



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní
Ústav letecké dopravy

**Metody vyhodnocení kvality GNSS signálu za pomoci
Android aplikací**

Diplomová práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor: Provoz a řízení letecké dopravy

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Pleninger, Ph.D.

Ing. Jakub Steiner

Bc. Simona Blašková

Praha 2023



K621.....Ústav letecké dopravy

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Simona Blašková

Studijní program (obor/specializace) studenta:

navazující magisterský – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Metody vyhodnocení kvality GNSS signálu za pomoci Android aplikací**

Název tématu (anglicky): **Methods for GNSS Signal Quality Assessment Using Android Applications**

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je provést studii proveditelnosti měření kvality GNSS signálu za pomoci low-cost zařízení v podobě mobilního telefonu a existujících android aplikací.
- Rešerše GNSS Signal Quality Monitoring (SQM) parametrů a vhodných Android aplikací a jejich porovnání.
- Popis měřicího zařízení – použitého Android telefonu a aplikace/aplikací.
- Měření dat v různých podmínkách – Clear sky, Urban valley, RFI.
- Vytvoření SW/scriptu pro zpracování naměřených dat.
- Vyhodnocení naměřených dat.



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Quality assessment of GNSS observations from an Android N smartphone...
doi: 10.1007/s10291-018-0736-8
GNSS Signal Quality Monitoring
doi: 10.1002/9781119458449.ch10.
Raw GNSS observations from Android smartphones...
doi: 10.1088/1361-6501/abe56e

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jakub Steiner**
Ing. Stanislav Pleninger, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: **15. července 2022**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajících ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **30. listopadu 2023**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
vedoucí
Ústavu letecké dopravy



prof. Ing. Ondřej Příbyl, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Simona Blašková
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 16. května 2023



Abstrakt

Táto diplomová práca sa zaoberá problematikou využitia low-cost zariadení v podobe smartfónov pre účely monitorovania kvality GNSS signálu (SQM). Teoretická časť práce je venovaná úvodu do systémov GNSS a monitorovania kvality GNSS signálu, spolu s najvyužívanejšími SQM parametrami a analýzou trhu dostupných profesionálnych nástrojov určených pre tieto účely. Následne sú bližšie opísané surové GNSS dáta z Android smartfónov a Android aplikácie umožňujúce analýzu a nahrávanie surových GNSS dát. Náplňou praktickej časti je vykonanie štúdie uskutočniteľnosti využitia smartfónov pre účely GNSS SQM. S týmto zámerom sú navrhnuté tri scenáre nahrávania surových GNSS dát v prostrediach s rôznou očakávanou kvalitou GNSS signálu. Namerané dáta sú vyhodnotené z hľadiska výstupných SQM parametrov pomocou vytvoreného Matlab skriptu a výsledky z jednotlivých scenárov sú následne vzájomne porovnané. Súčasťou je taktiež porovnanie výstupov smartfónu s výstupmi z profesionálneho zariadenia slúžiacemu k monitorovaniu kvality GNSS signálu. Na základe dosiahnutých výsledkov sú v závere práce diskutované prínosy tohto typu merania kvality GNSS signálu, limitácie a ďalší rozvoj.

Kľúčové slová: GNSS, globálny navigačný družicový systém, SQM, monitorovanie kvality signálu, low-cost zariadenia, smartfóny, surové GNSS dáta



Abstract

This master's thesis deals with the topic of the use of low-cost devices in the form of smartphones for GNSS signal quality monitoring (SQM). The theoretical part of the thesis provides an introduction to GNSS systems and GNSS signal quality monitoring, including a list of the most used SQM parameters and available professional devices used for this purpose. Subsequently, raw GNSS measurements from Android smartphones and Android applications for raw GNSS measurements analysis and data logging are described in more detail. The objective of the practical part is to conduct a feasibility study of using smartphones for GNSS SQM purposes. With this intention, three data logging scenarios in environments with different expected GNSS signal quality are proposed. Recorded data are evaluated in terms of the output SQM parameters using a developed Matlab script and the results from the individual scenarios are then compared. A comparison of the smartphone's outputs with outputs from a professional SQM device is also included. Based on the obtained results, benefits of this type of SQM measurement, limitations and future development are discussed.

