahách a korekce času, které jsou zpětně přeneseny pozemními anténami do satelitů. Satelity je pak v rámci navigační zprávy vysílají a jsou přijímány GPS přijímači.
3. Uživatelský systém je pak tvořen širokou paletou GPS přístrojů, které poskytují údaje o poloze, rychlosti a čase uživatelům v nejrůznějších aplikacích. [4]

Od roku 1978 až do současnosti bylo na oběžnou dráhu úspěšně vypuštěno 67 družic GPS, z nichž 31 je v současnosti funkčních. Klíčovými součástmi každého satelitu jsou redundantní atomové hodiny z rubidia nebo cesia, které slouží k vysílání signálů, které jsou přesně synchronizovány se společnou časovou osou.

GPS v současné době poskytuje dvě služby – jednu pro civilní uživatele označovanou jako standardní služba určování polohy (SPS, *Standard Positioning Service*) a jednu dostupnou pouze oprávněným uživatelům (především americké armáde a armádám spojenců) označované jako přesná polohovací služba (PPS, *Precise Positioning Service*). GPS používá svou vlastní časovou stupnici, označovanou jako čas

GPS. Spojené státy se zavázaly zpřístupnit GPS SPS pro použití v civilním letectví v celém světě. [5]

1.2.2 GLONASS

Globální navigační satelitní systém (GLONASS) je ruským protějškem amerického GPS. GLONASS poskytuje vojenské a civilní multifrekvenční L- pásmové navigační služby (FDMA) pro řešení určování polohy, navigace a času pro námořní, vzdušné, pozemní a vesmírné aplikace v Rusku i na mezinárodní úrovni. Sovětská armáda zahájila program v polovině 70. let na podporu vojenských požadavků. První družice GLONASS byla vypuštěna 12. října 1982. Počáteční testovací konstelace čtyř družic byla rozmístěna v lednu 1984. Konstelace GLONASS se skládá z 24 aktivních satelitů plus 6 nasazených nebo bitových náhradních. Všechny družice používají stejnou sekvenci C/A a P kódů, ale každá družice vysílá odlišné nosné frekvence $G1$, $G2$ a $G3$ ($f_1 = 1602 \text{ MHz} + 0,5625n$, $f_2 = 1246 \text{ MHz} + 0,4375n$, $f_3 = 1202,025 \text{ MHz}$, kde n – je číslo frekvenčního kanálu družice $n = -7, -6, \dots, 5, 6$). Plánovaný počet družic je 21+3 rozmístěných rovnoměrně na 3 oběžných drahách. GLONASS je podporován sítí pozemních stanovišť umístěných převážně na hranicích Ruska a rozšířená o monitorovací stanoviště umístěná po celém zbytku světa.

FDMA má určité pozitivní vlastnosti, pokud jde o potlačení interference. Úzkopásmový zdroj rušení, který narušuje pouze jeden signál FDMA, by narušil všechny signály CDMA současně. [4]

1.2.3 Galileo

Program Galileo je evropskou iniciativou pro nejmodernější systém SATNAV, který poskytuje vysoce přesnou globální službu určování polohy a času pod civilní kontrolou. Vlastníkem systému Galileo je Evropská unie (EU) a jejích 28 členských států je důležitými účastníky programu. Služby jsou poskytovány po celém světě a nezávisle na ostatních systémech SATNAV pomocí signálů vysílaných z konstelace satelitu Galileo. První satelity seskupení Galileo byly vypuštěny 21. října 2011. Dnes je v ní 26 satelitů na oběžné dráze, z nichž dva jsou nepoužitelné (jeden s technickými problémy, jeden deklarován jako náhradní kvůli problémům s hodinami) a dva jsou plně funkční a použitelné na nenominální oběžné dráze.

Operační systém Galileo pracuje v režimu dvoufrekvenčního výkonu a poskytuje veřejně přístupné informace PVT uživatelům na celém světě prostřednictvím signálů pro měření vzdálenosti na třech frekvencích označených jako E1 (1575,42 MHz), E5a (1176,45 MHz), E5b (1207,140 MHz), E5 (1191,795 MHz) a E6 (1278,75 MHz). Tato služba je vhodná pro aplikace pro masový trh, jako je automobilová navigace nebo osobní navigace mobilními telefony.

Základní infrastruktura systému Galileo se skládá ze tří segmentů: pozemního segmentu, vesmírného segmentu a uživatelského segmentu:

Vesmírný segment Galileo se skládá z konstelace 24 operačních družic rozmístěných ve třech rovinách s dalšími náhradními družicemi na oběžné dráze. Celkový počet satelitů na oběžné dráze bude 30. Každý satelit bude vysílat navigační signály, navigační data poskytovaná pozemním segmentem spolu s vlastními časovými značkami a bude předávat výstrahy SAR (*Synthetic Aperture Radar*).

Pozemní segment systému Galileo se skládá ze dvou částí: segmentu pozemních misí (GMS, *Ground Mission Segment*) a segmentu pozemního řízení (GCS, *Ground Control*)

Segment). Segment pozemní mise obsahuje všechny funkce nezbytné pro určení dat navigační zprávy a pro šíření těchto dat na satelity. Za tímto účelem zahrnuje síť 16 globálně distribuovaných senzorových stanic monitorujících satelitní signály, příslušná zpracovatelská zařízení pro určení korekce oběžné dráhy a hodin, generování zpráv, monitorování služeb a plánování kontaktů prostřednictvím dvou řídicích center Galileo (GCC) a 5 globálně distribuovaných misí uplink stanic (ULS, *Ultimate Logistic Service*). Centra a stanice propojují globální komunikační síť. Kromě toho GMS poskytuje rozhraní pro externí poskytovatele služeb a servisní zařízení.

Uživatelský segment Galileo bude poskytovat své služby různým typům aplikací koncových uživatelů, které využívají přijímače SATNAV po využití signálu Galileo. [1][4]

1.2.4 BeiDou

BeiDou Navigation Satellite System (BDS) je globální navigační satelitní systém nezávisle vyvinutý a provozovaný Čínou. BDS byl navržen tak, aby byl kompatibilní a interoperabilní s jinými konstelacemi GNSS. Název BeiDou pochází ze souhvězdí Beidou se sedmi hvězdami nebo Velkého vozu, který se nachází v blízkosti Polárky. Od starověku využívali Číňané toto souhvězdí k navigaci. Družice vysílají frekvence B1 (1561,098 MHz), B2 (1207,14 MHz) a B3 (1268,52 MHz).

BDS se skládá z vesmírného segmentu, kontrolního segmentu a uživatelského segmentu.

1. Vesmírný segment BDS zahrnuje smíšenou konstelaci 5 GEO satelitů a 30 non-GEO satelitů. Ve srovnání s jinými satelitními navigačními systémy je jednou z unikátních vlastností BDS to, že vesmírný segment se skládá ze smíšené orbitální konstelace družic GEO (uspokojují potřeby obsluhovat určitou oblast, tj. Čínu a okolní region), IGSO a MEO (jsou vhodnější pro vytvoření globální konstelace). Tento návrh konstelace může pokračovat v poskytování funkce RDSS (*Radio Determination Satellite Service*), která začala v experimentálním systému, a zároveň poskytovat funkci RNSS (*Radio Navigation Satellite Services*), která je vhodnější pro náročnější aplikace.
2. Řídicí segment BDS je distribuovaná pozemní řídicí síť s hlavní řídicí stanicí, několika stanicemi pro synchronizaci času a nahrávání informací a také s řadou monitorovacích stanic.
3. Uživatelský segment BDS zahrnuje různé jednorežimové terminály BDS a vícerežimové terminály BDS, které jsou kompatibilní s jinými systémy GNSS. Hlavní funkcí BDS je poskytovat 24 hodin denně, za každého počasí, nepřetržité, vysoce přesné určování polohy, navigaci a časování (PNT, *Positioning, Navigation and Timing*) pro uživatele na celém světě. Kromě toho BDS také poskytuje obousměrnou službu krátkých zpráv (SMS, *Short Message Service*) a službu rozšíření na satelitu (SBAS). [4][6]

2 SOUČASNÉ VYUŽITÍ GNSS V LETECTVÍ

Ve 21. století se družicová technologie GNSS stala běžnou metodou určování polohy v oblasti letecké navigace a letecké dopravy. GNSS přijímače jsou dnes navíc cenově dostupné a nabízí vysokou přesnost měření. GNSS hraje ještě silnější roli a ve spojení s externími rozšiřujícími systémy usnadňuje zavádění nových postupů přiblížení, které zvyšují bezpečnost a poskytují lepší přístup na letiště.

Současná civilní letecká avionika GPS sleduje signály pouze na jedné frekvenci (frekvence L1), protože to byl jediný civilní signál dostupný ve frekvenčním pásmu pro letecké aplikace. První satelit GPS Block IIF byl vypuštěn v květnu 2010. Tento satelit nové generace vysílá nový civilní signál na frekvenci L5, který lze použít pro leteckou dopravu. Budoucí dvoufrekvenční vzdušná avionika GPS sledující civilní signály L1 a L5 tedy může přímo vyřešit ionosférické zpoždění, které je největším zdrojem chyb pro současnou jednofrekvenční GPS letectví. Kromě této dobře známé výhody může nový signál L5 zlepšit dostupnost služeb navigace letadel na bázi GPS při silné ionosférické scintilaci. [7]

2.1 Standardizace GNSS v letectví

GNSS (globální navigační družicové systémy) nestačí k podpoře letecké navigace ve specifických aplikacích; je tedy nutné zavést Augmentační systémy. Evropská vědecká komunita se v posledních letech zaměřuje na augmentační systémy založené na satelitní infrastruktuře (SBAS – *Satellite Based Augmentation System*) a na pozemních (GBAS – *Ground Based Augmentation System*). [8]

2.1.1 Aircraft Based Augmentation

Aircraft Based Augmentation System (ABAS) je systém, který využívá signály z globálního satelitního navigačního systému (GNSS) a dalších senzorů na palubě letadla ke zlepšení přesnosti a spolehlivosti navigace. ABAS je součástí kategorie globálních navigačních satelitních systémů (GNSS) a slouží k podpoře a zlepšení přesnosti navigace letadel, zejména při přistání. Systém ABAS spojen s přijímačem GNSS nebo s INS (Inertial Navigation System). [9]

Hlavním cílem ABAS je zlepšit přesnost, spolehlivost a dostupnost navigace pro lety v různých podmínkách, jako jsou například špatné povětrnostní podmínky, náročné terény nebo omezená viditelnost. Systém ABAS pracuje na principu přijímání signálů ze satelitů GNSS a dalších senzorů na palubě letadla a zpracování těchto dat pomocí sofistikovaných algoritmů, aby se zlepšila přesnost navigace. Systém zahrnuje různé druhy senzorů, včetně inerciálních měřicích jednotek (IMU), magnetometrů a barometrů, které mohou být použity k výpočtu přesnější polohy a rychlosti letadla. ABAS také zahrnuje sofistikované algoritmy, které umožňují pilotům přesněji určit polohu letadla a snížit chybu navigace. Tyto algoritmy mohou například zahrnovat různé druhy kalibrace senzorů a kompenzaci vnějších vlivů, jako jsou větry a turbulence.

V rámci ABAS existují různé typy systémů, které se liší podle přesnosti a spolehlivosti navigace, kterou umožňují. Například Localizer Performance with Vertical guidance (LPV) umožňuje přesné přistání s vertikálním naváděním, GPS Landing System (GLS) poskytuje přesnou navigaci při přistání bez nutnosti pozemního

vybavení, a GPS Approach with Vertical guidance (APV) umožňuje vertikální navádění při přiblížení na přistání. [10]

2.1.2 Satellite Based Augmentation

Satellite Based Augmentation (SBAS) je globální satelitní navigační systém, který využívá signály z globálního navigačního satelitního systému (GNSS) a dalších senzorů na palubě letadla ke zlepšení přesnosti a spolehlivosti navigace. SBAS využívá síť pozemních referenčních stanic (monitorují satelitní signály), speciální stanice (shromažďují a zpracovávají data referenčních stanic a generují zprávy SBAS), uplink stanice (odesílají zprávy geostacionárním satelitům) a transpondéry na těchto satelitech (vysílají zprávy SBAS). [10]

SBAS umožňuje pilotům přesnější určení polohy a rychlosti letadla, což snižuje riziko chyb v navigaci. Systém také umožňuje pilotům přesněji určit trajektorii letu a snížit náklady na palivo. SBAS je důležitý pro bezpečnost letů, protože zlepšuje přesnost navigace a zvyšuje schopnost letadla přesně dodržovat letový plán.

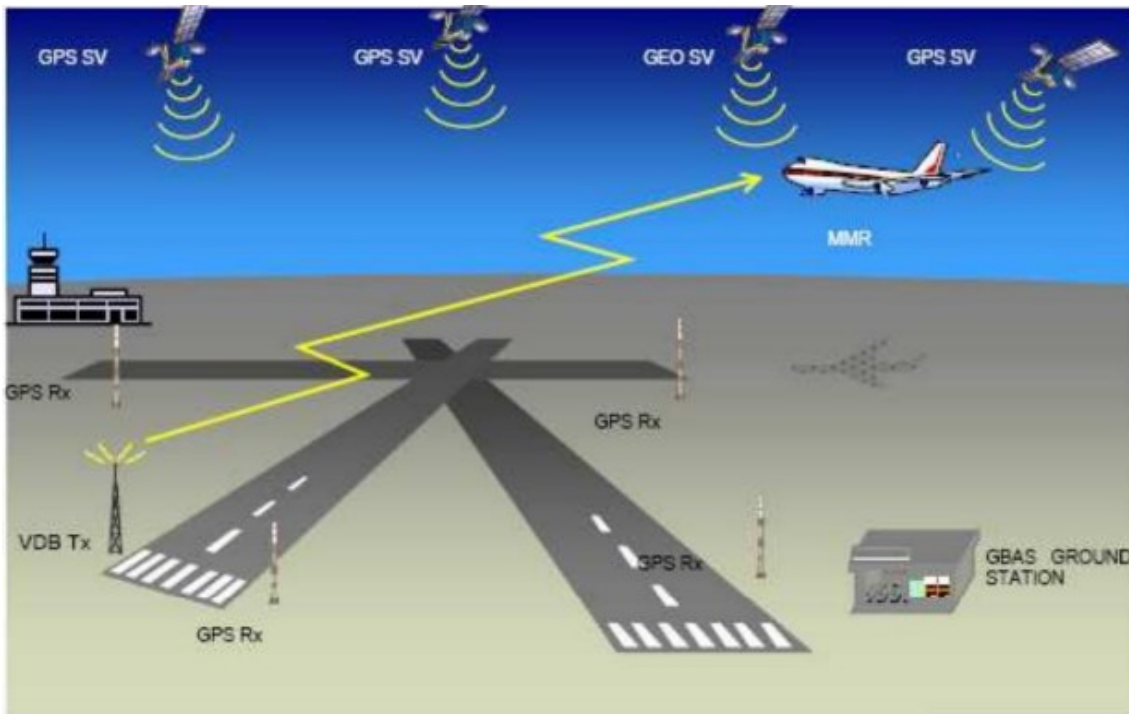
2.1.3 Ground Based Augmentation

Ground-based augmentation system (GBAS) je další způsob, jak vylepšit přesnost navigace pomocí signálů GNSS. GBAS využívá pozemních stanic umístěných na letišti k vysílání korekčních informací, které zlepšují přesnost a spolehlivost navigace v okolí letiště.

Tento bezpečnostně kritický systém rozšiřuje standardní polohovací službu GPS a poskytuje zvýšenou úroveň podpory služeb ve všech fázích přiblížení, přistání, odletu a pozemních operací.

GBAS se skládá ze dvou hlavních částí (obrázek 3): pozemních stanic a letadlových přijímačů. Pozemní stanice měří signály GNSS a vysílají korekční informace pomocí speciálních zemských spojů na letadla v okolí letiště. Tyto korekční informace umožňují letadlovým přijímačům přesně určit svou polohu na přistávací dráze a zlepšit přesnost navigace.

GBAS je schopen poskytnout přesnost na úrovni metrů, což je mnohem vyšší než standardní přesnost signálů GNSS. To umožňuje pilotům provádět bezpečná a přesná přistání, zejména v obtížných podmínkách, jako jsou například špatné počasí, špatné povětrnostní podmínky, špatná viditelnost nebo obtížné terény (krátká přistávací dráha) [8], [10].



Obrázek 4: Přehled GBAS [3]

GBAS má však omezený dosah, což znamená, že je neúčinnější pouze na letištích nebo v blízkosti letišť. Kromě toho je nákladný na implementaci a údržbu, což může být problémem pro menší letiště s omezeným rozpočtem.

2.2 Požadavky na přesnost GNSS v letectví

Letecká komunita vyvinula značné úsilí pro sjednocení a standardizaci parametrů a požadavků na výkon a přesnost, které navigační zařízení na palubách letadel musí splňovat. Tyto požadavky se nazývají tzv. Required Navigation Performance (RNP) [11], [12].

Pojmy přesnost, integrita, dostupnost a spojitost jsou používány pro vysvětlení RNP v různých fázích letu a v rámci klasifikace vzdušného prostoru. Tyto čtyři parametry jsou vysvětleny následovně [13]:

- *Přesnost*: Přesnost odhadované nebo měřené polohy letadla v daném čase je shoda této polohy se skutečnou polohou, rychlostí a/nebo časem letadla. Jelikož přesnost je statistickým měřítkem výkonu, výrok o přesnosti navigačního systému nemá smysl, pokud nezahrnuje informaci o nejistotě (například údaj o spolehlivosti) ve vztahu k poloze.
- *Integrita*: Integrita je měřítko pravdivosti, které může poskytovat informaci o správnosti údajů poskytovaných navigačním systémem. Integrita zahrnuje schopnost systému poskytnout uživatelům včasné varování v případech, kdy systém nesplňuje navigační požadavky a neměl by být používán pro navigaci.
- *Spojitosť*: Spojitosť systému je celková schopnost systému (zahrnující všechny prvky, které jsou nutné pro udržení polohy letadla v dané oblasti) fungovat bez přerušení během zamýšlené činnosti. Jinými slovy řečeno je to

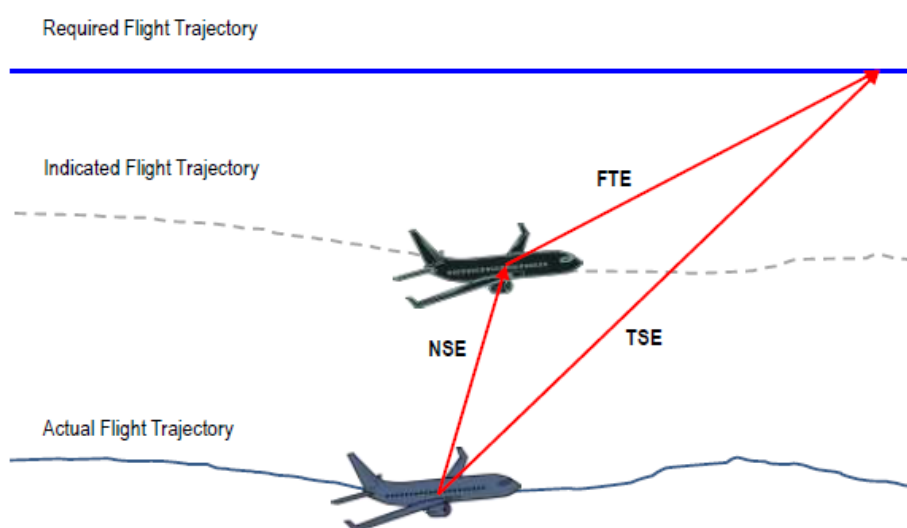
pravděpodobnost, že bude zachován specifikovaný výkon systému po dobu trvání mise, za předpokladu, že na začátku mise byl systém funkční.

- *Dostupnost*: Dostupnost navigačního systému je procentuální zastoupení času, kdy je možné navigační služby systému využívat. Je to také indikace schopnosti systému poskytovat použitelné navigační služby ve stanovené oblasti pokrytí. Dostupnost signálu je procentuální zastoupení času, kdy je možné přijímat navigační signály ze zařízení, které je vysílá. Jedná se o ukazatel, který zahrnuje jak fyzické charakteristiky prostředí, ve kterém se signál šíří, tak technické možnosti vysílačů.

V leteckých aplikacích je přesnost určení polohy definována jako rozdíl mezi odhadovanou a skutečnou nebo požadovanou polohou při jmenovitých provozních podmínkách. Standardně je tato hodnota vyjádřena jako 95% mez chybovosti určení horizontální a vertikální polohy [12].

V letectví konkrétně existují dva typy přesnosti, které musí být uvažovány. Jedním z nich je přesnost vztahovaná k samotnému navigačnímu systému a přesnost dosažená kombinací navigačních a ovládacích systémů letadla. Druhým typem přesnosti je tzv. Total System Error (TSE), který je definován jako odchylka od požadované trajektorie letu. V dopravních letadlech je požadovaná dráha letu a s tím spojená navigační informace vypočítávaná Systémem pro řízení letu – Flight Management System (FMS) a souvisle aktualizována v závislosti na službě řízení letového provozu a informacích o počasí [14].

Navigační systém určuje stavový vektor letadla (polohu, rychlost, orientaci a s tím spojené změny úhlů), dále vypočítává odchylku od požadované trajektorie letu a odesílá tyto informace jak do displejů v kokpitu, tak do systému automatického řízení letu – Automatic Flight Control System (AFCS) [14].



Obrázek 5: Přesnost navigace v letectví [4]

Chyba v určování polohy letadla se označuje jako chyba navigačního systému – Navigation System Error (NSE), která je určena jako rozdíl mezi skutečnou polohou letadla a polohou zobrazovanou navigačním systémem. Rozdíl mezi požadovanou dráhou

letu a zobrazovanou polohou letadla je označován jako technická chyba letu – Flight Technical Error (FTE) a počítá s dynamikou letadla, vlivem turbulencí, interakcí člověka se strojem atd [15]. TSE je získán jako součet vektorů NSE a FTE (Obrázek 5) .

Riziko integrity může být definováno jako pravděpodobnost poskytnutí signálů, které jsou mimo toleranci, bez určitého varování uživatele ve stanoveném časovém úseku. Typicky je odvozeno z požadovaného stupně bezpečnosti – Target Level of Safety (TLS), který vychází z historických dat z nehod, oproti kterým může být porovnáno, jestli je bezpečné systém použít nebo nikoliv [12]. Požadavky na navigační integritu v různých fázích letu jsou specifikovány Mezinárodní organizací pro civilní letectví – International Civil Aviation Organization (ICAO). Konkrétně se jedná o tři klíčové požadavky [13]:

- pravděpodobnost selhání za určitý čas (nebo jedno přiblížení na přistání)
- čas do varování – Time To Alert (TTA)
- horizontální a vertikální limity varování – Horizontal/Vertical Alert Limit

TTA je maximální dovolený čas, který uběhne od počátku stavu, kdy je systém mimo toleranci do doby, než systém tuto skutečnost ohlásí. Limity varování představují největší horizontální a vertikální polohovou chybu, která je dovolená pro bezpečný provoz [16].

Horizontal Alert Limit (HAL) je daný poloměrem kruhu v horizontální rovině (lokální tečná rovina k elipsoidu WGS-84) se středem v místě aktuální polohy. Tento poloměr definuje oblast, ve které je nutné s požadovanou pravděpodobností udržet stanovenou horizontální pozici pro konkrétní navigační režim [12].

Vertical Alert Limit (VAL) je daný poloměrem kruhu ve vertikální rovině (rovina kolmá na tečnou rovinu elipsoidu WGS-84) se středem v místě aktuální polohy. Tento poloměr ale na rozdíl od HAL definuje oblast, ve které je nutné s požadovanou pravděpodobností udržet stanovenou vertikální pozici pro konkrétní navigační režim [12].

Pro zhodnocení navigační integrity systému dle těchto definic je třeba nejprve vyjádřit NSE a porovnat jej s limity varování (AL) aplikovatelnými na nynější fázi letu. Nicméně NSE jako takové není možné přímo zjistit pilotem nebo avionikou na palubě letadla, proto musí být využito jiného způsobu vyhodnocení integrity systému [14]. Standardně využívaný přístup je založený na porovnání nejhoršího NSE za aktuálních podmínek a korespondujících AL. Tyto limity pro NSE se také nazývají jako úrovně ochrany – Protection Levels (PL) a představují hranice vysoké spolehlivosti pro NSE. Stejně jako u chyb určování polohy jsou PL uváděny ve formě horizontálních a vertikálních složek (Horizontal Protection Level – HPL; Vertical Protection Level – VPL) [12].

Tabulka 2 obsahuje požadované úrovně přesnosti, integrity, spojitosti a dostupnosti pro různé fáze letu definované ICAO Annex 10 a Předpisem L10/I – Radionavigační prostředky.

Tabulka 2: Požadavky na výkonnost GNSS v prostoru [5]

Fáze letu	Hor./vert. přesnost (95%)	Spojitosť	Dostupnost	Integrita	TTA	HAL/VAL
Let nad oceánem	3700 m/-	$1 - 10^{-4}/h$ až $1 - 10^{-8}/h$	0,99 – 0,99999	$1 - 10^{-7}/h$	5 min	7408 m/-
Let nad kontinentem	3700 m/-	$1 - 10^{-4}/h$ až $1 - 10^{-8}/h$	0,99 – 0,99999	$1 - 10^{-7}/h$	5 min	3704 m/-
Fáze přeletu	740 m/-	$1 - 10^{-4}/h$ až $1 - 10^{-8}/h$	0,99 – 0,99999	$1 - 10^{-7}/h$	15 s	1852 m/-
*APV-I	16 m/20 m	$1 - 8 \times 10^{-6}$ na 15 s	0,99 – 0,999	$1 - 2 \times 10^{-7}$ na každé přiblížení	10 s	40 m/50 m
*APV-II	16 m/8 m	$1 - 8 \times 10^{-6}$ na 15 s	0,99 – 0,999	$1 - 2 \times 10^{-7}$ na každé přiblížení	6 s	40 m/20 m
CAT I	16 m/4 m	$1 - 8 \times 10^{-6}$ na 15 s	0,99 – 0,99999	$1 - 2 \times 10^{-7}$ na každé přiblížení	6 s	40 m/10 m
CAT II	6,9 m/2 m	$1 - 4 \times 10^{-6}$ na 15 s	0,99 – 0,99999	$1 - 2 \times 10^{-9} / 15$ s	1 s	17,3 m/5,3 m
CAT III	6,2 m/2 m	$1 - 2 \times 10^{-6}$ na 30 s (horizontálně) $1 - 2 \times 10^{-6}$ na 15 s (vertikálně)	0,99 – 0,99999	$1 - 2 \times 10^{-9} / 30$ s (horizontálně) $1 - 2 \times 10^{-7} / 15$ s (vertikálně)	1 s	15,5 m/5,3 m

*APV – Approach with Vertical Guidance, přiblížení s vertikálním vedením je typem přístrojového přiblížení. používající vertikální vedení vztahené k sestupové dráze, ale vybavení nebo navigační systém nemusí vyhovovat všem požadavkům souvisejícím s přesným přiblížením. Tyto operace v sobě spojují stranový výkon odpovídající kurzovému majáku I. kategorie s různými úrovněmi vertikálního navádění. Jak APV-I, tak APV-II poskytují výhody přístupu srovnatelné s přiblížením na přistání bez radiolokačních prostředků a služby, které jsou poskytovány, závisí na provozních požadavcích a infrastruktuře SBAS. APV-I a APV-II překračují požadavky (vertikální i stranové) na stávající RNAV postupy využívající měření barometrické výšky, a příslušné vybavení na palubě je proto vhodné pro provedení nepřesných (bez radiolokačních prostředků) přiblížení VNAV APV a RNAV s měřením barometrické výšky. Tato definice byla přímo převzata z Předpisu L-10/I – Radionavigační prostředky [13].

3 SROVNÁNÍ A VÝBĚR GNSS PŘIJÍMAČŮ

Tato kapitola popisuje a srovnává dostupné GNSS přijímače. V kapitole 3.1 je provedena srovnávací analýza GNSS přijímačů. V následující kapitole 3.2 je popsán výběr dvou vhodných přijímačů, které jsou použity pro verifikační měření (kapitola 4). Nezbytnou součástí vybraných GNSS přijímačů jsou komunikační protokoly, které jsou popsány v kapitole 3.3.

3.1 Srovnávací analýza GNSS přijímačů

Pro realizaci srovnávací analýzy GNSS přijímačů byla vyvinuta snaha k nalezení takového provedení přijímače, který není uzavřeným finálním produktem, ale který je možno integrovat do vlastního projektu, tj. disponuje komunikačním rozhraním, prostřednictvím kterého by bylo možné získat výstupní data ve strojově zpracovatelné podobě.

Vyhledáváním na internetu bylo zjištěno, že trh s levnými přijímacími moduly je nasycen mnoha produkty s GNSS čipy převážně od výrobce u-blox s cenovým rozpětím 25–300 USD. Úkolem bylo nalézt a porovnat nízkonákladové přijímače, proto byla pro porovnání a následný výběr vhodných kandidátů pro verifikační měření zvolena tato kategorie produktů.

Existují moduly i za nižší cenu, ale na základě vlastní zkušenosti se velmi často jedná o moduly osazené neoriginálními čipy (čínskými klony), které mají potíže komunikovat s originálním ovládacím softwarem.

V rámci porovnání jednotlivých přijímačů byla pozornost věnována těmto kritériím:

- Cena 25–300 USD.
- Podpora GNSS systémů
- Deklarovaná přesnost
- Podpora komunikačních protokolů
- Rozměry a provedení
- Spotřeba elektrické energie

V tabulkách 3–8 jsou srovnány parametry vybraných GNSS přijímačů. Jednotlivé přijímače jsou seřazeny dle ceny vzestupně. Všechny parametry byly získány rešerší technických listů jednotlivých přijímačů a jejich GNSS čipů. Pod každou tabulkou, která je součástí srovnávací analýzy jsou uvedeny zdroje, ze kterých byly informace čerpány, a to v pořadí „Technický list přijímače“, „Technický list GNSS čipu“. Zajímavým zjištěním bylo, že výrobci v technických listech neuvádí hodnotu vertikální přesnosti přijímačů, která je pro tuto diplomovou práci důležitá a ve srovnávací analýze by případně mohla působit jako jeden ze stěžejních parametrů.

Na základě vyhotovené srovnávací analýzy a také na základě skladové dostupnosti a dodacích lhůt byly zvoleny dva přijímače (viz kap. 3.2), které jsou v tabulkách srovnávací analýzy zvýrazněny tučným písmem. Dále je také důležité zmínit, že některé z modulů podléhají vývozním povolením vládních orgánů USA a byl to jeden z důvodů, proč tyto moduly nebyly vybrány i s ohledem na jejich výhodné parametry.

Tabulka 3: Srovnávací analýza přijímačů 1

Parametr	Název GPS přijímače				
	ORG4033-MK04	MOD-GPS	Micro M8N GPS	EM-506	SparkFun GPS Breakout
Výrobce přijímače	OriginGPS	Olimex	Holybro	USGlobalSat	Sparkfun
Typ čipu	MT3333 GNSS	UBX-G7020	NEO-M8N	Star IV	SAM-M8Q
Výrobce čipu	MediaTek	u-blox	u-blox	SiRF	u-blox
Cena [€]	25,59	27,59	40,99	42,95	42,95
GPS	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Galileo	NE	NE	ANO	NE	ANO
GLONASS	ANO	ANO	ANO	NE	ANO
BeiDou	ANO	NE	ANO	NE	NE
Horizontální přesnost [m]	2,5	2	2	2,5	2,5
Podpora komunikačních protokolů	NMEA	NMEA, RTCM	NMEA	NMEA	NMEA, UBX, RTCM
Podpora augmentace	SBAS	SBAS	SBAS	SBAS	--
Externí anténa	NE	NE	NE	NE	NE
Rozměry [mm]	5,6 x 5,6 x 2,6	34 x 55 x 3	38 x 38 x 11	30 x 30 x 10,7	-
Napětí [V]	3,3	3,3	3,3	4,5 – 6,5	3,3
Proud [mA]	27	-	-	45–55	29

V tabulce 3 jsou uvedeny tyto přijímače: ORG4033-MK04 [17], [18], MOD-GPS [18], [20], Micro M8N GPS [21], [22], EM-506 [23], [24] a SparkFun GPS Breakout [25], [26].

Tabulka 4: Srovnávací analýza přijímačů 2

Parametr	Název GPS přijímače				
	Beitian BE-450 GNSS Module with Compass	EM-506N5	SparkFun GNSS Receiver Breakout	SparkFun MicroMod GNSS Function Board	SparkFun GPS Breakout
Výrobce přijímače	Beitian	USGlobalSat	Sparkfun	Sparkfun	Sparkfun
Typ čipu	M10050-KB	L1 band GNSS	MAX-M10S	NEO-M9N-00B	ZOE-M8Q (Qwiic)
Výrobce čipu	u-blox	MediaTek	u-blox	u-blox	u-blox
Cena [€]	43,55	44,95	44,95	49,95	49,95
GPS	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Galileo	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
GLONASS	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
BeiDou	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Horizontální přesnost [m]	1,5	2,5	1,5	1,5	2,5
Podpora komunikačních protokolů	NMEA, UBX	NMEA	NMEA, UBX	NMEA, UBX, RTCM	NMEA, UBX, RTCM
Podpora augmentace	SBAS	-	-	-	-
Externí anténa	NE	NE	ANO	NE	NE
Rozměry [mm]	56 x 9,8				
Napětí [V]	5	6,5	3,3	3	3,3
Proud [mA]	50	32	25	27	29

V tabulce 4 jsou uvedeny tyto přijímače: Beitian BE-450 GNSS Module with Compass [27], [28], EM-506N5 [29], [30], SparkFun GNSS Receiver Breakout [31], [32], SparkFun MicroMod GNSS Function Board [33], [34] a SparkFun GPS Breakout [35], [36].

Tabulka 5: Srovnávací analýza přijímačů 3

Parametr	Název GPS přijímače				
	SparkFun GPS Breakout - Chip Antenna	SparkFun GPS Dead Reckoning Breakout	SparkFun GPS Breakout - NEO	Matek M10-L4-3100 GPS Module	SparkFun GPS Breakout
Výrobce přijímače	Sparkfun	Sparkfun	Sparkfun	Mateksys	Sparkfun
Typ čipu	SAM-10Q	NEO-M8U (Qwiic)	NEO-M9N-00B	MAX-M10S	NEO-M9N-00B
Výrobce čipu	u-blox	u-blox	u-blox	u-blox	u-blox
Cena [€]	49,95	69,95	69,95	74,39	74,95
GPS	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Galileo	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
GLONASS	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
BeiDou	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Horizontální přesnost [m]	1,5	2,5	1,5	1,5	1,5
Podpora komunikačních protokolů	NMEA, UBX, RTCM	NMEA, UBX, RTCM	NMEA, UBX, RTCM	NMEA, UBX	NMEA, UBX, RTCM
Podpora augmentace	-	-	-	SBAS	SBAS
Externí anténa	NE	NE	NE	NE	ANO
Rozměry [mm]	-	-	16,6 x 12,3 x 2,6	36 x 36 x 12	-
Napětí [V]	3,3	3,3	3,3	4,5-5,3	3,3
Proud [mA]	27	67	31	60	31

V tabulce 5 jsou uvedeny tyto přijímače: SparkFun GPS Breakout – Chip Antenna [37], [38], SparkFun GPS Dead Reckoning Breakout [39], [40], SparkFun GPS Breakout – NEO [41], [42], Matek M10-L4-3100 GPS Module [43], [44] a Sparkfun GPS Breakout [45], [42].

Tabulka 6: Srovnávací analýza přijímačů 4

Parametr	Název GPS přijímače				
	LS20031	3DR uBlox GPS with Compass	SKM53	ORG1510-MK04-USB	SparkFun GNSS Correction Data Receiver
Výrobce přijímače	LOCOSYS	3DR	SKYLAB	OriginGPS	Sparkfun
Typ čipu	MT3339	LEA-6H	MT3329 GPS	MT3333 GNSS	NEO-D9S-00B
Výrobce čipu	MediaTek	u-blox	MediaTek	MediaTek	u-blox
Cena [\$]	74,95	89,99	90,75	90,9	124,95
GPS	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Galileo	NE	NE	NE	ANO	NE
GLONASS	NE	NE	NE	ANO	NE
BeiDou	NE	NE	NE	ANO	NE
Horizontální přesnost [m]	2,5	2,5	3	1,5	2
Podpora komunikačních protokolů	NMEA	NMEA, UBX, RTCM	NMEA	NMEA	UBX
Podpora augmentace	SBAS	SBAS	SBAS	SBAS	-
Externí anténa	NE	NE	NE	NE	ANO
Rozměry [mm]	-	38 x 38 x 8,5	30 x 20 x 8,5	15 x 30 x 5	43,2 x 43,2
Napětí [V]	3,3	5	3,3-5	3,6	3,3
Proud [mA]	41	41	50	32	35

V tabulce 6 jsou uvedeny tyto přijímače: LS20031 [46], [47], 3DR uBlox GPS with Compass [48], [49], SKM53 [50], [51], ORG1510-MK04-USB [52], [53] a SparkFun GNSS Correction Data Receiver [54], [55].

Tabulka 7: Srovnávací analýza přijímačů 5

Parametr	Název GPS přijímače				
	SmartAP GNSS	SparkFun LTE GNSS Breakout	Navio2	SparkFun GPS-RTK Board	Sparkfun GPS-RTK-SMA Breakout
Výrobce přijímače	Smartap	Sparkfun	Emlid	Sparkfun	Sparkfun
Typ čipu	NEO M8N	SARA-R5 series	NEO-M9N	NEO-M8P	ZED-F9P-02B
Výrobce čipu	u-blox	u-blox	u-blox	u-blox	u-blox
Cena [€]	130	133,95	237,59	264,95	274,95
GPS	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Galileo	NE	ANO	ANO	NE	ANO
GLONASS	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
BeiDou	NE	ANO	ANO	ANO	ANO
Horizontální přesnost [m]	2	2,5	2	2,5	1,5
Podpora komunikačních protokolů	NMEA, UBX, RTCM	NMEA, UBX	NMEA, UBX	NMEA, UBX, RTCM	NMEA, UBX, RTCM
Podpora augmentace	SBAS	-	SBAS	-	SBAS, RTK
Externí anténa	ANO	ANO	ANO	NE	ANO
Rozměry [mm]	-	-	55 x 65	40,6 x 33	43,5 x 43,2
Napětí [V]	3,6	3,3	4,75-5,25	3,3	3,3
Proud [mA]	-	-	150	-	100

V tabulce 7 jsou uvedeny tyto přijímače: SmartAP GNSS [56], [22], SparkFun LTE GNSS Breakout [57], [58], Navio2 [59], [34], SparkFun GPS-RTK Board [60], [61] a Sparkfun GPS-RTK-SMA Breakout [62], [63].

Tabulka 8: Srovnávací analýza přijímačů 6

Parametr	Název GPS přijímače				
	SparkFun MicroMod GNSS Function Board	SparkFun GPS-RTK2 Board	SparkFun GPS-RTK Dead Reckoning Breakout	SparkFun GPS-RTK Dead Reckoning pHAT for Raspberry Pi	SparkFun GNSS Timing Breakout
Výrobce přijímače	Sparkfun	Sparkfun	Sparkfun	Sparkfun	Sparkfun
Typ čipu	ZED-F9P-02B	ZED-F9P-02B	ZED-F9P-02B	ZED-F9R-01B	ZED-F9T
Výrobce čipu	u-blox	u-blox	u-blox	u-blox	u-blox
Cena [€]	274,95	274,95	289,95	289,95	299,95
GPS	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Galileo	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
GLONASS	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
BeiDou	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Horizontální přesnost [m]	1,5	1,5	1,5	1,5	2
Podpora komunikačních protokolů	NMEA, UBX, RTCM	NMEA, UBX, RTCM	NMEA, UBX, RTCM	NMEA, UBX, RTCM	NMEA, UBX, RTCM
Podpora augmentace	SBAS	SBAS	SBAS	SBAS	SBAS
Externí anténa	NE	NE	NE	NE	ANO
Rozměry [mm]	-	43,5 x 43,2	-	-	-
Napětí [V]	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
Proud [mA]	27	-	-	-	68-130

V tabulce 8 jsou uvedeny tyto přijímače: SparkFun MicroMod GNSS Function Board [64], [63], SparkFun GPS-RTK2 Board [65], [63], SparkFun GPS-RTK Dead Reckoning Breakout [66], [63], SparkFun GPS-RTK Dead Reckoning pHAT for Raspberry Pi [67], [68] a SparkFun GNSS Timing Breakout [69], [70].

3.2 Výběr přijímačů a jejich specifikace

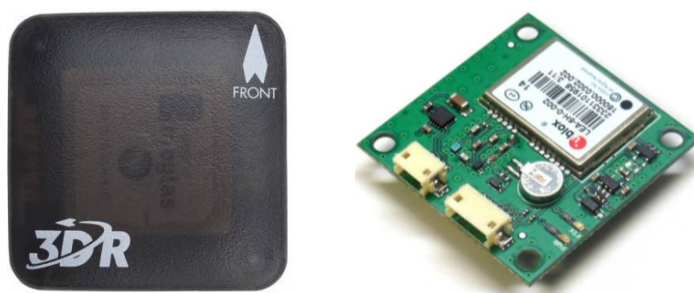
Na základě srovnávací analýzy nízkonákladových GNSS přijímačů a uvážení všech faktorů zmíněných v kapitole 3.1 byly zvoleny dva přijímače: Modul 3DR a modul Navio2. Důvodem pro zvolení těchto modulů byla skutečnost, že se jedná o moduly s dostatečně rozdílnými vlastnostmi a byly dostupné. Modul 3DR, jak vyplývá z tabulky parametrů (Tabulka 9, je zástupcem nižší cenové kategorie a je schopen pracovat pouze se systémem GPS. Oproti tomu přijímač Navio2 je zástupcem bližším horní cenové hranici a je schopen využívat systémy GPS, GLONASS, Galileo i BeiDou. Rozdílnost těchto modulů byla výhodná pro následné verifikační měření a srovnání těchto přijímačů. V následujících dvou podkapitolách (3.2.1 a 3.2.2) jsou tyto moduly blíže popsány.