Keywords: GNSS, Global Navigation Satellite System, SQM, Signal Quality Monitoring, low-cost devices, smartphones, raw GNSS measurements



PodĎakovanie

Rada by som sa poĎakovala pánovi Ing. Stanislavovi Pleningerovi, Ph.D. za odborné vedenie práce a pánovi Ing. Jakobovi Steinerovi za jeho ochotu, čas a všetky cenné rady. Veľká vĎaka patrí GNSS Centre of Excellence, v ktorom som mohla prostredníctvom stáže získať nespočetné množstvo znalostí nielen v oblasti GNSS a vĎaka ktorému mi bolo vôbec umožnené spracovať praktickú časť tejto práce. Moja vĎaka ďalej patrí pánovi Bc. Janovi Slezáčkovi za poskytnutie GNSS simulátoru a spoluprácu pri meraní. V neposlednom rade Ďakujem svojej rodine a priateľovi za podporu počas celého štúdia.



Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som predloženú prácu vypracovala samostatne, a že som uviedla všetky informačné zdroje v súlade s Metodickým pokynom o etickej príprave vysokoškolských záverečných prác.

Nemám závažný dôvod proti užitiu tohto školského diela v zmysle §60 Zákona č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon).

V Prahe dňa 27. novembra 2023

.....



Obsah

Úvod	17
1. Globálne navigačné družicové systémy	18
1.1. GNSS signál	19
1.1.1. Kódové meranie	20
1.1.2. Fázové meranie	21
1.2. GNSS rušenie.....	21
1.3. Monitorovanie kvality GNSS signálu	23
1.3.1. SQM parametre.....	24
1.4. Zariadenia a nástroje pre monitorovanie kvality GNSS signálu.....	28
1.4.1. COLOSSUS.....	28
1.4.2. GP-Probe.....	29
1.4.3. G-NUT/Anubis software.....	30
1.4.4. MuSNAT	30
1.4.5. GIASONE	30
1.4.6. NAVBLUE GNSS Monitoring	31
2. Surové GNSS dáta z Android smartfónov.....	32
2.1. Hardware smartfónov a príjem GNSS signálu	32
2.2. GNSS dátové formáty	34
2.2.1. RINEX	35
2.2.2. NMEA.....	36
2.2.3. RTCM.....	36
2.2.4. GNSS Logger formát.....	37
2.3. Parametre z Android API.....	37
2.4. Android aplikácie	39
2.4.1. Porovnanie aplikácií	41
3. Metodika.....	43
3.1. Popis meracieho zariadenia	43
3.2. Použitá Android aplikácia	43
3.3. Nahrávanie dát	43
3.3.1. Príprava.....	45
3.3.2. Scenár 1.....	45



3.3.3. Scenár 2	46
3.3.4. Scenár 3	47
3.4. Proces vyhodnotenia dát	51
4. Výsledky	57
4.1. Scenár 1	57
4.1.1. Nízka predpokladaná hodnota DOP	57
4.1.2. Vysoká predpokladaná hodnota DOP	63
4.1.3. Porovnanie smartfónu s profesionálnym zariadením	69
4.2. Scenár 2	70
4.2.1. Nízka predpokladaná hodnota DOP	71
4.2.2. Vysoká predpokladaná hodnota DOP	74
4.3. Scenár 3	77
4.3.1. Jamming	77
4.3.2. Spoofing	80
5. Porovnanie výsledkov a diskusia	90
5.1. Vplyv typu prostredia na SQM parametre	90
5.2. Vplyv GNSS RFI na SQM parametre	92
5.3. Výhody a limitácie využitia smartfónov pre meranie kvality GNSS signálu	94
6. Prínos a ďalší rozvoj	96
Záver	98
Zoznam použitej literatúry	100
Príloha 1 – Matlab skript pre vyhodnotenie surových GNSS dát zo smartfónu na priloženom CD	105