3.2.1 Modul 3DR

GNSS modul 3DR (Obrázek 6) vyráběla firma 3DRobotics, která se zabývá výrobou komponent pro bezpilotní prostředky (UAV). Tento modul disponuje GNSS čipem LEA-6H od společnosti u-blox. Jedná se o originální čip, díky čemuž lze modul propojit se softwarem ublox u-center, pomocí kterého lze zaznamenávat data z průběhu měření pro případnou pozdější analýzu. Modul je schopen pracovat pouze se systémem GPS. Modul nabízí konektivitu sériovým rozhraním Transistor-Transistor Logic (TTL), což velmi zjednodušuje jeho připojení k PC prostřednictvím běžně dostupného převodníku RS232-USB (FTDI). Modul je vyroben v provedení s integrovanou anténou a uzavřen v plastovém pouzdře o rozměrech 38 x 38 x 8,5 mm. Případná montáž se provádí přilepením.

I přes to, že se jedná o starší modul, který již není oficiálně v prodeji, byl pro verifikační měření přijímač zvolen, protože bylo záměrem porovnat starší a méně výkonný modul s některou z novějších variant. Modul také disponuje integrovaným magnetometrem, který však pro účely této práce nebyl využit.

Pro přehlednost byla vyhotovena samostatná tabulka parametrů pro tento konkrétní modul (Tabulka 9).



Obrázek 6: Modul 3DR [6],[7]

Tabulka 9: Parametry modulu 3DR, data převzata z [48]

Modul 3DR	
Typ čipu	LEA-6H
Výrobce čipu	u-blox
Cena	99,95 USD
GPS	Ano
Galileo	Ne
GLONASS	Ne
BeiDou	Ne
Horizontální přesnost	2,5 m
Podpora komunikačních protokolů	NMEA, UBX, RTCM
Podpora augmentace	SBAS
Externí anténa	Ne
Rozměry	38 x 38 x 8,5 mm
Napětí	5 V
Proud	41 mA

3.2.2 Modul Navio2

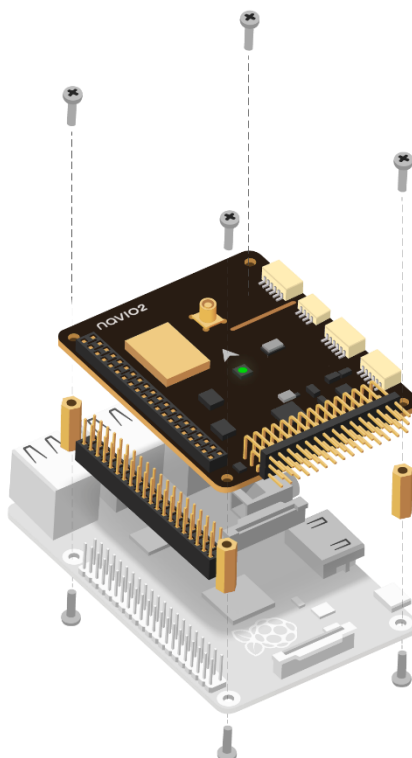
Modul Navio2 (Obrázek 7) vyrábí firma Emlid, která se v současné době zabývá výrobou vysoce přesných GNSS modulů. Tento modul disponuje GNSS čipem NEO-M8N od společnosti u-blox. Modul Navio2 není sám o sobě pouze GNSS přijímačem, ale je rozšířením pro jednodeskový počítač Raspberry Pi (verze 2, 3 a 4), které je schopno fungovat jako řídicí jednotka pro UAV. Tato jednotka disponuje jednak GNSS čipem, ale také RC (remote-controlled) koprocesorem pro zpracování RC signálu, výstupy pro ovládání elektromotorů a servomotorů, duální IMU (Inertial Measurement Unit) složenou z akcelerometrů, gyroskopů a magnetometrů, barometrem s vysokým rozlišením a také například trojitým zálohováním napájení. Pro účely této diplomové práce byl z tohoto hardwaru softwarově separován a následně využíván pouze GNSS přijímač.

Stejně jako předchozí modul, tak i tento disponuje originálním čipem, díky němuž jej lze propojit se softwarem u-blox u-center, pomocí kterého lze zaznamenávat data z průběhu měření pro pozdější analýzu. Modul je schopen pracovat se systémy GPS, GLONASS, Galileo a BeiDou. Díky tomu, že je modul rozšířením pro počítač Raspberry Pi, lze jej připojit k PC pomocí síťového spojení Ethernet. Modul je vyroben v provedení s externí anténou, která se k přijímači připojuje pomocí MCX (*micro coaxial*) konektoru. Samotný modul má rozměry 55 x 65 x 5 mm, tento rozměr ale výrazně zvětšuje montáž modulu na počítač Raspberry Pi a pouzdro, které chrání celý komplet. Celkový rozměr sestavy je pak 93 x 62 x 25 mm a externí anténa má rozměr 45 x 35 x 15 mm. Montáž se stejně jako u předchozího modulu provádí přilepením.

Modul byl pro verifikační měření vybrán z důvodu deklarace vysoké přesnosti výrobcem a dostupností na tuzemském trhu. Pro přehlednost byla vyhotovena samostatná tabulka parametrů pro tento konkrétní modul (Tabulka 10).

Tabulka 10: Parametry modulu Navio2, data převzata z [59]

Modul Navio2	
Typ čipu	NEO-M9N
Výrobce čipu	u-blox
Cena	237,59 USD
GPS	Ano
Galileo	Ano
GLONASS	Ano
BeiDou	Ano
Horizontální přesnost	2,0 m
Podpora komunikačních protokolů	NMEA, UBX, RTCM
Podpora augmentace	SBAS
Externí anténa	Ano
Rozměry	55 x 65 x 5 mm
Napětí	5 V
Proud	150 mA



Obrázek 7: Modul Navio2 [8]

3.3 Komunikační protokoly GNSS přijímačů

GNSS přijímače využívají pro distribuci (nejen) navigačních dat standardizované komunikační protokoly. Mezi nejpoužívanější patří protokoly NMEA, RTCM, NTRIP a RINEX. Tyto protokoly mají přesně určenou strukturu, což umožňuje provozovat bezproblémovou komunikaci mezi přijímačem a koncovým zařízením [71]. Přijímače 3DR a Navio2, které byly vybrány pro následné verifikační měření, komunikují s využitím protokolu NMEA (Obrázek 8), který byl využit pro verifikační měření. Pro účely této diplomové práce je níže popsána struktura tohoto protokolu.

```
22:21:57 $GNGSA,A,3,04,07,09,11,06,30,16,20,05,,,,,1.24,0.69,1.03*19
22:21:57 $GNGSA,A,3,73,87,88,71,65,72,74,80,81,,,,,1.24,0.69,1.03*1F
22:21:57 $GPGSV,3,1,12,04,25,084,35,05,18,311,20,06,21,216,41,07,75,156,39*74
22:21:57 $GPGSV,3,2,12,09,59,080,41,11,36,262,37,16,19,044,34,20,41,302,32*7B
22:21:57 $GPGSV,3,3,12,29,01,325,07,30,45,208,37,36,31,163,34,49,31,197,38*70
22:21:57 $GLGSV,3,1,11,65,14,299,31,70,07,109,23,71,54,088,32,72,63,327,28*62
22:21:57 $GLGSV,3,2,11,73,56,074,34,74,46,156,30,75,01,187,35,80,14,026,15*61
22:21:57 $GLGSV,3,3,11,81,06,359,26,87,18,258,32,88,24,311,34*5B
22:21:57 $GNGLL,4954.60864,N,01809.74212,E,222156.60,A,D*76
22:21:57 $GNRMC,222156.80,A,4954.60833,N,01809.74564,E,41.326,97.78,130523,,,D*7E
22:21:57 $GNVTG,97.78,T,M,41.326,N,76.536,K,D*14
22:21:57 $GNGGA,222156.80,4954.60833,N,01809.74564,E,2,12,0.71,258.9,M,41.4,M,,0000*4D
22:21:57 $GNGSA,A,3,04,07,09,11,06,30,16,20,,,,,1.25,0.71,1.03*14
22:21:57 $GNGSA,A,3,73,87,88,71,65,72,74,80,81,,,,,1.25,0.71,1.03*17
22:21:57 $GPGSV,3,1,12,04,25,084,35,05,18,311,,06,21,216,41,07,75,156,39*76
22:21:57 $GPGSV,3,2,12,09,59,080,41,11,36,262,37,16,19,044,34,20,41,302,31*78
22:21:57 $GPGSV,3,3,12,29,01,325,07,30,45,208,37,36,31,163,34,49,31,197,39*71
22:21:57 $GLGSV,3,1,11,65,14,299,31,70,07,109,24,71,54,088,32,72,63,327,28*65
22:21:57 $GLGSV,3,2,11,73,56,074,34,74,46,156,30,75,01,187,35,80,14,026,14*60
22:21:57 $GLGSV,3,3,11,81,06,359,26,87,18,258,32,88,24,311,34*5B
22:21:57 $GNGLL,4954.60833,N,01809.74564,E,222156.80,A,D*7C
```

Obrázek 8: Ukázka zpráv protokolu NMEA – screenshot z komunikace s přijímačem Navio2

Veškerá data jsou v rámci protokolu NMEA posílána ve formě datových paketů, které obsahují různé typy dílčích zpráv. Mezi tyto zprávy patří:

- GGA (*Global Positioning System Fix Data*) – čas, poloha a typ fixace polohy
- GLL (*Geographic position, latitude and longitude and time*) – zeměpisná šířka, zeměpisná délka, čas a status
- GSA (*GPS DOP and Active Satellite*) – režim činnosti přijímače, satelity používané při výpočtu polohy a hodnoty DOP (*Dilution Of Precision*)
- GSV (GNSS Satellites in View) – počet GNSS satelitů, ze kterých je dostupný signál, ID těchto satelitů, elevace, azimut a síla signálu
- RMC (*Recommended Minimum Specific GPS/Transit Data*) – čas, datum, poloha, kurz a rychlost
- VTG (*Track Made Good and Ground Speed*) – kurz a rychlost vůči povrchu Země

Informace o protokolu NMEA získány z [72].

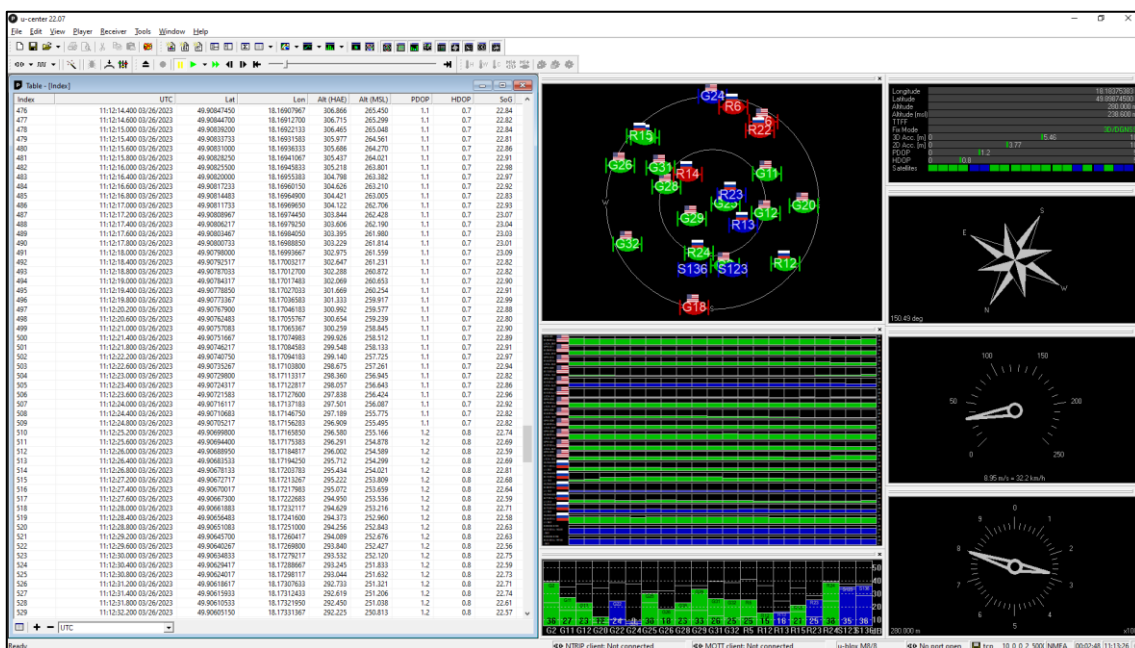
Zprávy poskytované přijímačem obsahují různé parametry přijímaného signálu a vypočítané hodnoty, z nichž byly pro účely této diplomové práce zvoleny zaznamenávány následující:

- UTC Time (*Coordinated Universal Time, univerzální koordinovaný čas*) – přesný čas; informace je obsažena ve zprávě GGA
- Position Fix Indicator – indikátor typu fixace polohy, je důležitý, protože indikuje platnost údajů GPS přijímače; informace je obsažena ve zprávě GGA
- Latitude – zeměpisná šířka a označení N = sever S = jih; informace je obsažena ve zprávě GLL

- Longitude – zeměpisná délka a označení E = východ nebo W = západ; informace je obsažena ve zprávě GLL
- MSL Altitude – nadmořská výška v metrech; informace je obsažena ve zprávě GGA
- PDOP (*Position Dilution of Precision*) – rozptyl přesnosti polohy; informace je obsažena ve zprávě GSA
- HDOP (*Horizontal Dilution of Precision*) – horizontální složka rozptylu přesnosti polohy; informace je obsažena ve zprávě GSA
- VDOP (*Vertical Dilution of Precision*) – vertikální složka rozptylu přesnosti polohy; informace je obsažena ve zprávě GSA
- SoG (Speed over Groud) – rychlost vůči povrchu Země; informace je obsažena ve zprávě VTG

Data z protokolu NMEA byla zpracována pomocí již dříve zmíněného programu u-blox u-center (Obrázek 9). Tento software slouží k vyhodnocování dat z GNSS přijímačů, je uživatelsky přívětivý a nabízí možnosti úpravy uživatelského rozhraní dle osobních preferencí [73].

Oba GNSS přijímače byly nastaveny tak, aby v rámci protokolu vysílaly informace o poloze 5x za 1 s (každých 200 ms). Všechna data byla průběžně zaznamenávána a byl vytvořen soubor, tzv. „log“, pomocí kterého je možné si v softwaru zpětně přehrát průběh celého měření tak, jako by aktuálně probíhalo. Výhodou tohoto způsobu zaznamenávání je, že lze dodatečně zobrazovat i hodnoty, které při samotném měření v reálném čase nebyly předdefinovány k zobrazení. Uživatelské rozhraní bylo nastaveno tak, aby poskytovalo výše zmíněný textový výstup dat, ale také aby poskytovalo i grafický přehled o aktuální navigační situaci.



Obrázek 9: Prostředí programu u-blox u-center – screenshot

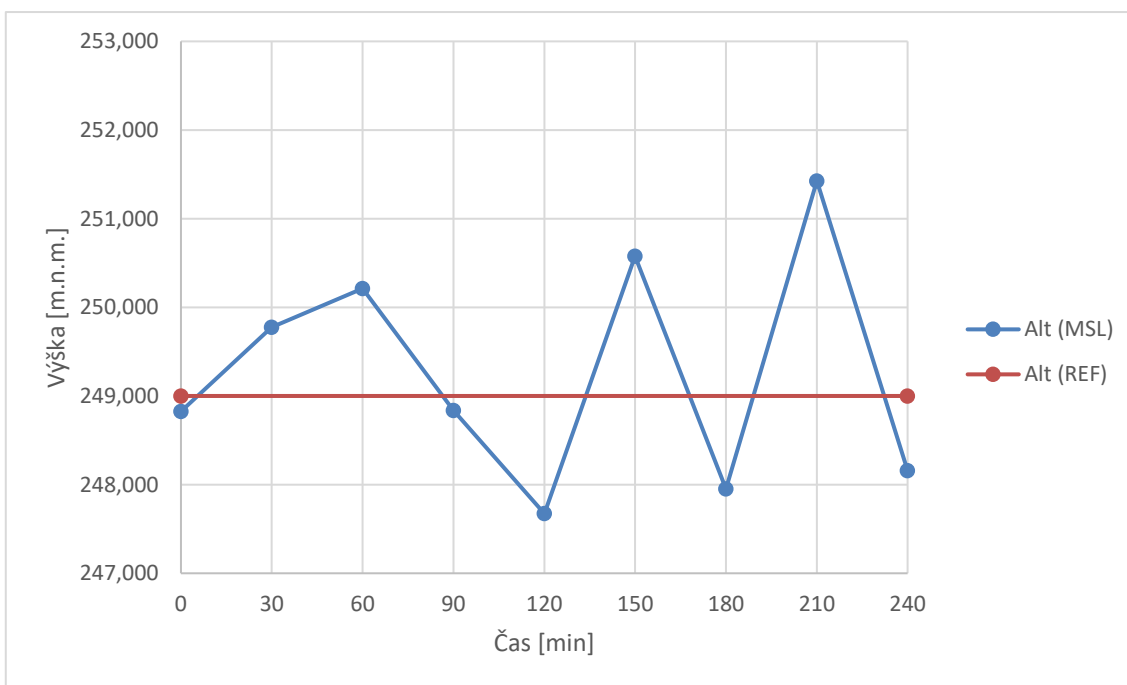
4 VERIFIKAČNÍ MĚŘENÍ PRO OVĚŘENÍ VERTIKÁLNÍ PŘESNOSTI

Verifikační měření pro ověření vertikální přesnosti zvolených GNSS přijímačů bylo rozděleno na dvě fáze – statické měření a dynamické měření. Tyto dvě fáze jsou detailně popsány v následujících kapitolách (4.1 a 4.2)

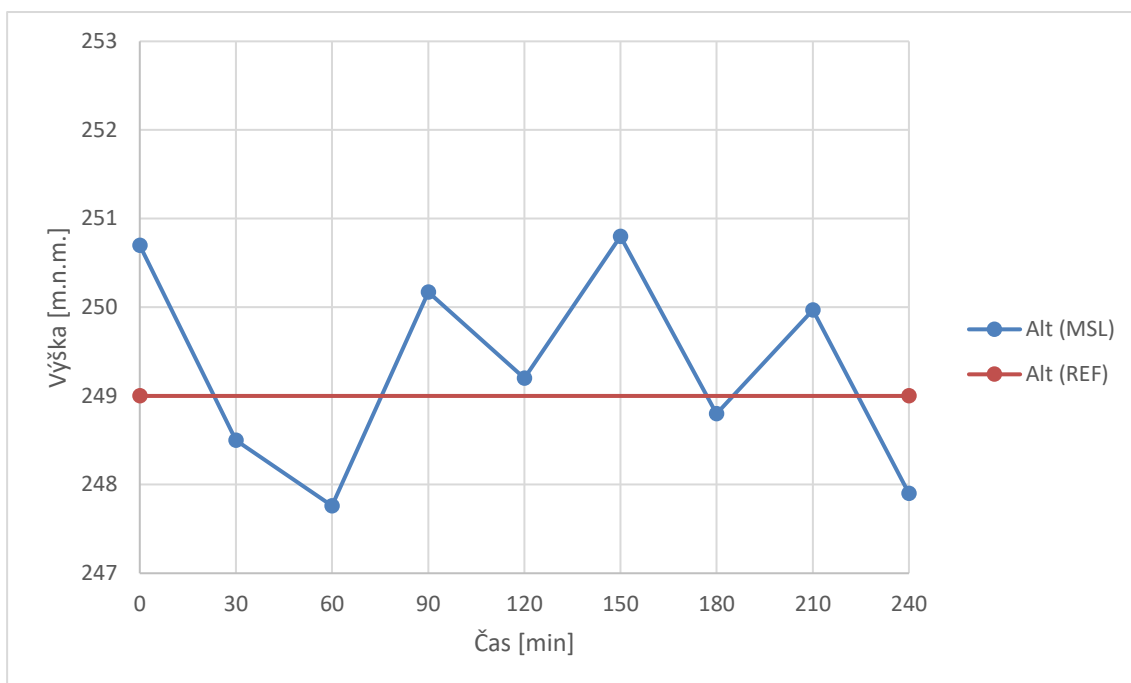
4.1 Statické měření

Za účelem ověření významnosti vlivu konstelace družic GNSS na vertikální určení polohy bylo provedeno statické měření. Předpokladem bylo, že vzhledem ke koncepci GNSS by stav výrazného zhoršení vertikální přesnosti neměl nastat. Statické měření probíhalo celkem 4 hodiny a data byla zaznamenávána každých 30 minut. Počátek záznamu je zaveden jako čas $t = 0$ a následují záznamy po 30minutách. Měření začínalo v čase 11:01:00 UTC. Tyto podmínky byly zvoleny na základě průzkumu a predikce polohy družic pomocí nástroje pro sledování pohybu GNSS satelitů – programu Orbitron.

Pro statické měření byly oba přijímače umístěny na stejné místo. Místo bylo zvoleno tak, aby při měření nedocházelo k případnému ovlivnění výsledků např. překážkami, které by mohly mít na měření výrazný vliv. Také bylo toto místo zvoleno, protože pro něj byla známa skutečná nadmořská výška, která mohla sloužit jako referenční výška pro vyhodnocení měření. V následujících grafech je zobrazena fluktuace indikované výšky v čase pro modul 3DR (Obrázek 10) a modul Navio2 (Obrázek 11).



Obrázek 10: Fluktuace indikované výšky v čase, modul 3DR



Obrázek 11: Fluktuační indikované výšky v čase, modul Navio2

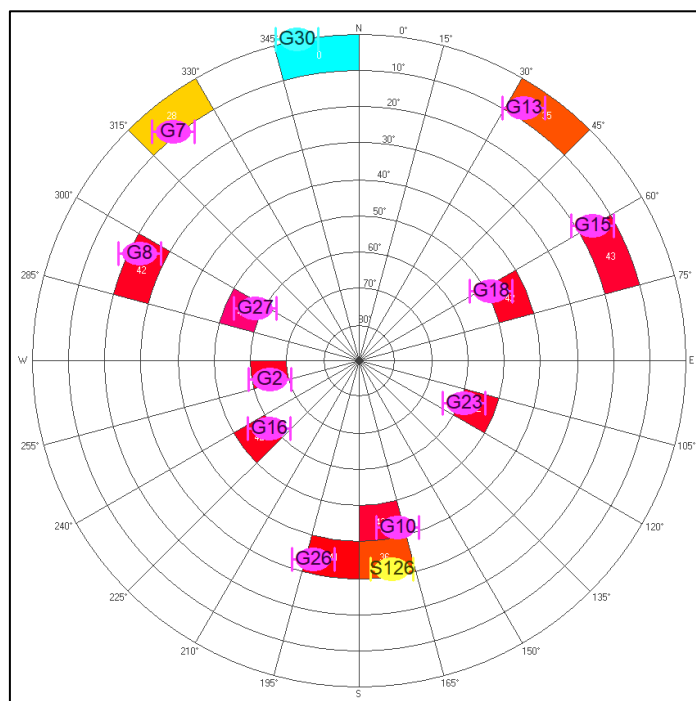
Z grafů fluktuační indikované výšky pro přijímač 3DR a přijímač Navio2 (Obrázek 10 a Obrázek 11) nelze zcela jednoznačně vydedukovat určitou závislost přesnosti indikované výšky v souvislosti s aktuální polohou satelitů GNSS. Měřená výška nepravidelně a velmi nepředvídatelně kolísala kolem referenční hodnoty 249 m. n. m. Pro přehlednost byly vyhotovena tabulka extrémů odchylek měření pro oba moduly (Tabulka 11).

Tabulka 11: Odchylky při statickém měření

Modul	3DR	Navio2
Minimální odchylka	0,16 m	0,20 m
Maximální odchylka	2,43 m	1,80 m

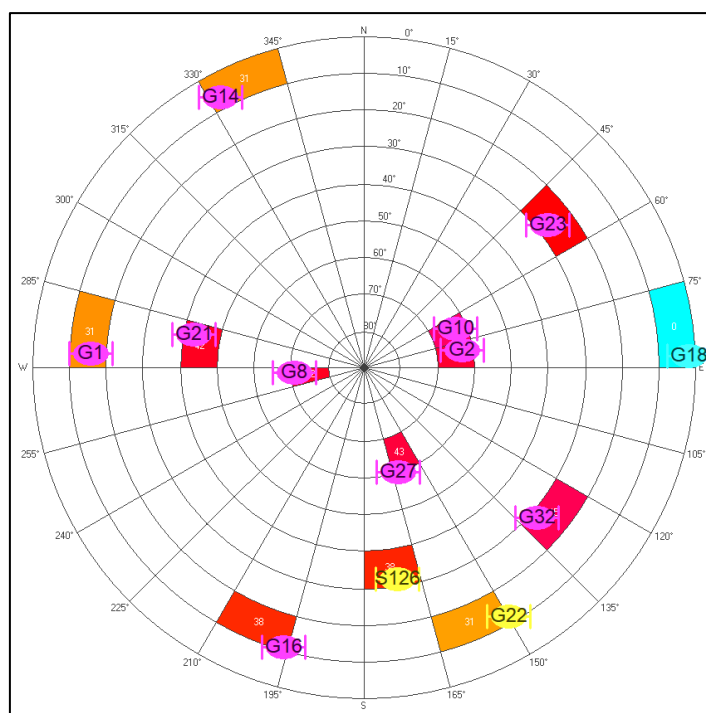
Pro podložení tvrzení, že nelze přímo odvodit závislost indikované výšky na aktuální poloze satelitů GNSS byly vytvořeny obrázky, na kterých je zobrazen počet a konstelace satelitů. Pro celkovou přehlednost jsou zde zobrazeny pouze konstelace pro nejlepší indikovaný stav (nejmenší odchylku měřené výšky od skutečné) a nejhorší indikovaný stav (největší odchylku měřené výšky od skutečné). Kompletní soubor konstelací, ze kterých byl učiněn závěr pro toto statické měření je v Příloze 1. V této příloze je také podrobněji uvedena legenda pro jednotlivé barevné odlišení družic. Pro tuto kapitolu je dostačující uvést, že přijímač aktuálně využívá družice zabarvené purpurově.

Pro modul 3DR byla dle tabulky nejmenší odchylka 0,16 m. Odchylka se projevila v čase 90 minut od počátku měření a počet družic využívaných pro určení polohy byl v této chvíli 11. Stav konstelace je znázorněn na obrázku (Obrázek 13).



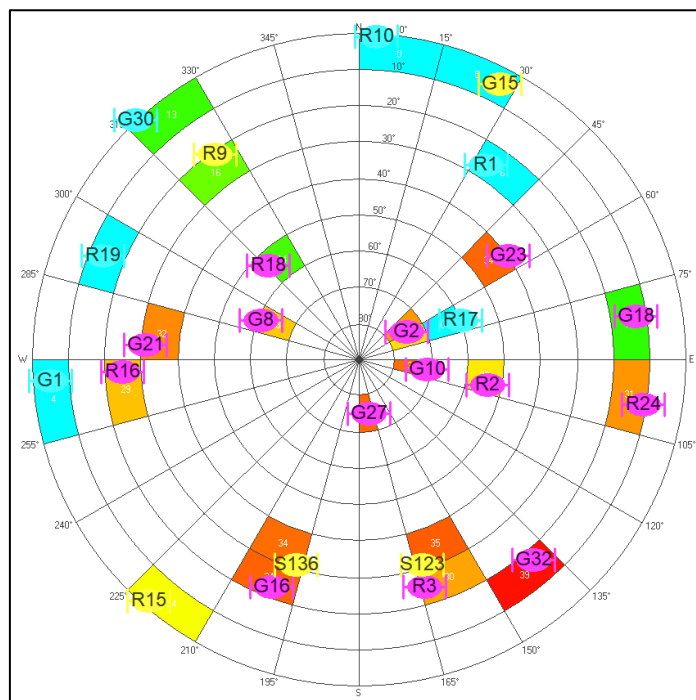
Obrázek 13: Konstelace při nejmenší odchylce, modul 3DR

Největší odchylka pro modul 3DR byla dle tabulky 2,43 m. Odchylka se projevila v čase 210 minut od počátku měření a počet družic využívaných pro určení polohy byl v této chvíli 10. Stav konstelace je znázorněn na obrázku (Obrázek 12).



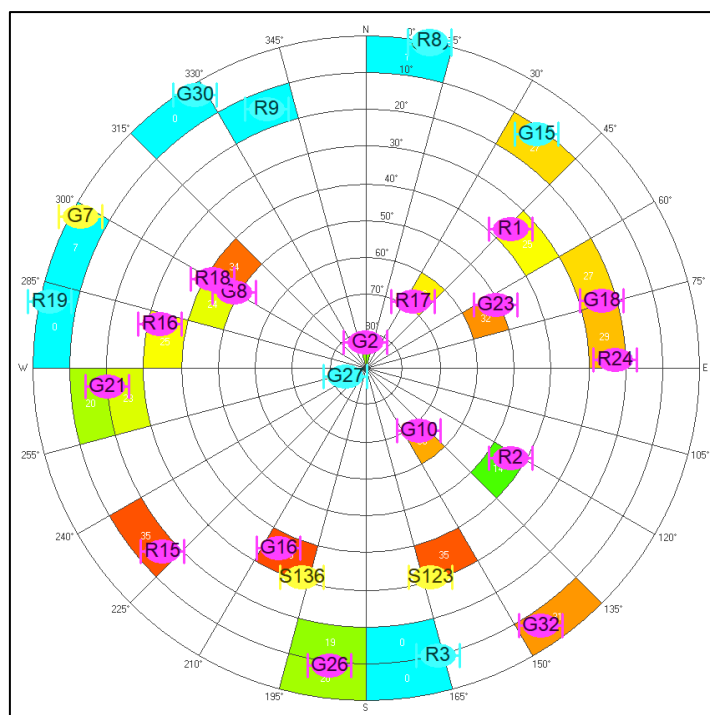
Obrázek 12: Konstelace při největší odchylce, modul 3DR

Pro modul Navio2 byla dle tabulky nejmenší odchylka měření 0,20 m. Odchylka se projevila v čase 180 minut od počátku měření a v této chvíli byl počet družic využívaných pro určení polohy 14. Stav konstelace je znázorněn na obrázku (Obrázek 15).



Obrázek 15: Konstelace při nejmenší odchylce, modul Navio2

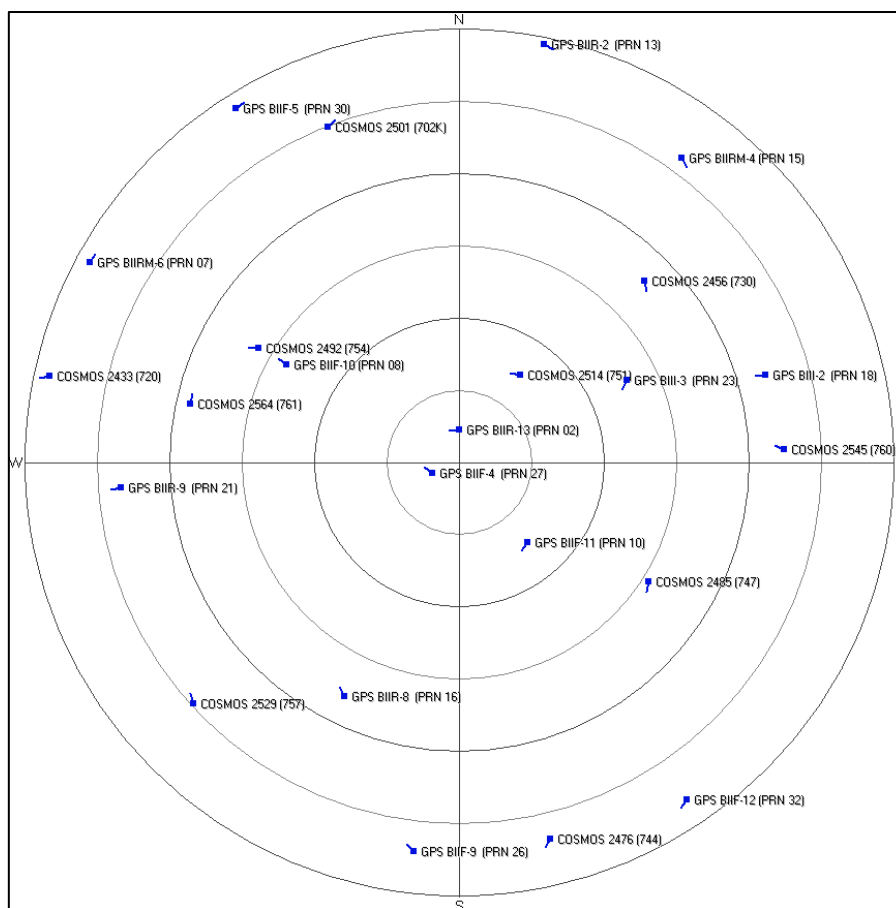
Největší odchylka pro modul Navio2 dosáhla dle tabulky hodnoty 1,80 m. Odchylka se projevila v čase 150 minut od počátku měření a v této chvíli byl počet využívaných družic pro určení polohy 16. Stav konstelace je znázorněn na obrázku (Obrázek 14).



Obrázek 14: Konstelace při největší odchylce, modul Navio2

Dále bylo ověřováno, zda jsou přijímače opravdu schopny přijímat všechny dostupné signály z GNSS systémů. Pro toto porovnání (stejně jako pro předběžnou predikci pohybu družic) sloužil výstup z programu Orbitron. Byly vygenerovány soubory konstelací v identických časech, jako bylo prováděno měření, tj. první vygenerovaná konstelace je

v čase 11:01:00 UTC a následují konstelace po 30minutách. Kompletní soubor konstelací vygenerovaný tímto způsobem je uveden v Příloze 2. Tento kompletní soubor byl využit pro již zmíněné ověření schopnosti příjmu dostupných signálů. Pro názornost je uvedena ukázka (Obrázek 16), kterou lze porovnat s konstelací přijímaných signálů (Obrázek 15).



Obrázek 16: Předpokládaná konstelace satelitů v čase $t + 150$ minut – výstup z programu Orbitron

Při ověření bylo zjištěno, že u družic, které již mají malý elevační úhel (jsou nízko nad obzorem) dochází k problémům s příjmem signálu – družice se „ztratí“ z konstelace. Toto je pravděpodobně způsobeno vlivem troposféry. Blíže je tento faktor popsán v kapitole 1.1.

Počet družic dostupných nad obzorem a použitelných pro navigaci se při tomto statickém měření pohyboval pro systém GPS od 9 do 13 družic a pro systém GLONASS od 5 do 7 družic.

Přesnost by na konstelaci a počtu dostupných satelitů měla být závislá (kapitola 1.1), ale během tohoto měření družice systému GPS, ani systému GLONASS nedosáhly vyloženě nevhodné relativní polohy. Spíše se jednalo o proměnlivý počet družic dostupných nad obzorem, který ale také dle pozorování neměl přímou souvislost s kolísáním měřené výšky.

Kolísání měřené výšky je vzhledem k velikosti odchylek považováno v mezích tolerance. Výrobce obou přijímačů sice přímo neuvádí vertikální přesnost přijímačů, ale na základě principu GNSS lze dospět k tvrzení, že nároky na vertikální přesnost těchto přijímačů budou o něco nižší než nároky na jejich horizontální přesnost. Přijímače však i přesto dosáhly vertikální přesnosti, která splňuje hodnoty výrobcem uváděné

horizontální přesnosti. Mezi faktory, které způsobovaly pozorované kolísání okolo referenční hodnoty výšky by mohly patřit:

- vnitřní chyba samotného přijímače (například chyba jeho hodin)
- možná kolísající teplota přijímačů a tím způsobená mírná změna parametrů elektroniky v čase (měření probíhalo za jasného počasí, ale občasně foukal mírný vítr)
- zpracování odražených signálů (měření probíhalo v zastavěné oblasti, kde sice budovy nebyly v takové blízkosti přijímačů, aby poskytovaly stínění signálů, ale mohly přispívat k projevení nežádoucího jevu odražení)

4.2 Dynamické měření

Pro ověření schopnosti vertikálního vedení bylo provedeno dynamické měření se zvolenými GNSS přijímači. Toto měření probíhalo při jízdě automobilem. Za účelem měření byl vybrán dostatečně dlouhý, rovný a rovnoměrně klesající úsek silnice pro simulaci sestupové trajektorie na přistání. Vhodný úsek silnice (Obrázek 17) byl nalezen mezi obcemi Hlučín a Kozmice na silnici 56. Jelikož se v určité části úseku vyskytuje železniční most, který by mohl mít výrazný vliv na výsledky měření, byl vybrán úsek o délce 800 metrů, který tento most nezahrnoval.



Obrázek 17: Vhodný úsek silnice – fotografie z palubní kamery

Pro uchycení na vozidle bylo nutné navrhnout a vyrobit montážní přípravek (Obrázek 18), který umožní umístění antén GNSS přijímačů vně vozidla tak, aby bylo možné eliminovat vliv stínění signálu karoserií vozu. Takovéto provedení montážního přípravku bylo jedním z hlavních důvodů, proč byla pro verifikační měření zvolena rychlost jízdy 80 km/h. Při vyšší rychlosti by mohlo dojít k uvolnění a případnému oddělení přijímačů z přípravku, což by bylo velice nežádoucí. Zároveň tato rychlost také vzhledem k nastavené frekvenci odesílání dat o poloze (5x za sekundu) poskytovala možnost výškového záznamu po každých přibližně 4,5 metrech uražené vzdálenosti.



Obrázek 18: Montážní přípravek pro uchycení GNSS přijímačů; chybná instalace antén

Pro ověření vlivů stavu ionosféry na přijímaný signál GNSS probíhala jedna sada měření okolo poledne a druhá sada měření okolo půlnoci.

Po těchto prvních dvou sadách měření s každým přijímačem a předběžné analýze naměřených hodnot byla pozorována vysoká nepřesnost u modulu Navio2, která byla v rozporu s očekáváním. Tento problém byl konzultován s technickou podporou výrobce a bylo doporučeno umístit anténu dále od řídicí elektroniky, protože stávající umístění v těsné blízkosti antény mohlo způsobit interferenci. Na základě tohoto doporučení bylo upraveno rozmístění komponent na montážním přípravku (Obrázek 19) a celé měření bylo zopakováno. Vysokou nepřesnost názorně ukazuje i graf závislosti směrodatné odchylky měření na vzdálenosti (Obrázek v kapitole 4.3.3).



Obrázek 19: Montážní přípravek pro uchycení GNSS přijímačů; vhodná instalace antén

Celkem byly provedeny čtyři sady dynamického měření pro každý z přijímačů – dvě sady ve dne a dvě sady v noci. Jedna sada dynamických měření obsahovala celkem 9 průjezdů stanovené trajektorie. Celkem tedy pro oba přijímače bylo provedeno 72 měření (36 pro každý z přijímačů). V následující kapitole je vyhotoveno porovnání těchto měření s referenční trajektorií včetně statistického vyhodnocení a kapitola 6 se zabývá zhodnocením přesnosti a využitelnosti testovaných přijímačů.

5 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ

Aby bylo možné určitým způsobem vyhodnotit přesnost informace o výšce z GNSS přijímačů, bylo zapotřebí získat informaci o referenční trajektorii, tzn. informace o překonané vzdálenosti a o přesné výšce v konkrétním bodě zadaném zeměpisnými souřadnicemi.

K tomuto účelu byla využita online služba Geoportálu ČÚZK (Český úřad zeměměřičský a katastrální), která využívá digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR5G), který představuje zobrazení přirozeného nebo lidskou činností upraveného zemského povrchu v digitálním tvaru ve formě výšek diskretních bodů v nepravidelné trojúhelníkové síti (TIN) bodů o souřadnicích X, Y, H, kde H reprezentuje nadmořskou výšku ve výškovém referenčním systému Balt po vyrovnání (Bpv) s úplnou střední chybou výšky 0,18 m v odkrytém terénu.

DMR5G se využívá při projektování pozemkových úprav, plánování a projektování pozemních staveb, modelování přírodních jevů, také je zdrojem dat pro tvorbu vrstevnic mapových podkladů velkých měřítek a počítačových vizualizací výškopisu v informačních systémech. [74]

Funkce analýzy výškopisu geoportálu jsou k dispozici zdarma online a mimo jiné umožňují na základě uvedení sady zeměpisných souřadnic ve formátu GPX k těmto souřadnicím dopočítat z modelu DMR5G jejich nadmořské výšky a vzájemnou povrchovou vzdálenost v metrech.

Grafy uvedené v následujících kapitolách znázorňují závislost výšky změřené GNSS modulem na uražené vzdálenosti a referenční výšku získanou z DMR5G pomocí služeb analýzy výškopisu geoportálu ČÚZK.

Referenční nadmořská výška získaná pomocí nástroje ČÚZK byla pro následné vyhodnocení upravena tak, jako by se jednalo o sestupovou trajektorii k přistání, tj. byla zvolena nulová výška h_{ref0} , která byla ve výšce 232,43 m. n. m. K této základní výšce byly následně vztaženy všechny výškové údaje.

V následujících podkapitolách 4.3.1 až 4.3.8 je provedeno porovnání indikovaných výškových trajektorií přijímače 3DR a přijímače Navio2 s trajektorií referenčními.

Pro měření byly definovány podmínky, za kterých měření probíhalo (uvedeno v kapitole 4.2), ale pro přehlednost byla vyhotovena i tabulka (Tabulka 12). V této tabulce jsou také uvedeny časové údaje o tom, kdy byly prováděny jednotlivé sady měření.

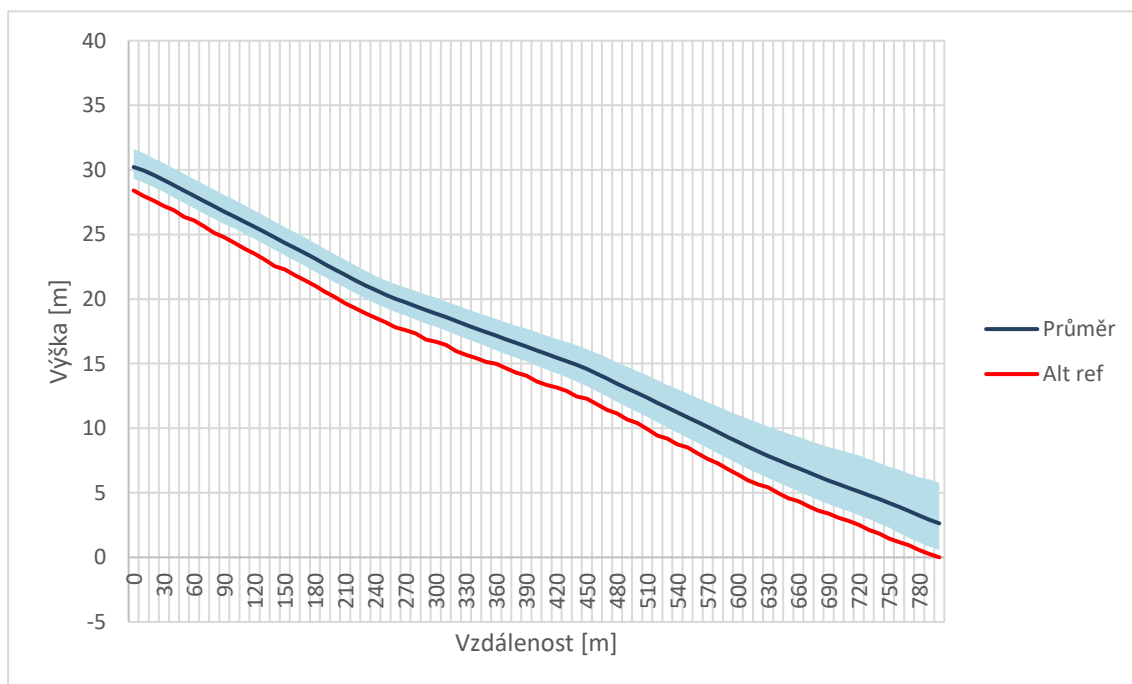
Tabulka 12: Průvodní informace o měření

Konstantní rychlost pohybu vozidla	80 km/h
Délka měřeného úseku	800 m
Modul 3DR – sada měření č. 1	11:12:00 – 11:39:00 UTC
Modul Navio2 – sada měření č. 1	
Modul 3DR – sada měření č. 2	22:34:00 – 22:55:00 UTC
Modul Navio2 – sada měření č. 2	
Modul 3DR – sada měření č. 3	15:44:00 – 16:07:00 UTC
Modul Navio2 – sada měření č. 3	
Modul 3DR – sada měření č. 4	22:17:00 – 22:37:00 UTC
Modul Navio2 – sada měření č. 4	

5.1 Modul 3DR – sada měření č. 1

V rámci této sady měření bylo provedeno celkem devět měřících průjezdů zvolené trajektorie v časovém rozpětí uvedeném v Tabulce 12. Jednalo se jak o průjezdy v sestupném, tak o průjezdy ve vzestupném směru. Zaznamenané hodnoty výšek při jednotlivých průjezdech byly jednotně normalizovány, aby bylo docíleno jejich sestupného charakteru. Pro přehlednost jsou zobrazeny v Grafu 1 v Příloze C, protože slouží pouze jako výchozí hodnoty pro další vyhodnocení

Z těchto naměřených hodnot byla následně vytvořena analýza, která je vyobrazena v grafu (Obrázek 20). V rámci této analýzy byla vypočítána průměrná hodnota pro každý z bodů naměřené trajektorie a z těchto průměrných hodnot byla vynesena křivka průměrné vertikální trajektorie (v grafu označená jako „Průměr“) zahrnující všech devět měřících průjezdů. Do tohoto grafu byla také umístěna křivka referenční vertikální trajektorie (v grafu označená jako „Alt ref“). Světle modré pole reflektuje rozsah minimálních a maximálních naměřených výškových hodnot při všech devíti průjezdech.



Obrázek 20: Analýza dat modulu 3DR, měření č. 1

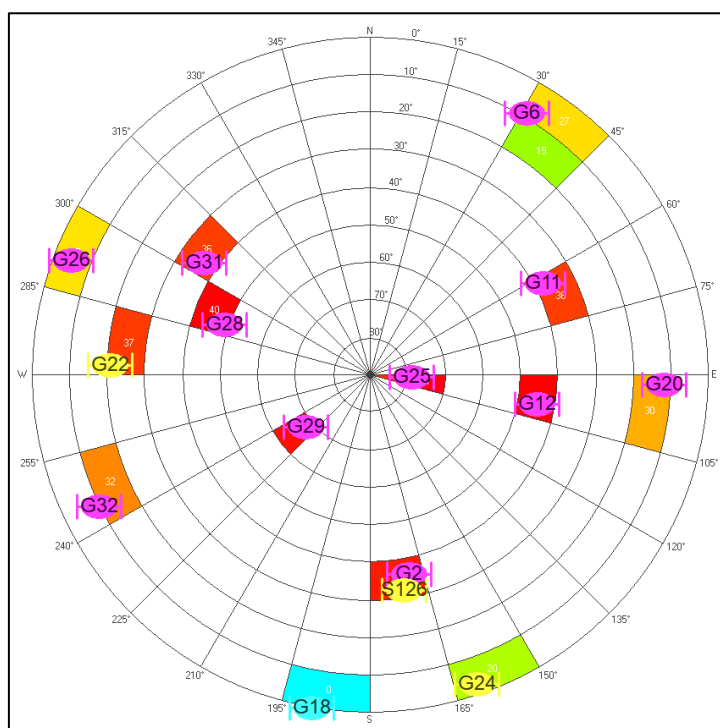
Z naměřených hodnot byly vypočítány statistické veličiny uvedené v tabulce (Tabulka 13). Jedná se o charakteristiky variability, které identifikují, jak moc jsou navzájem jednotlivé naměřené hodnoty odlišné.

Tabulka 13: Charakteristiky variability, modul 3DR, měření č. 1

Průměrná odchylka	0,84 m
Rozptyl	0,95 m ²
Variační rozpětí	5,22 m

Jak vyplývá z grafu (Obrázek 20) průměrně se hodnoty všech naměřených vertikálních poloh pohybovaly nad referenční trajektorií. Dokonce ani rozsah minimálních a maximálních hodnot neprotnul referenční trajektorii. V průběhu posledních asi 150 m lze pozorovat postupné rozšiřování spektra minimálních a maximálních hodnot. Tento jev mohl být způsoben postupným slábnutím signálu z družic, které mohl zakrývat blížící se železniční most a tím zhoršit přesnost ve vertikální rovině.

Na následujícím obrázku (Obrázek 21) je zobrazena konstelace družic pro vyhodnocovanou sadu měření. Z obrázku je patrné, že modul v této situaci využíval k navigaci signály z jedenácti družic systému GPS (purpurová barva). Z dalších dvou družic přijímal signál, ale nevyužíval je k navigaci (žlutá barva) a z jedné družice přijímal signál, ale v nedostatečné kvalitě (modrá barva).

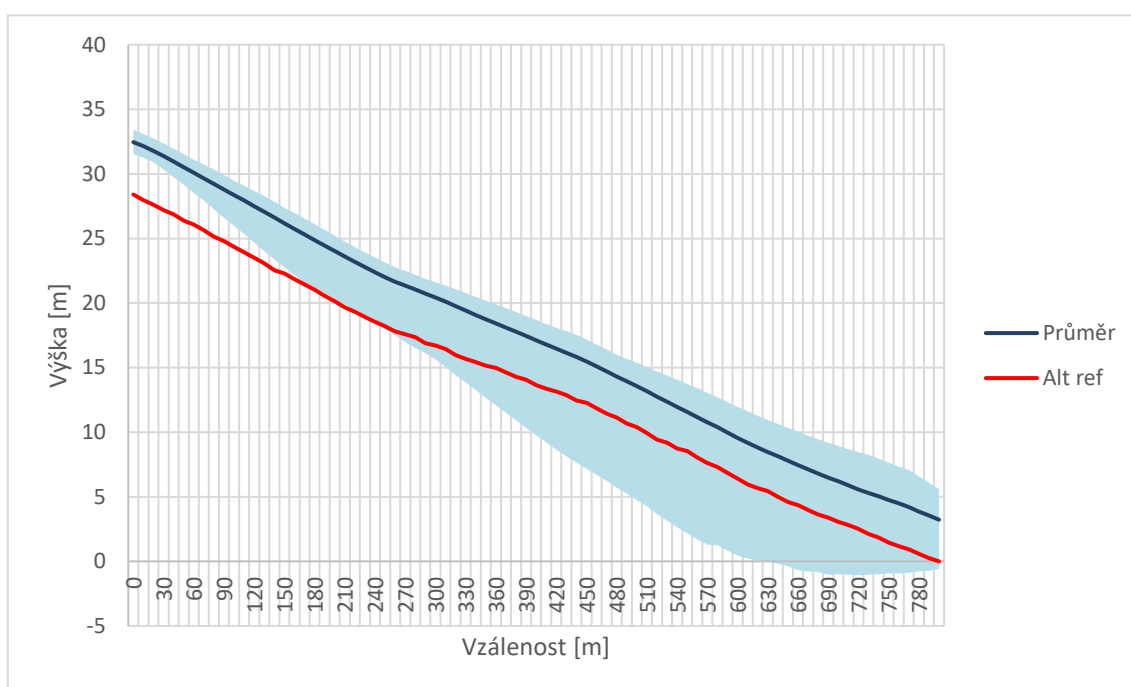


Obrázek 21: Konstelace družic při měření č. 1 - modul 3DR

5.2 Modul 3DR – sada měření č. 2

V rámci této sady měření bylo provedeno celkem devět měřících průjezdů zvolené trajektorie v časovém rozpětí uvedeném v Tabulce 12. Jednalo se jak o průjezdy v sestupném, tak o průjezdy ve vzestupném směru. Zaznamenané hodnoty výšek při jednotlivých průjezdech byly jednotně normalizovány, aby bylo docíleno jejich sestupného charakteru. Pro přehlednost jsou zobrazeny v Grafu 2 v Příloze C, protože slouží pouze jako výchozí hodnoty pro další vyhodnocení

Z těchto naměřených hodnot byla následně vytvořena analýza, která je vyobrazena v grafu (Obrázek 22). V rámci této analýzy byla vypočítána průměrná hodnota pro každý z bodů naměřené trajektorie a z těchto průměrných hodnot byla vynesena křivka průměrné vertikální trajektorie (v grafu označená jako „Průměr“) zahrnující všech devět měřících průjezdů. Do tohoto grafu byla také umístěna křivka referenční vertikální trajektorie (v grafu označená jako „Alt ref“). Světle modré pole reflektuje rozsah minimálních a maximálních naměřených výškových hodnot při všech devíti průjezdech.



Obrázek 22: Analýza dat modulu 3DR, měření č. 2

Z naměřených hodnot byly vypočítány statistické veličiny uvedené v tabulce (Tabulka 14). Jedná se o charakteristiky variability, které identifikují, jak moc jsou navzájem jednotlivé naměřené hodnoty odlišné.

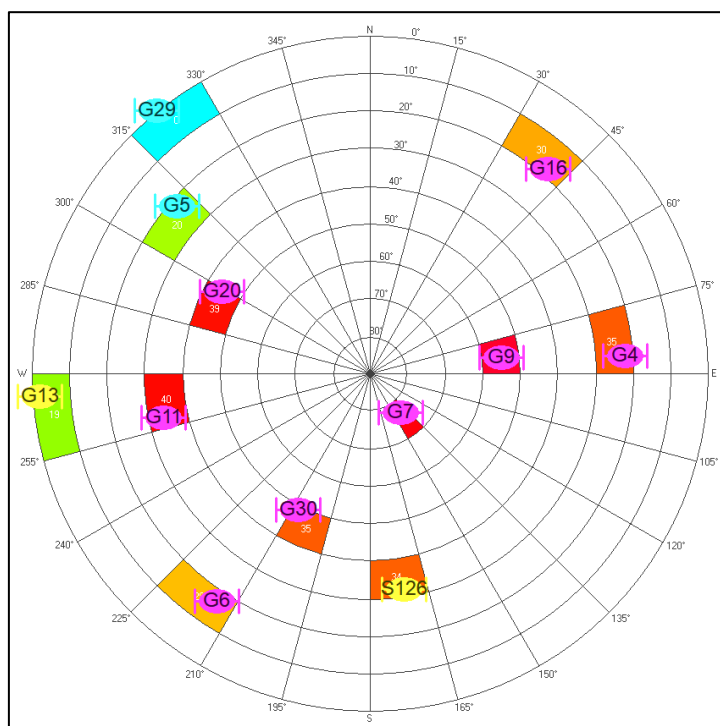
Tabulka 14: Charakteristiky variability, modul 3DR, měření č. 2

Průměrná odchylka	1,38 m
Rozptyl	5,32 m ²
Variační rozpětí	11,74 m

Jak vyplývá z grafu (Obrázek 22) průměrně se hodnoty všech naměřených vertikálních poloh opět pohybovaly nad referenční trajektorii, avšak rozsah minimálních a maximálních hodnot narůstal s rostoucí uraženou vzdáleností. Při nahlédnutí do Grafu 2 v příloze C lze zjistit, že výsledky měření výrazně ovlivnily naměřené hodnoty z průjezdu číslo 7. Vzhledem k tomu, že měření probíhalo v noci, bylo nepravděpodobné, že by bylo takovéto ovlivnění způsobeno ionosférou.

Tato výrazná odchylka se projevila pouze při jednom průjezdu. Jeden průjezd trajektorie trval okolo 36 sekund a zrovna v této chvíli mohlo nastat určité elektromagnetické rušení a přesnost tím mohla být výrazně ovlivněna.

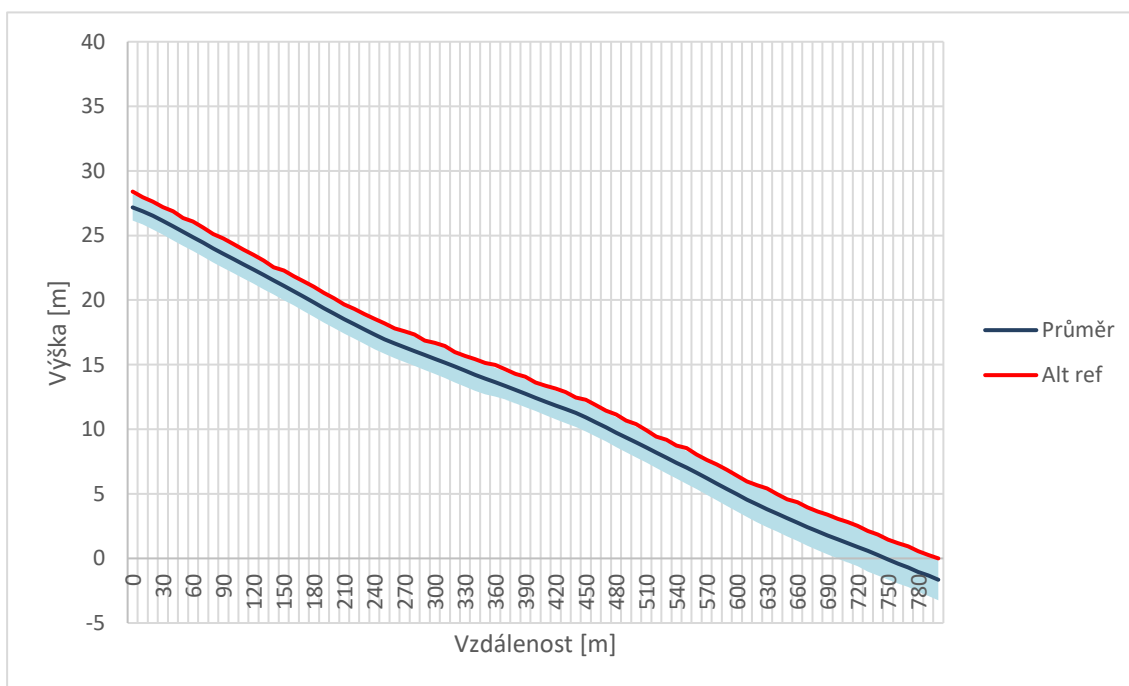
Na následujícím obrázku (Obrázek 23) je zobrazena konstelace družic pro vyhodnocovanou sadu měření. Z obrázku je patrné, že modul v této situaci využíval k navigaci signály z osmi družic systému GPS (purpurová barva). Z jedné družice přijímal signál, ale nevyužíval ji k navigaci (žlutá barva) a ze dvou družic přijímal signál, ale v nedostatečné kvalitě (modrá barva). Pokud opravdu nastalo výše zmíněné rušení, mohl být signál určitým způsobem ovlivněn, protože například oproti konstelaci pro sadu měření č. 1 je tato konstelace slabší.



5.3 Modul 3DR – sada měření č. 3

V rámci této sady měření bylo provedeno opět celkem devět měřících průjezdů zvolené trajektorie v časovém rozpětí uvedeném v Tabulce 12, avšak již po úpravě konfigurace antén přijímačů. Jednalo se jak o průjezdy v sestupném, tak o průjezdy ve vzestupném směru. Zaznamenané hodnoty výšek při jednotlivých průjezdech byly jednotně normalizovány, aby bylo docíleno jejich sestupného charakteru. Pro přehlednost jsou zobrazeny v Grafu 3 v Příloze C, protože slouží pouze jako výchozí hodnoty pro další vyhodnocení

Z těchto naměřených hodnot byla následně vytvořena analýza, která je vyobrazena v grafu (Obrázek 24). V rámci této analýzy byla vypočítána průměrná hodnota pro každý z bodů naměřené trajektorie a z těchto průměrných hodnot byla vynesena křivka průměrné vertikální trajektorie (v grafu označená jako „Průměr“) zahrnující všech devět měřících průjezdů. Do tohoto grafu byla také umístěna křivka referenční vertikální trajektorie (v grafu označená jako „Alt ref“). Světle modré pole reflektuje rozsah minimálních a maximálních naměřených výškových hodnot při všech devíti průjezdech.



Obrázek 24: Analýza dat modulu 3DR, měření č. 3

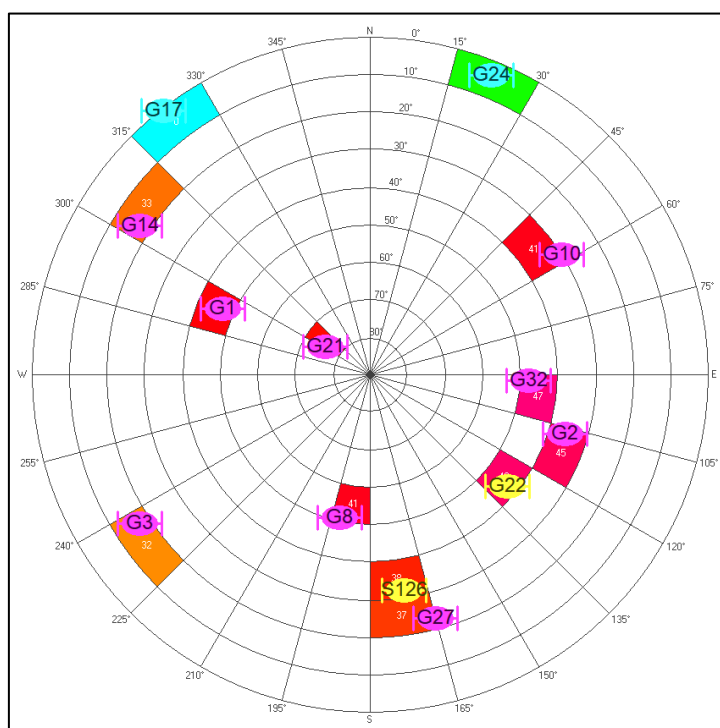
Z naměřených hodnot byly vypočítány statistické veličiny uvedené v tabulce (Tabulka 15). Jedná se o charakteristiky variability, které identifikují, jak moc jsou navzájem jednotlivé naměřené hodnoty odlišné.

Tabulka 15: Charakteristiky variability, modul 3DR, měření č. 3

Průměrná odchylka	0,67 m
Rozptyl	0,67 m ²
Variační rozpětí	3,28 m

Jak vyplývá z grafu (Obrázek 24) průměrně se hodnoty všech naměřených vertikálních poloh při tomto měření pohybovaly pod referenční trajektorií. Rozsah minimálních a maximálních hodnot se mírně dotkl referenční trajektorie. V průběhu posledních asi 150 m lze opět pozorovat, tak jako tomu bylo při sadě měření č. 1, postupné rozšiřování spektra minimálních a maximálních hodnot, avšak v podstatně menší míře. Tento jev mohl být také způsoben postupným slábnutím signálu z družic, které mohl zakrývat blížící se železniční most a tím zhoršit přesnost ve vertikální rovině.

Na následujícím obrázku (Obrázek 25) je zobrazena konstelace družic pro vyhodnocovanou sadu měření. Z obrázku je patrné, že modul v těchto situacích využíval k navigaci signály z devíti družic systému GPS (purpurová barva). Z jedné družice přijímal signál, ale nevyužíval jej k navigaci (žlutá barva) a ze dvou družic přijímal signál, ale v nedostatečné kvalitě (modrá barva).

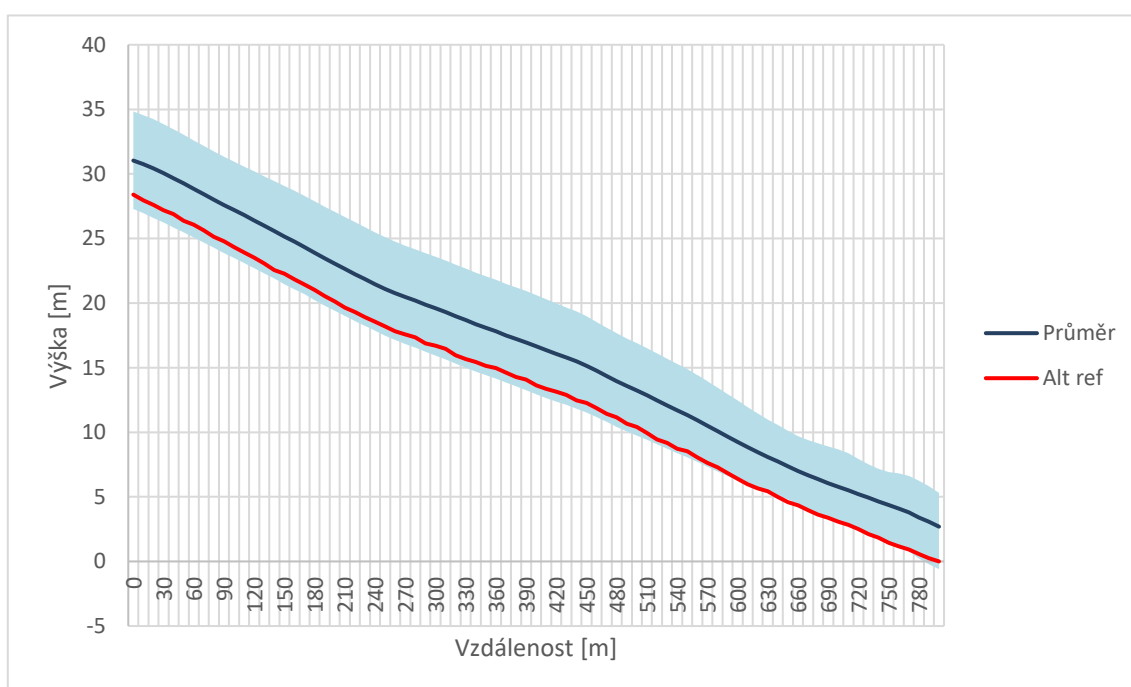


Obrázek 25: Konstelace družic při měření č. 3 - modul 3DR

5.4 Modul 3DR – sada měření č. 4

V rámci této sady měření bylo provedeno celkem devět měřících průjezdů zvolené trajektorie v časovém rozpětí uvedeném v Tabulce 12. Jednalo se jak o průjezdy v sestupném, tak o průjezdy ve vzestupném směru. Zaznamenané hodnoty výšek při jednotlivých průjezdech byly jednotně normalizovány, aby bylo docíleno jejich sestupného charakteru. Pro přehlednost jsou zobrazeny v Grafu 4 v Příloze C, protože slouží pouze jako výchozí hodnoty pro další vyhodnocení.

Z těchto naměřených hodnot byla následně vytvořena analýza, která je vyobrazena v grafu (Obrázek 26). V rámci této analýzy byla vypočítána průměrná hodnota pro každý z bodů naměřené trajektorie a z těchto průměrných hodnot byla vynesena křivka průměrné vertikální trajektorie (v grafu označená jako „Průměr“) zahrnující všech devět měřících průjezdů. Do tohoto grafu byla také umístěna křivka referenční vertikální trajektorie (v grafu označená jako „Alt ref“). Světle modré pole reflektuje rozsah minimálních a maximálních naměřených výškových hodnot při všech devíti průjezdech.



Obrázek 26: Analýza dat modulu 3DR, měření č. 4

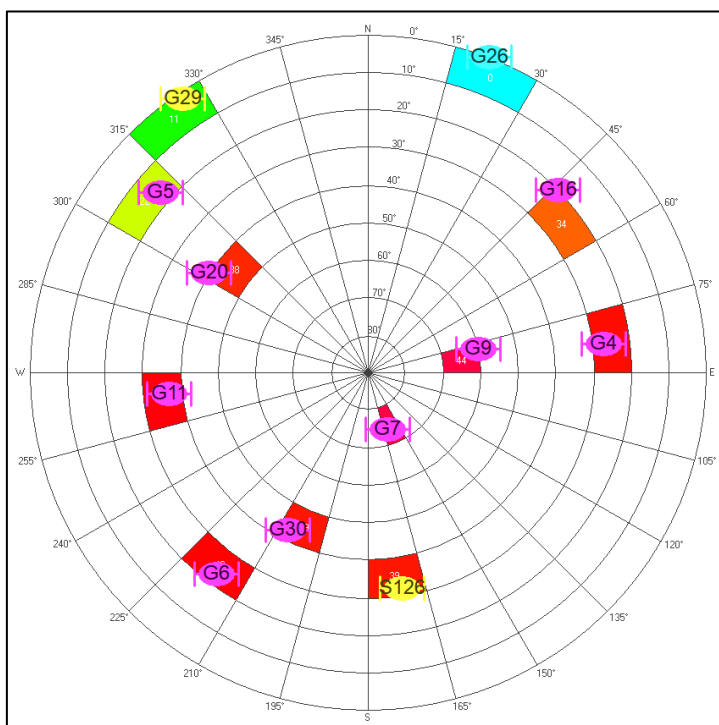
Z naměřených hodnot byly vypočítány statistické veličiny uvedené v tabulce (Tabulka 16). Jedná se o charakteristiky variability, které identifikují, jak moc jsou navzájem jednotlivé naměřené hodnoty odlišné.

Tabulka 16: Charakteristiky variability, modul 3DR, měření č. 4

Průměrná odchylka	1,51 m
Rozptyl	4,05 m ²
Variační rozpětí	7,69 m

Jak vyplývá z grafu (Obrázek 26) průměrně se hodnoty všech naměřených vertikálních poloh při tomto měření pohybovaly nad referenční trajektorií. Rozsah minimálních a maximálních hodnot ve většině případů protnul referenční trajektorii, avšak oproti předcházejícímu měření – sadě měření č. 3 byl tento rozsah několikanásobně větší. Lze také pozorovat, že s klesající výškou se rozsah mírně snižuje. Tento průběh je vzhledem k poměrně dobré konstelaci družic (Obrázek 27) zvláštní.

Z obrázku je patrné, že modul v těchto situacích využíval k navigaci signály z devíti družic systému GPS (purpurová barva). Z jedné družice přijímal signál, ale nevyužíval jej k navigaci (žlutá barva) a ze dvou družic přijímal signál, ale v nedostatečné kvalitě (modrá barva).

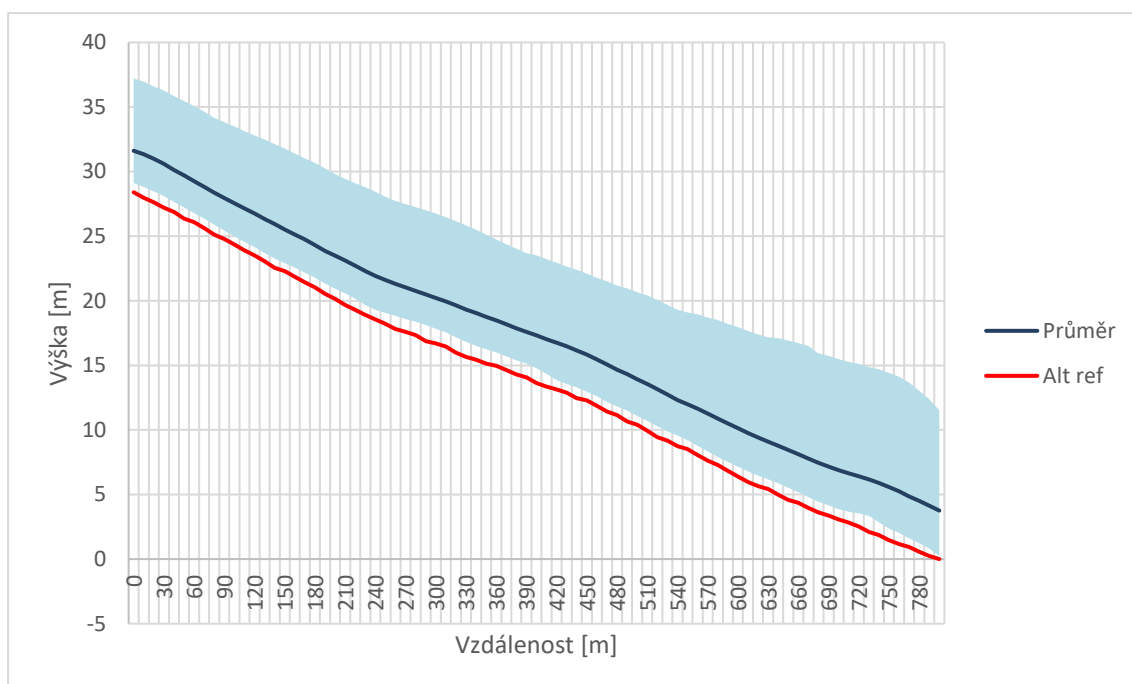


Obrázek 27: Konstelace družic při měření č. 4 - modul 3DR

5.5 Modul Navio2 – sada měření č. 1

V rámci této sady měření bylo provedeno celkem devět měřících průjezdů zvolené trajektorie v časovém rozpětí uvedeném v Tabulce 12. Jednalo se jak o průjezdy v sestupném, tak o průjezdy ve vzestupném směru. Zaznamenané hodnoty výšek při jednotlivých průjezdech byly jednotně normalizovány, aby bylo docíleno jejich sestupného charakteru. Pro přehlednost jsou zobrazeny v Grafu 5 v Příloze C, protože slouží pouze jako výchozí hodnoty pro další vyhodnocení.

Z těchto naměřených hodnot byla následně vytvořena analýza, která je vyobrazena v grafu (Obrázek 28). V rámci této analýzy byla vypočítána průměrná hodnota pro každý z bodů naměřené trajektorie a z těchto průměrných hodnot byla vynesena křivka průměrné vertikální trajektorie (v grafu označená jako „Průměr“) zahrnující všech devět měřících průjezdů. Do tohoto grafu byla také umístěna křivka referenční vertikální trajektorie (v grafu označená jako „Alt ref“). Světle modré pole reflektuje rozsah minimálních a maximálních naměřených výškových hodnot při všech devíti průjezdech.



Obrázek 28: Analýza dat modulu Navio2, měření č. 1

Z naměřených hodnot byly vypočítány statistické veličiny uvedené v tabulce (Tabulka 17). Jedná se o charakteristiky variability, které identifikují, jak moc jsou navzájem jednotlivé naměřené hodnoty odlišné.

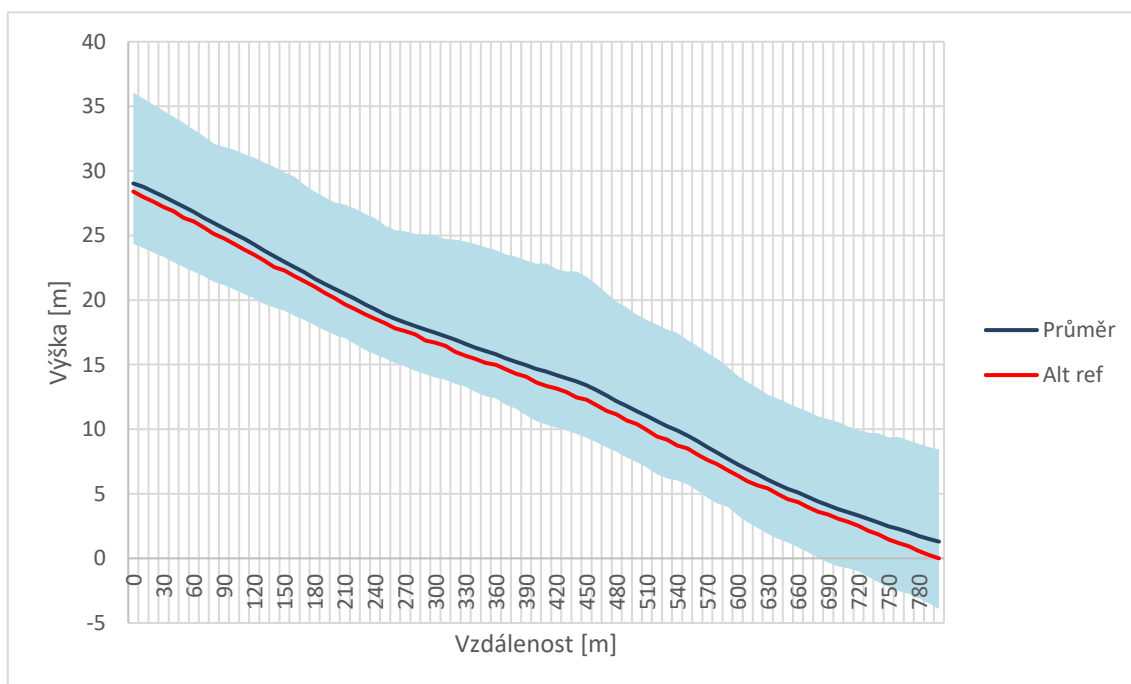
Tabulka 17: Charakteristiky variability, modul Navio2, měření č. 1

Průměrná odchylka	1,67 m
Rozptyl	7,02 m ²
Variační rozpětí	12,10 m

5.6 Modul Navio2 – sada měření č. 2

V rámci této sady měření bylo provedeno celkem devět měřících průjezdů zvolené trajektorie v časovém rozpětí uvedeném v Tabulce 12. Jednalo se jak o průjezdy v sestupném, tak o průjezdy ve vzestupném směru. Zaznamenané hodnoty výšek při jednotlivých průjezdech byly jednotně normalizovány, aby bylo docíleno jejich sestupného charakteru. Pro přehlednost jsou zobrazeny v Grafu 6 v Příloze C, protože slouží pouze jako výchozí hodnoty pro další vyhodnocení.

Z těchto naměřených hodnot byla následně vytvořena analýza, která je vyobrazena v grafu (Obrázek 30). V rámci této analýzy byla vypočítána průměrná hodnota pro každý z bodů naměřené trajektorie a z těchto průměrných hodnot byla vynesena křivka průměrné vertikální trajektorie (v grafu označená jako „Průměr“) zahrnující všech devět měřících průjezdů. Do tohoto grafu byla také umístěna křivka referenční vertikální trajektorie (v grafu označená jako „Alt ref“). Světle modré pole reflektuje rozsah minimálních a maximálních naměřených výškových hodnot při všech devíti průjezdech.



Obrázek 30: Analýza dat modulu Navio2, měření č. 2

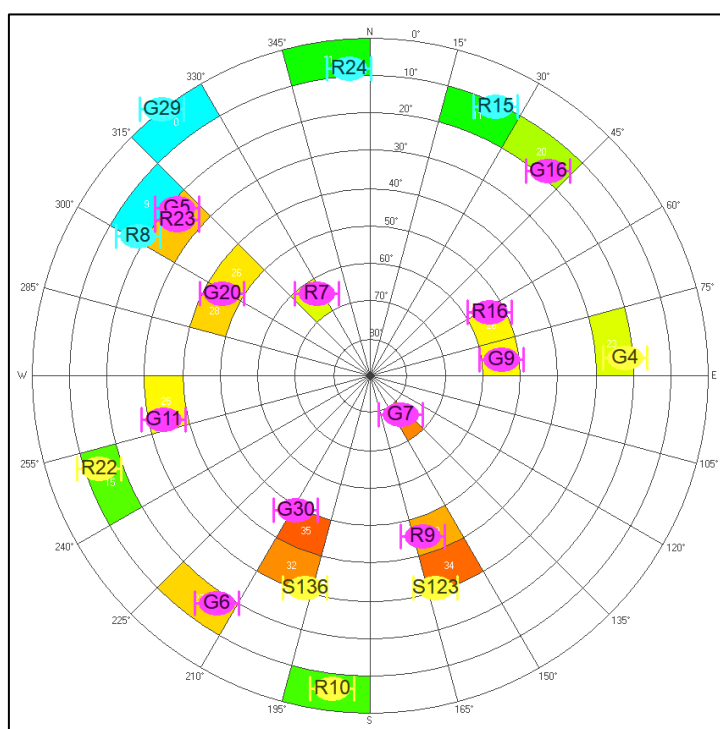
Z naměřených hodnot byly vypočítány statistické veličiny uvedené v tabulce (Tabulka 18). Jedná se o charakteristiky variability, které identifikují, jak moc jsou navzájem jednotlivé naměřené hodnoty odlišné.

Tabulka 18: Charakteristiky variability, modul Navio2, měření č. 2

Průměrná odchylka	2,86 m
Rozptyl	13,21 m ²
Variační rozpětí	12,58 m

Jak vyplývá z grafu (Obrázek 30) průměrně se hodnoty všech naměřených vertikálních poloh při tomto měření pohybovaly mírně nad referenční trajektorií, avšak trajektorii poměrně dobře kopírovaly. Rozsah minimálních a maximálních hodnot referenční trajektorii protnul, ale byl rozložený spíše nad průměrné hodnoty. Lze také pozorovat, že s klesající výškou rozsah poměrně znatelně kolísá a v závěru stoupá. Charakter tohoto průběhu mohl být i v tomto případě ovlivněn převážně chybnou instalací antény (blízko k řídicí elektronice samotného přijímače). Dále se v závěrečné části mohl také projevit vliv železničního mostu jako fyzické překážky, které mohla způsobovat mírnou změnu v kvalitě signálu.

Z obrázku (Obrázek 31) je patrné, že modul v těchto situacích využíval k navigaci signály ze dvanácti družic v kombinaci systému GPS a systému GLONASS (purpurová barva). Ze tří družic přijímal signál, ale nevyužíval jej k navigaci (žlutá barva) a ze čtyř družic přijímal signál, ale v nedostatečné kvalitě (modrá barva).



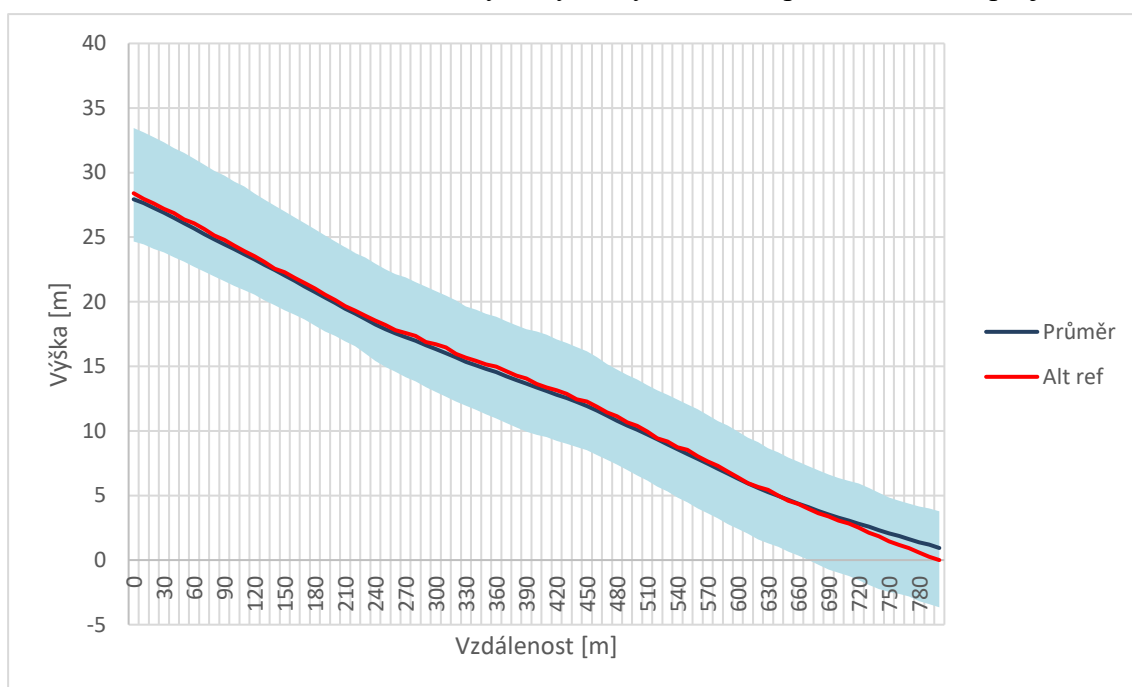
Obrázek 31: Konstelace družic při měření č. 2 - modul Navio2

Po této sadě měření byla provedena již výše zmíněná úprava konfigurace antény. Následující dvě sady měření již proběhly s vhodnější konfigurací antény.

5.7 Modul Navio2 – sada měření č. 3

V rámci této sady měření bylo provedeno celkem devět měřících průjezdů zvolené trajektorie v časovém rozpětí uvedeném v Tabulce 12. Jednalo se jak o průjezdy v sestupném, tak o průjezdy ve vzestupném směru. Zaznamenané hodnoty výšek při jednotlivých průjezdech byly jednotně normalizovány, aby bylo docíleno jejich sestupného charakteru. Pro přehlednost jsou zobrazeny v Grafu 7 v Příloze C, protože slouží pouze jako výchozí hodnoty pro další vyhodnocení.

Z těchto naměřených hodnot byla následně vytvořena analýza, která je vyobrazena v grafu (Obrázek 32). V rámci této analýzy byla vypočítána průměrná hodnota pro každý z bodů naměřené trajektorie a z těchto průměrných hodnot byla vynesena křivka průměrné vertikální trajektorie (v grafu označená jako „Průměr“) zahrnující všech devět měřících průjezdů. Do tohoto grafu byla také umístěna křivka referenční vertikální trajektorie (v grafu označená jako „Alt ref“). Světle modré pole reflektuje rozsah minimálních a maximálních naměřených výškových hodnot při všech devíti průjezdech.



Obrázek 32: Analýza dat modulu Navio2, měření č. 3

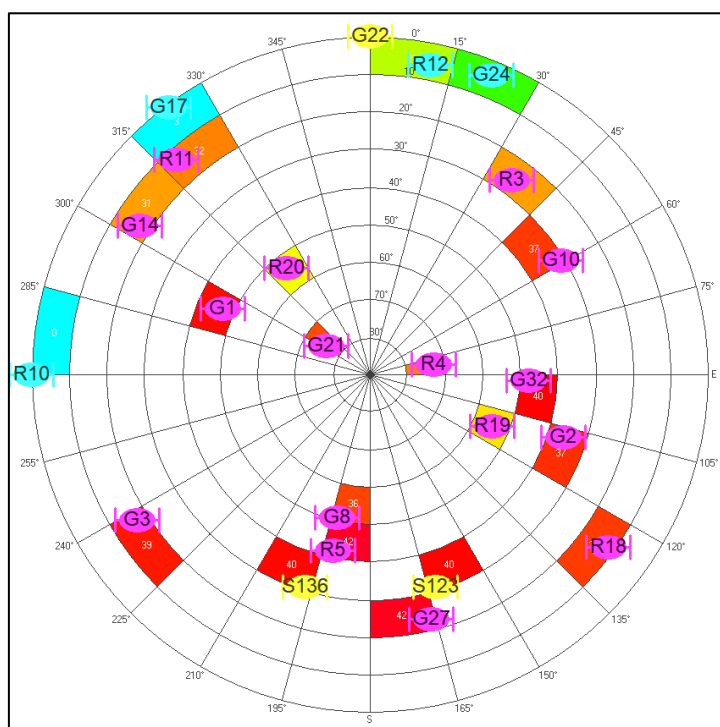
Z naměřených hodnot byly vypočítány statistické veličiny uvedené v tabulce (Tabulka 19). Jedná se o charakteristiky variability, které identifikují, jak moc jsou navzájem jednotlivé naměřené hodnoty odlišné.

Tabulka 19: Charakteristiky variability, modul Navio2, měření č. 3

Průměrná odchylka	1,88 m
Rozptyl	5,12 m ²
Variační rozpětí	8,78 m

Jak vyplývá z grafu (Obrázek 32) průměrné hodnoty všech naměřených vertikálních poloh při tomto měření poměrně dobře kopírují referenční trajektorii. V posledních přibližně sto metrech lze pozorovat odchýlení od referenční trajektorie. Rozsah minimálních a maximálních hodnot je poměrně konzistentní a referenční trajektorii rovnoměrně obklopuje. V závěru klesání má zvětšující tendenci. Charakter průběhu těchto veličin mohl být způsoben převážně postupně se přibližujícím železničním mostem, který mohl opět působit jako určité stínění signálů z družic.

Na následujícím obrázku (Obrázek 33) je zobrazena konstelace družic pro vyhodnocovanou sadu měření. Z obrázku je patrné, že modul v této situaci využíval k navigaci signály z šestnácti družic v kombinaci systému GPS a systému GLONASS (purpurová barva). Z jedné družice přijímal signál, ale nevyužíval jej k navigaci (žlutá barva) a ze čtyř družic přijímal signál, ale v nedostatečné kvalitě (modrá barva).

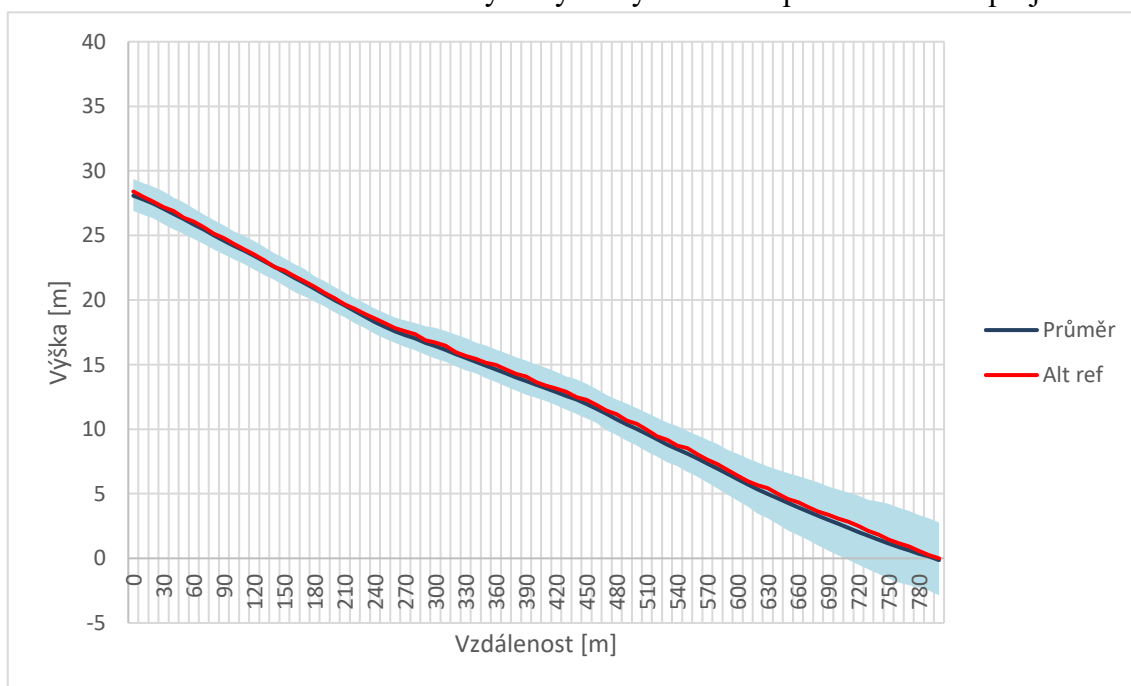


Obrázek 33: Konstelace družic při měření č. 3 - modul Navio2

5.8 Modul Navio2 – sada měření č. 4

V rámci této sady měření bylo provedeno celkem devět měřících průjezdů zvolené trajektorie v časovém rozpětí uvedeném v Tabulce 12. Jednalo se jak o průjezdy v sestupném, tak o průjezdy ve vzestupném směru. Zaznamenané hodnoty výšek při jednotlivých průjezdech byly jednotně normalizovány, aby bylo docíleno jejich sestupného charakteru. Pro přehlednost jsou zobrazeny v Grafu 8 v Příloze C, protože slouží pouze jako výchozí hodnoty pro další vyhodnocení.

Z těchto naměřených hodnot byla následně vytvořena analýza, která je vyobrazena v grafu (Obrázek 34). V rámci této analýzy byla vypočítána průměrná hodnota pro každý z bodů naměřené trajektorie a z těchto průměrných hodnot byla vynesena křivka průměrné vertikální trajektorie (v grafu označená jako „Průměr“) zahrnující všech devět měřících průjezdů. Do tohoto grafu byla také umístěna křivka referenční vertikální trajektorie (v grafu označená jako „Alt ref“). Světle modré pole reflektuje rozsah minimálních a maximálních naměřených výškových hodnot při všech devíti průjezdech.



Obrázek 34: Analýza dat modulu Navio2, měření č. 4

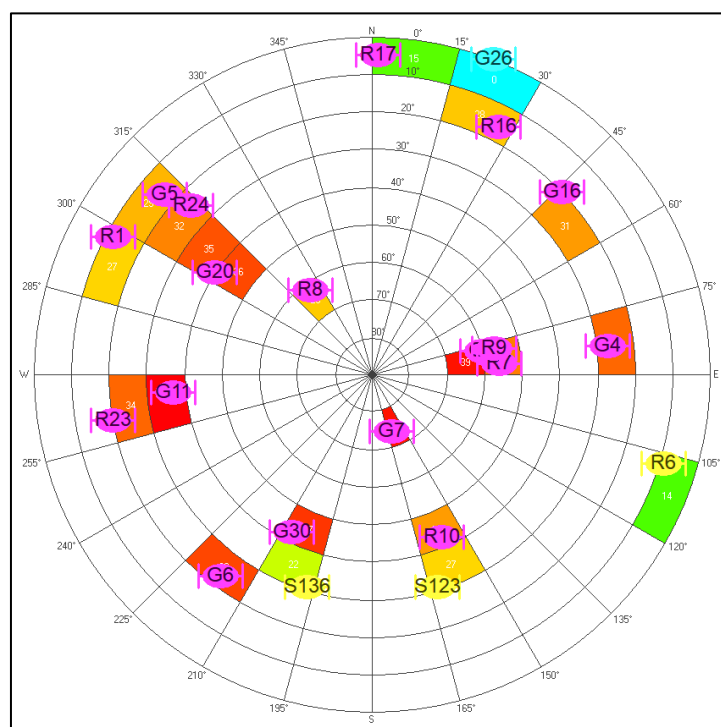
Z naměřených hodnot byly vypočítány statistické veličiny uvedené v tabulce (Tabulka 20). Jedná se o charakteristiky variability, které identifikují, jak moc jsou navzájem jednotlivé naměřené hodnoty odlišné.

Tabulka 20: Charakteristiky variability, modul Navio2, měření č. 4

Průměrná odchylka	0,86 m
Rozptyl	1,06 m ²
Variační rozpětí	5,80 m

Jak vyplývá z grafu (Obrázek 34) průměrné hodnoty všech naměřených vertikálních poloh při tomto měření velice dobře kopírují referenční trajektorii. V posledních přibližně 150 metrech lze pozorovat mírné kolísání okolo referenční trajektorie. Rozsah minimálních a maximálních hodnot je poměrně nízký a konzistentní a referenční trajektorii rovnoměrně obklopuje. V posledních přibližně 200 metrech má zvětšující tendenci. Charakter průběhu těchto veličin mohl být způsoben převážně postupně se přibližujícím železničním mostem, který mohl opět působit jako určité stínění signálů z družic.

Na následujícím obrázku (Obrázek 35) je zobrazena konstelace družic pro vyhodnocovanou sadu měření. Z obrázku je patrné, že modul v této situaci využíval k navigaci signály ze sedmnácti družic v kombinaci systému GPS a systému GLONASS (purpurová barva). Z jedné družice přijímal signál, ale nevyužíval jej k navigaci (žlutá barva) a z jedné družice přijímal signál, ale v nedostatečné kvalitě (modrá barva).



Obrázek 35: Konstelace satelitů při měření č. 4 - modul Navio2

5.9 Závěrečné vyhodnocení měření

U měření s modulem 3DR došlo k projevení zvláštního paradoxu, kdy měření v nočních hodinách vykazuje převážně horší hodnoty rozptylu naměřených hodnot než měření provedené ve dne. Průměrná hodnota naměřených výšek je sice velmi podobná, ale z grafů je patrné, jak se světle modré pole označující rozsah mezi minimem a maximem rozšiřuje.

Pro tento paradox nelze jednoznačně provést žádné spolehlivé vysvětlení. Jednou z možných příčin mohla být krátkodobá horší situace v rozmístění a dostupnosti satelitů sítě GPS, která mohla k těmto výsledkům vést, protože modul 3DR přijímá pouze síť GPS. Modul Navio2, který pracuje s více systémy, by tuto situaci byl schopen pokrýt pomocí ostatních sítí.

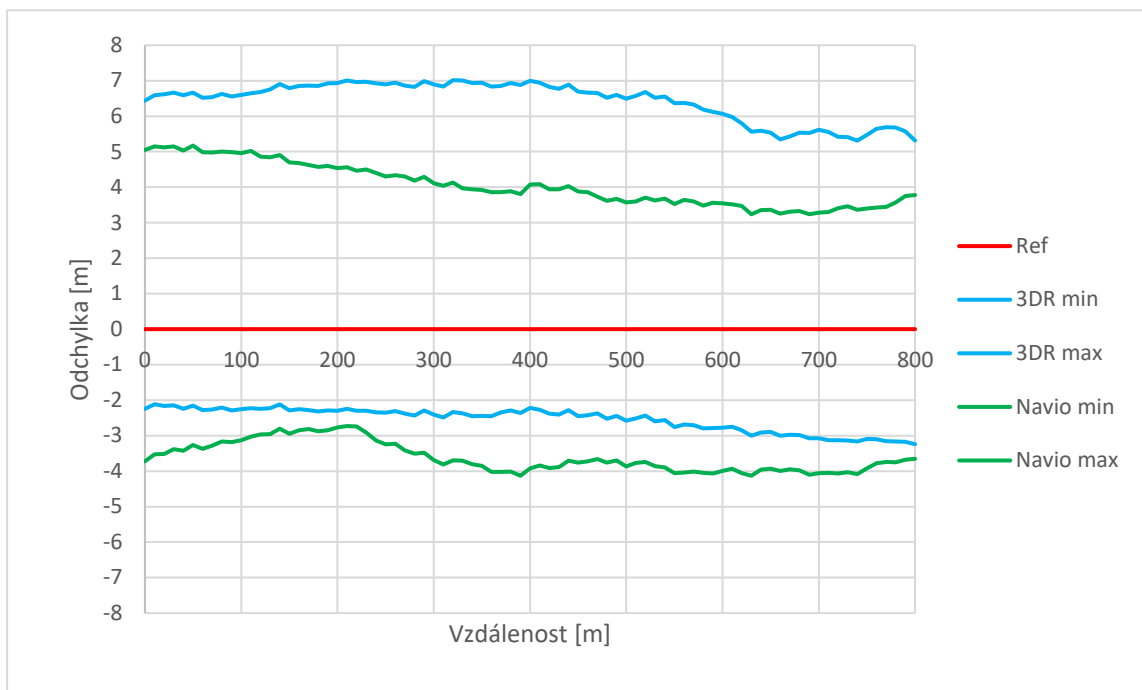
Z grafů je dále patrné, že i modul 3DR částečně trpěl podobnou interferencí s řídicí elektronikou jako modul Navio2, grafy měření provedeného s nevhodnou instalací antén vykazují větší rozptyl než grafy měření provedeného po úpravě instalace elektroniky. Při správné instalaci antén byla největší odchylka naměřené výšky od referenční trajektorie u modulu 3DR 3,24 m ve dne a 7,02 m v noci.

Jak bylo dříve zmíněno v kapitole 4.2, modul Navio2 trpěl během prvních měření silnou interferencí od Raspberry Pi a desky řídicí elektroniky. Projevovalo se to vysokým kolísáním naměřených hodnot kolem průměrné hodnoty, rozdíly byly až $\pm 8,88$ m. Tuto skutečnost lze také pozorovat na grafu /

Po odstranění problému s instalací antény se naopak modul Navio2 začal jevit jako výrazně stabilnější, rozptyl naměřených hodnot se snížil, průměrná hodnota naměřené výšky se s překvapivou přesností blíží referenční výšce.

Při porovnání grafů dat naměřených ve dne a v noci je patrné mírné zhoršení rozptylu naměřených hodnot v denních hodinách pravděpodobně způsobené negativním vlivem stavu ionosféry. Maximální odchylka naměřených hodnot u modulu Navio2 byla 5,17 m ve dne a 3,06 m v noci.

Z měření provedených se správnou instalací antén byl vyhotoven graf závislosti odchylky změřené nadmořské výšky od výšky referenční (Obrázek 36), a to zvláště pro modul 3DR a zvláště pro modul Navio2. Graf znázorňuje minimální a maximální hodnoty všech měření uvedeného modulu relativně k referenční výšce. Z grafu je patrné, že modul Navio2 se od referenční výšky odchyluje méně a rovnoměrněji.



Obrázek 36: Graf závislosti odchylky naměřené nadmořské výšky od výšky referenční

6 ZHODNOCENÍ PŘESNOSTI A VYUŽITELNOSTI

Spolu s RNP, které je podrobněji vysvětleno v kapitole 2.2, úzce souvisí tzv. Actual Navigation Performance (ANP). Tato hodnota udává současnou výkonnost navigačního systému bez započítávání FTE. Hodnota ANP reflektuje přesnost, integritu a může být ovlivněna dostupností navigačního signálu [75]. Tím, že tato hodnota takto reflektuje přesnost měření a je možné na základě ANP vyhodnotit využitelnost navigačního systému jako celku, bylo rozhodnuto, že vypočítaná hodnota ANP z verifikačních měření přijímačů bude sloužit jako jeden z rozhodujících prvků závěrečného vyhodnocení.

Aby bylo možné vyhodnotit přesnost měření a odvodit hodnotu ANP, byly pro jednotlivé průjezdy trajektorií vypočítány hodnoty základní střední chyby měření vyjádřené následujícím vzorcem:

$$\bar{m} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_{i_{ref}})^2}$$

V tomto vzorci představuje x_i změřenou nadmořskou výšku v konkrétním bodě konkrétní trajektorie a $x_{i_{ref}}$ představuje referenční výšku ve stejném bodě trajektorie získanou pomocí analýzy výškopisu popsané v kapitole 4.3.

Základní střední chyba měření vyjadřuje rozsah hodnot, v kterém se měřená veličina pohybuje v 68 % případů. Pro srovnání s RNP, které definuje požadovanou vertikální přesnost jako rozsah poloh, v kterých se letadlo musí vyskytovat v 95 % případů (kapitola 2.2), se použije hodnotu mezní chyby ε_α podle vzorce:

$$|\varepsilon_\alpha| = 2\bar{m}$$

Hodnota ANP je shodná s hodnotou mezní chyby, která při použití výše uvedeného vzorce splňuje právě podmínku 95% pravděpodobnosti. Tabulka 21 uvádí vypočítanou ANP pro jednotlivé průjezdy trajektorií při nevhodné montáži antén.

Tabulka 21: ANP jednotlivých sad měření pro nevhodnou montáž antén

ANP [m]										
Sada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Celkem
Nevhodná montáž antén										
3DR										
DEN	6,26	8,00	6,58	3,44	5,59	3,64	2,01	3,64	3,24	5,05
NOC	9,52	8,22	9,62	9,36	6,83	8,23	7,38	8,62	7,97	8,47
Navio2										
DEN	6,69	3,02	5,78	6,74	6,35	7,86	5,36	21,08	2,02	8,90
NOC	16,03	1,68	1,85	4,00	5,14	12,43	2,78	2,36	5,59	7,49

Tabulka 22 uvádí taktéž vypočítaná ANP pro jednotlivé průjezdy trajektorií a také celková ANP pro jednotlivé GNSS moduly a situace, která následně slouží pro vyhodnocení přesnosti a využitelnosti.

Tabulka 22: ANP jednotlivých sad měření pro vhodnou montáž antén

ANP [m]										
Sada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Celkem
Vhodná montáž antén										
3DR										
DEN	4,64	1,80	5,10	2,35	2,77	0,30	3,98	0,55	2,83	3,13
NOC	3,63	1,74	2,38	5,78	5,02	10,85	6,22	12,91	6,15	7,00
3DR den a noc dohromady										5,42
Navio2										
DEN	3,01	4,93	1,35	3,95	6,99	2,70	1,70	3,44	8,20	4,58
NOC	2,01	1,42	3,24	2,52	1,76	0,52	2,98	1,91	1,44	2,13
Navio2 den a noc dohromady										3,57

Vypočítaná ANP byla srovnána s RNP pro jednotlivá přiblížení na přistání v tabulce (Tabulka 23). Vzhledem k tomu, že hlavním záměrem této diplomové práce mělo být vyhodnocení schopnosti vertikálního vedení po přistávací trajektorii, vyhodnocení proběhlo pouze na základě vertikálních hodnot RNP, a to v kategoriích přiblížení APV-I, APV-II, CAT I, CAT II a CAT III.

Tabulka 23: Porovnání vypočítaného ANP s RNP

Kategorie přiblížení	RNP vertikální	3DR ANP = 5,42 m	Navio2 ANP = 3,57 m
APV-I	20 m	Vyhovuje	Vyhovuje
APV-II	8 m	Vyhovuje	Vyhovuje
CAT I	4 m	Nevyhovuje	Vyhovuje
CAT II	2 m	Nevyhovuje	Nevyhovuje
CAT III	2 m	Nevyhovuje	Nevyhovuje

Z údajů ve výše uvedené tabulce lze usoudit, že pro vertikální vedení po přistávací trajektorii dle kategorií udanými předpisem L-10/I – Radionavigační prostředky, by mohly být využity oba testované přijímače, avšak pouze v kategoriích APV-I a APV-II. Požadavkům „přísnější“ kategorie přesného přiblížení CAT I vyhovuje pouze jeden z modulů, a to modul Navio2. Jak vyplývá z výše uvedené tabulky, pro CAT I je vyžadována vertikální přesnost do 4 m, modul Navio2 požadavkům této kategorie vyhověl s hodnotou ANP = 3,57 m. Vertikálním RNP kategorií přiblížení CAT II a CAT III nevyhověl žádný z modulů.

ZÁVĚR

V rámci diplomové práce bylo provedeno statické a dynamické měření se dvěma vybranými GPS moduly: modulem 3DR s čipem LEA-6H a modulem Navio2 s čipem NEO-M8N. Dynamickým měřením při jízdě automobilem na úseku silnice 56 mezi obcemi Hlučín a Kozmice byla ověřena schopnost vertikálního vedení po dané trajektorii. Analýzou naměřených dat bylo zjištěno, že na přesnost měření má vliv stav ionosféry a umístění antén v těsné blízkosti řídicí elektroniky způsobující interferenci.

Pro oba přijímače bylo provedeno celkem 72 dynamických měření. Nejprve bylo provedeno 36 měření pro první konfiguraci antén, z toho 18 měření ve dne (9 měření modulem 3DR a 9 měření modulem Navio2) a 18 měření v noci (9 měření modulem 3DR a 9 měření modulem Navio2). Z těchto měření byla analýzou zjištěna vyšší nepřesnost u modulu Navio2, která byla v rozporu s očekáváním. Následně bylo upraveno rozmístění antén na montážním přípravku a bylo provedeno dalších 36 měření pro druhou (již vyhovující) konfiguraci antén, z toho 18 měření ve dne (9 měření modulem 3DR a 9 měření modulem Navio2) a 18 měření v noci (9 měření modulem 3DR a 9 měření modulem Navio2).

Z naměřených hodnot byly vytvořeny a popsány grafy, následně bylo provedeno statistické vyhodnocení a byly spočítány hodnoty ANP vyjadřující aktuální navigační přesnost. Celková chyba neboli také aktuální navigační výkon ANP dosahoval u testovaného modulu 3DR hodnoty 5,42 m a u modulu Navio2 hodnoty 3,57 m. Porovnáním těchto hodnot s hodnotami RNP definovanými předpisem bylo možné potvrdit, že při správné montáži a instalaci komponent lze pomocí těchto modulů provést vertikální vedení po přistávací trajektorii v kategorii APV-I a APV-II.

Modul Navio2 vyhověl i požadavkům kategorie CAT I a proto jej lze považovat za přesnější a více využitelnější pro přesné vedení po přistávací trajektorii. Je ale nutné dbát zvýšené pozornosti při montáži komponent – musí být dbáno na to, aby samotná anténa přijímače byla instalována v co největší vzdálenosti od elektroniky, která by mohla způsobovat rušení signálu z důvodu kterého by mohlo dojít k výraznému snížení navigačního výkonu.

Tato problematika by si rozhodně zasloužila další výzkum, v rámci kterého by mohlo být realizovány některé z následujících pokročilejších technik:

- Použít více (dva nebo tři) stejných GNSS modulů jednoho výrobce současně pro jedno měření s cílem eliminovat systematickou nebo nahodilou chybu jednoho konkrétního kusu způsobenou výrobními tolerancemi.
- Optimalizovat umístění GNSS modulu na vozidle. GNSS modul by mohl být na vozidle umístěn na speciálně navržené konzoli tak, aby se zvětšila vzdálenost antény od případných zdrojů rušení z vozidla. V případě použití více modulů by mohl být každý z nich upevněn na jiném místě vozidla, např. na opačných stranách.
- Použít referenční stacionární GNSS modul v režimu RTK a korigovat podle něj informace o poloze snímané v pohyblivých se přijímačích. Současně by se dala velikost korekce vyhodnocovat v reálném čase.
- Použít výkonnější GNSS moduly. Na trhu existují GNSS moduly v cenových hladinách do 2000 USD, které disponují podstatně lepšími parametry jak z

pohledu konstrukce hardwaru, tak z pohledu softwarové výbavy. Uvedená cenová hladina již byla daleko mimo rámec této práce, nicméně v oboru letectví se stále jedná o doplněk z výrazně nízkonákladové kategorie. Tyto přijímače mají konstrukci odolnější proti výkyvům napájecího napětí, teploty, tlaku nebo vlhkosti. Používají součástky v přísnějších tolerancích výrobních parametrů. Používají výkonnější procesory a DSP čipy. Používají pomocné senzory pro zpřesnění odhadu polohy (akcelerometry, gyroskopy, magnetometry, barometry). V ideálních podmínkách dokážou takové GNSS moduly pracovat s horizontální přesností v řádech mm.

Místo pozemního vozidla by se mohlo provést měření v malém letadle naváděném pomocí ILS a porovnat jeho trajektorii s měřením GNSS modulů.

CITAČNÍ ZDROJE

- [1] JIN, Shuanggen, Qisheng WANG a Gino DARDANELLI. A Review on Multi-GNSS for Earth Observation and Emerging Applications. *Remote Sensing*. 2022, 14(16). ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs14163930
- [2] HRDINA, Zdeněk, Petr PÁNEK a František VEJRAŽKA. *Rádiové určování polohy: Družicový systém GPS*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999, 259 s. ISBN 80-01-01386-3.
- [3] TEUNISSEN, Peter J. G. a Oliver MONTENBRUCK. *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Springer International Publishing, 2017. ISBN 978-3-319-42926-7.
- [4] KAPLAN, Elliott D a Christopher J HEGARTY. *Understanding GPS: principles and applications*. 2nd ed. Boston: Artech House, 2006, xvii, 703 s. : il. ISBN 1-58053-894-0.
- [5] HEGARTY, Christopher J. The global positioning system (GPS). *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, 2017, 197-218.
- [6] HUO, Yincheng, et al. A Novel Push-To-Talk Service over Beidou-3 Satellite Navigation System. In: 2019 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). IEEE, 2019. p. 1-6.
- [7] SEO, Jiwon; WALTER, Todd. Future dual-frequency GPS navigation system for intelligent air transportation under strong ionospheric scintillation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15.5: 2224-2236.
- [8] GAGLIONE, Salvatore; VULTAGGIO, Mario. GBAS-Ground Based Augmentation System, an Italian Experience. In: proceedings of European navigation conference (ENC). 2006.
- [9] KRASUSKI, Kamil; ĆWIKLAK, Janusz. Application of GPS sensor for recovery of precise position of aircraft in air transport. In: Proceedings of the 16th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, Jelgava, Latvia. 2017. p. 24-26.
- [10] GRZEGORZEWSKI, M., et al. GNSS for an Aviation. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2008, 2.4.
- [11] ICAO. Report of the Special Communications/Operations Divisional Meeting. 1995, (ICAO Doc. 9650).
- [12] ICAO. Performance Based Operations Manual. Document No. 9613 AN/937: Third Edition. 2008.
- [13] Předpis L10/I - Letecký předpis o civilní letecké telekomunikační službě: Svazek I - Radionavigační Prostředky. In: . Ministerstvo dopravy České Republiky, Úřad pro civilní letectví, 2020. Dostupné také z: https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-10i/data/print/L-10-i_cely.pdf
- [14] NOVÁK, Andrej, Filip ŠKULTÉTY, Branislav KANDERA, Tomasz ŁUSIAK a L. BARTUŠKA. Measuring and Testing Area Navigation Procedures with GNSS. *MATEC Web of Conferences*. 2018, 236. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:10.1051/matecconf/201823601004
- [15] KAYTON, Myron a Walter R. FRIED. *Avionics navigation systems*. 2nd ed. New York: John Wiley, 1997. ISBN 04-715-4795-6.
- [16] RTCA. *Minimum Operational Performance Standards for GPS/GBAS Airborne Equipment*. Washington DC (USA): Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA) Inc., Special Committee No. 159, Document RTCA DO-253C, 2008.
- [17] ORG4033-MK04 - MT3333 GNSS. *TME, Electronic Components* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/org4033-mk04/moduly-gnss-gps/origingps/>
- [18] Micro Spider - DataSheet. *TME, Electronic Components* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/282726efe7885d92003f1ceab2ff0fd0/ORG4033-MK04-DTE.pdf>
- [19] MOD-GPS. *TME, Electronic Components* [online]. <https://www.tme.eu> [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/mod-gps/moduly-gnss-gps/olimex/>

- [20]U-blox UBX-G7020 - DataSheet. *TME, Electronic Components* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/1240b0fe3675e72a2db74d4e6a6e6320/mod-gps.pdf>
- [21]Micro M8N GPS. *Holybro* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://holybro.com/collections/gps-rtk-systems/products/micro-m8n-gps>
- [22]U-blox NEO-M8 (FW2) - Data Sheet. *Ublox* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8_DataSheet_%28UBX-13003366%29.pdf
- [23]Previous Versions GPS Receiver - EM-506 (48 Channel). *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/12751>
- [24]GPS Module EM-506RE. *GlobalSat WorldCom Group* [online]. 2022 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.globalsat.com.tw/ftp/download/EM-506RE%20Hardware%20Data%20Sheet%20V1.7.pdf>
- [25]SparkFun GPS Breakout - Chip Antenna, SAM-M8Q (Qwiic). *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/15210>
- [26]U-blox SAM-M8Q - Data Sheet. *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://cdn.sparkfun.com/assets/4/e/b/9/f/SAM-M8Q_DataSheet__UBX-16012619_.pdf
- [27]Beitian BE-450 GNSS Module with Compass. *Beitian* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://store.beitian.com/products/beitian-designed-with-neo-m9n-flight-control-pixhawk-gps-glonass-module-compass-qmc5883l-be-450-bn-452-450?_pos=1&_sid=3f71578fa&_ss=r&variant=44692318454047
- [28]U-blox M10050-KB - DataSheet. *U-blox* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.u-blox.com/sites/default/files/UBX-M10050-KB_ProductSummary__UBX-20017986.pdf
- [29]EM-506N5. *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/19629>
- [30]MediaTek L1 band GNSS - DataSheet. *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://cdn.sparkfun.com/assets/e/5/e/8/2/Data_Sheet_EM-506N5.pdf
- [31]SparkFun GNSS Receiver Breakout - MAX-M10S (Qwiic). *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/18037>
- [32]U blox MAX-M10S - DataSheet. *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://cdn.sparkfun.com/assets/7/5/9/a/a/MAX-M10S_DataSheet__UBX-20035208.pdf
- [33]SparkFun MicroMod GNSS Function Board - NEO-M9N. *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/18378>
- [34]U-blox NEO-M9N-00B - DataSheet. *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/1/1/0/2/NEO-M9N-00B_DataSheet__UBX-19014285.pdf
- [35]SparkFun GPS Breakout - ZOE-M8Q (Qwiic). *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/15193>
- [36]*U-blox - ZOE-M8 - DataSheet* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://cdn.sparkfun.com/assets/1/c/f/8/a/ZOE-M8_DataSheet__UBX-16008094_.pdf
- [37]SparkFun GPS Breakout - Chip Antenna, SAM-M10Q (Qwiic). *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/21834>
- [38]U-blox SAM-M10Q - DataSheet. *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://cdn.sparkfun.com/assets/1/1/d/f/4/SAM-M10Q_DataSheet__UBX-22013293.pdf
- [39]SparkFun GPS Dead Reckoning Breakout - NEO-M8U (Qwiic). *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/16329>
- [40]U-blox NEO-M8U - DataSheet. *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://cdn.sparkfun.com/assets/6/d/7/c/6/NEO-M8U_DataSheet__UBX-15015679_.pdf

- [41]SparkFun GPS Breakout - NEO-M9N, U.FL (Qwiic). *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/15712>
- [42]U-blox NEO-M9N-00B - DataSheet. *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/1/1/0/2/NEO-M9N-00B_DataSheet_UBX-19014285.pdf
- [43]Matek AP_Periph GNSS, M10-L4-3100 GPS Module. *Unmanned Tech* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://www.unmannedtechshop.co.uk/product/matek-ap_periph-gnss-m10-l4-3100-gps-module/
- [44]U-blox MAX-M10S - DataSheet. *Ublox* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://www.u-blox.com/sites/default/files/MAX-M10S_DataSheet_UBX-20035208.pdf
- [45]SparkFun GPS Breakout - NEO-M9N, SMA (Qwiic). *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/17285>
- [46]GPS Receiver - LS20031 5Hz (66 Channel). *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/8975>
- [47]MediaTek MT3339 - DataSheet. *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/GPS/LS20030~3_datasheet_v1.3.pdf
- [48]3DR uBlox GPS with Compass kit. *Getfpv* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.getfpv.com/3dr-ublox-gps-with-compass-kit.html>
- [49]U-blox LEA-6H. *U-Blox* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/LEA-6_DataSheet_%28UBX-14044797%29.pdf
- [50]MT3339 GPS Module With Antenna Integrated SKM53. *Skylab* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.skylabmodule.com/product/antenna-integrated-gps-module-skm53/>
- [51]SKM53 Datasheet GPS Module. *Skylab* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.skylabmodule.com/wp-content/uploads/2022/03/SKYLAB-SKM53.pdf>
- [52]ORG1510-MK04-USB. *TME, Electronic Components* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/org1510-mk04-usb/moduly-gnss-gps/origingps/>
- [53]Micro Hornet - DataSheet. *TME, Electronic Components* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/a8a05587ff6c931779b2c4277ca735dd/ORG1510-MK04-MK05.pdf>
- [54]SparkFun GNSS Correction Data Receiver - NEO-D9S (Qwiic). *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/19390>
- [55]U-blox NEO-D9S-00B - DataSheet. *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/2/3/5/2/NEO-D9S-00B_DataSheet_UBX-18012996.pdf
- [56]SmartAP GNSS. *Sky - drones* [online]. <https://sky-drones.com> [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://sky-drones.com/navigation/smartap-gnss.html>
- [57]SparkFun LTE GNSS Breakout - SARA-R5. *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/18031>
- [58]U-blox SARA-R5 series - DataSheet. *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: [SparkFun LTE GNSS Breakout - SARA-R5](https://www.sparkfun.com/products/18031)
- [59]Navio2 Autopilot Kit for Raspberry Pi 2 / 3. *RobotShop* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.robotshop.com/products/navio2-autopilot-kit-raspberry-pi-2-3>
- [60]SparkFun GPS-RTK Board. *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/15005>
- [61]U-blox NEO-M8P - DataSheet. *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/15005>

- [62] SparkFun GPS-RTK-SMA Breakout - ZED-F9P (Qwiic). *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/16481>
- [63] U-blox ZED-F9P-02B - DataSheet. *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://cdn.sparkfun.com/assets/f/8/d/6/d/ZED-F9P-02B_DataSheet_UBX-21023276.pdf
- [64] SparkFun MicroMod GNSS Function Board. *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/19663>
- [65] SparkFun GPS-RTK2 Board - ZED-F9P (Qwiic). *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/15136>
- [66] SparkFun GPS-RTK Dead Reckoning Breakout - ZED-F9R (Qwiic). *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/16344>
- [67] SparkFun GPS-RTK Dead Reckoning pHAT for Raspberry Pi. *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/16475>
- [68] U-blox ZED-F9R-01B - DataSheet. *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://cdn.sparkfun.com/assets/d/4/3/f/4/ZED-F9R-01B_Datasheet_UBX-19054459.pdf
- [69] SparkFun GNSS Timing Breakout - ZED-F9T (Qwiic). *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/18774>
- [70] U-blox ZED-F9T-00B - DataSheet. *SparkFun* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://cdn.sparkfun.com/assets/7/a/e/d/3/ZED-F9T-00B_DataSheet_UBX-18053713.pdf
- [71] International standard GNSS real-time data formats and protocols [online]. In: HEO, Yong, Thomas YAN, Samsung LIM a Chris RIZOS. December 2009 [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Chris-Rizos/publication/263937442_International_standard_GNSS_real-time_data_formats_and_protocols/links/02e7e53cd97ee2c0b7000000/International-standard-GNSS-real-time-data-formats-and-protocols.pdf
- [72] NMEA Reference Manual. Sparkfun [online]. Sirf Technology, December 2007 [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/datasheets/GPS/NMEA%20Reference%20Manual-Rev2.1-Dec07.pdf>
- [73] U-center. *U-blox* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.u-blox.com/en/product/u-center>
- [74] *Geoportál ČÚZK* [online]. Praha, 2010 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://geoportal.cuzk.cz>
- [75] PÉREZ SANZ, Luis, Carmen MARTÍNEZ GARCÍA-GASCO, Marta PÉREZ MAROTO, Javier A. PÉREZ-CASTÁN, Lidia SERRANO-MIRA a Víctor Fernando GÓMEZ COMENDADOR. Performance-Based Navigation Approach Procedures with Barometric Vertical Guidance: How to Select the Air Temperature for Approach Procedure Design. *Aerospace*. 2023, 10(4). ISSN 2226-4310. Dostupné z: doi:10.3390/aerospace10040337

CITACE OBRÁZKŮ A TABULEK

- [1] TEUNISSEN, Peter J. G. a Oliver MONTENBRUCK. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer International Publishing, 2017. ISBN 978-3-319-42926-7.
- [2] JIN, Shuanggen, Qisheng WANG a Gino DARDANELLI. A Review on Multi-GNSS for Earth Observation and Emerging Applications. *Remote Sensing*. 2022, 14(16). ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs14163930
- [3] GAGLIONE, Salvatore; VULTAGGIO, Mario. GBAS-Ground Based Augmentation System, an Italian Experience. In: proceedings of European navigation conference (ENC). 2006.
- [4] SABATINI, Roberto, Terry MOORE a Subramanian RAMASAMY. Global navigation satellite systems performance analysis and augmentation strategies in aviation. *Progress in Aerospace Sciences*. 2017, 95, 45-98. ISSN 03760421. Dostupné z: doi:10.1016/j.paerosci.2017.10.002
- [5] Předpis L10/I - Letecký předpis o civilní letecké telekomunikační službě: Svazek I - Radionavigační Prostředky. In: . Ministerstvo dopravy České Republiky, Úřad pro civilní letectví, 2020. Dostupné také z: https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-10i/data/print/L-10-i_cely.pdf
- [6] 3DR. *GetFPV.com* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://cdn.getfpv.com/media/catalog/product/cache/3979b3fd908fbb12b31974edb6316b2e/g/p/gps_top.jpg
- [7] Ublox lea6 max_angle. *GetFPV.com* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://cdn.getfpv.com/media/catalog/product/cache/3979b3fd908fbb12b31974edb6316b2e/u/b/ublox-lea6_mag-angle.jpg
- [8] Navio2 mount. *Emlid* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://docs.emlid.com/navio2/img/hardware-setup/navio2-mount.png>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Základní funkce GNSS.....	13
Obrázek 2: Základní princip měření pseudovzdálenosti [1].....	14
Obrázek 3: Hlavní zdroje chyb GNSS [2].....	15
Obrázek 4: Přehled GBAS [3].....	21
Obrázek 5: Přesnost navigace v letectví [4].....	22
Obrázek 6: Modul 3DR [6],[7].....	32
Obrázek 7: Modul Navio2 [8].....	34
Obrázek 8: Ukázka zpráv protokolu NMEA – screenshot z komunikace s přijímačem Navio2...	35
Obrázek 9: Prostředí programu u-blox u-center – screenshot.....	36
Obrázek 10: Fluktuace indikované výšky v čase, modul 3DR.....	37
Obrázek 11: Fluktuace indikované výšky v čase, modul Navio2.....	38
Obrázek 12: Konstelace při největší odchylce, modul 3DR.....	39
Obrázek 13: Konstelace při nejmenší odchylce, modul 3DR.....	39
Obrázek 14: Konstelace při největší odchylce, modul Navio2.....	40
Obrázek 15: Konstelace při nejmenší odchylce, modul Navio2.....	40
Obrázek 16: Předpokládaná konstelace satelitů v čase t + 150 minut – výstup z programu Orbitron.....	41
Obrázek 17: Vhodný úsek silnice – fotografie z palubní kamery.....	42
Obrázek 18: Montážní přípravek pro uchycení GNSS přijímačů; chybná instalace antén.....	43
Obrázek 19: Montážní přípravek pro uchycení GNSS přijímačů; vhodná instalace antén.....	43
Obrázek 20: Analýza dat modulu 3DR, měření č. 1.....	45
Obrázek 21: Konstelace družic při měření č. 1 - modul 3DR.....	46
Obrázek 22: Analýza dat modulu 3DR, měření č. 2.....	47
Obrázek 23: Konstelace družic při měření č. 2 - modul 3DR.....	48
Obrázek 24: Analýza dat modulu 3DR, měření č. 3.....	49
Obrázek 25: Konstelace družic při měření č. 3 - modul 3DR.....	50
Obrázek 26: Analýza dat modulu 3DR, měření č. 4.....	51
Obrázek 27: Konstelace družic při měření č. 4 - modul 3DR.....	52
Obrázek 28: Analýza dat modulu Navio2, měření č. 1.....	53
Obrázek 29: Konstelace družic při měření č. 1 - modul Navio2.....	54
Obrázek 30: Analýza dat modulu Navio2, měření č. 2.....	55
Obrázek 31: Konstelace družic při měření č. 2 - modul Navio2.....	56
Obrázek 32: Analýza dat modulu Navio2, měření č. 3.....	57
Obrázek 33: Konstelace družic při měření č. 3 - modul Navio2.....	58
Obrázek 34: Analýza dat modulu Navio2, měření č. 4.....	59
Obrázek 35: Konstelace satelitů při měření č. 4 - modul Navio2.....	60
Obrázek 36: Graf závislosti odchylky naměřené nadmořské výšky od výšky referenční.....	62

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Počet multi-GNSS satelitů na oběžné dráze (do roku 2022), zpracováno podle [2] .	15
Tabulka 2: Požadavky na výkonnost GNSS v prostoru [5]	24
Tabulka 3: Srovnávací analýza přijímačů 1.....	26
Tabulka 4: Srovnávací analýza přijímačů 2.....	27
Tabulka 5: Srovnávací analýza přijímačů 3.....	28
Tabulka 6: Srovnávací analýza přijímačů 4.....	29
Tabulka 7: Srovnávací analýza přijímačů 5.....	30
Tabulka 8: Srovnávací analýza přijímačů 6.....	31
Tabulka 9: Parametry modulu 3DR, data převzata z [48]	33
Tabulka 10: Parametry modulu Navio2, data převzata z [59].....	34
Tabulka 11: Odchytky při statickém měření	38
Tabulka 12: Průvodní informace o měření.....	44
Tabulka 13: Charakteristiky variability, modul 3DR, měření č. 1	45
Tabulka 14: Charakteristiky variability, modul 3DR, měření č. 2	47
Tabulka 15: Charakteristiky variability, modul 3DR, měření č. 3	49
Tabulka 16: Charakteristiky variability, modul 3DR, měření č. 4	51
Tabulka 17: Charakteristiky variability, modul Navio2, měření č. 1.....	53
Tabulka 18: Charakteristiky variability, modul Navio2, měření č. 2.....	55
Tabulka 19: Charakteristiky variability, modul Navio2, měření č. 3.....	57
Tabulka 20: Charakteristiky variability, modul Navio2, měření č. 4.....	59
Tabulka 21: ANP jednotlivých sad měření pro nevhodnou montáž antén	63
Tabulka 22: ANP jednotlivých sad měření pro vhodnou montáž antén	64
Tabulka 23: Porovnání vypočítaného ANP s RNP	64

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A: Konstelace satelitů přijímané GNSS přijímači

PŘÍLOHA B: Konstelace satelitů vygenerované programem Orbitron

PŘÍLOHA C: Záznamy měření