Zoznam obrázkov

Obrázok 1: GNSS frekvencie [3]	19
Obrázok 2: Stanovenie doby šírenia signálu pomocou PRN kódov [4]	20
Obrázok 3: HPL a VPL [15].....	25
Obrázok 4: DOP [16]	26
Obrázok 5: Rozdiel medzi chovaním relatívnej (vľavo) a absolútnej (vpravo) uvedenej hodnoty AGC [19].....	27
Obrázok 6: Zariadenie COLOSSUS [21].....	29
Obrázok 7: Užívateľské rozhranie COLOSSUS [21]	29
Obrázok 8: Užívateľské rozhranie GP-Probe [22].....	30
Obrázok 9: Schéma princípu fungovania A-GNSS, aplikované na GPS [33].....	34
Obrázok 10: RINEX súbor s dátami zo smartfónu	35
Obrázok 11: NMEA súbor s dátami zo smartfónu.....	36
Obrázok 12: GNSS Logger súbor s dátami zo smartfónu	37
Obrázok 13: Aplikácia GNSS Logger.....	39
Obrázok 14: Trimble GNSS Planning [46].....	45
Obrázok 15: Nahrávanie dát pre Sc1.....	46
Obrázok 16: Realizácia Sc2.....	47
Obrázok 17: PSD (vľavo) a waterfall diagram (vpravo) rušičky TG5CA, zdroj: GCE.....	48
Obrázok 18: SDR HackRF One + Portapack [51].....	49
Obrázok 19: Tabuľka z NMEA súboru	52
Obrázok 20: Tabuľka raw, obsahujúce surové GNSS dáta	53



Obrázok 21: Tabuľka fix, obsahujúca údaje o vypočítanej polohe	53
Obrázok 22: Názorná ukážka grafu skyplot.....	56
Obrázok 23: Priemerné hodnoty C/No pre Sc1_L v čase.....	58
Obrázok 24: Priemerné hodnoty C/No jednotlivých družíc pre Sc1_L.....	59
Obrázok 25: NSV pre Sc1_L v čase	60
Obrázok 26: DOP pre Sc1_L v čase.....	60
Obrázok 27: Vykreslenie vypočítanej a referenčnej polohy pre Sc1_L	61
Obrázok 28: Priemerné hodnoty C/No v čase pre Sc1_L pre zariadenie COLOSSUS	62
Obrázok 29: NSV v čase pre Sc1_L pre zariadenie COLOSSUS.....	63
Obrázok 30: Priemerné hodnoty C/No pre Sc1_H v čase	64
Obrázok 31: Priemerné hodnoty C/No jednotlivých družíc pre Sc1_H.....	65
Obrázok 32: NSV pre Sc1_H v čase.....	66
Obrázok 33: DOP pre Sc1_H v čase	66
Obrázok 34: Vypočítaná poloha z nameraných surových dát pre Sc1_H.....	67
Obrázok 35: Priemerné hodnoty C/No v čase pre Sc1_H pre zariadenie COLOSSUS.....	68
Obrázok 36: NSV v čase pre Sc1_H pre zariadenie COLOSSUS	69
Obrázok 37: Priemerné hodnoty C/No pre Sc2_L v čase.....	71
Obrázok 38: Priemerné hodnoty C/No jednotlivých družíc pre Sc2_L.....	72
Obrázok 39: NSV pre Sc2_L v čase	73
Obrázok 40: DOP pre Sc2_L v čase.....	73
Obrázok 41: Priemerné hodnoty C/No pre Sc2_H v čase	74
Obrázok 42: Priemerné hodnoty C/No jednotlivých družíc pre Sc2_H.....	75



Obrázok 43: NSV pre Sc2_H v čase.....	76
Obrázok 44: DOP pre Sc2_H v čase.....	76
Obrázok 45: Priemerné hodnoty C/No pre Sc3_J v čase.....	77
Obrázok 46: NSV pre Sc3_J v čase	79
Obrázok 47: DOP pre Sc3_J v čase.....	79
Obrázok 48: AGC pre Sc3_J v čase.....	80
Obrázok 49: Časové diskontinuity v rámci Sc3_S pre Anténu 1.....	81
Obrázok 50: Priemerné hodnoty C/No pre Sc3_S v čase (Anténa 1).....	82
Obrázok 51: NSV pre Sc3_S v čase (Anténa 1).....	83
Obrázok 52: DOP v čase pre Sc3_S (Anténa 1).....	83
Obrázok 53: AGC v čase pre Sc3_S (Anténa 1).....	84
Obrázok 54: Vypočítaná poloha z nameraných surových dát pre Sc3_S (Anténa 1).....	85
Obrázok 55: Časové diskontinuity (Anténa 2).....	85
Obrázok 56: Priemerné hodnoty C/No pre Sc3_S v čase (Anténa 2).....	86
Obrázok 57: NSV v čase pre Sc3_S (Anténa 2).....	87
Obrázok 58: DOP v čase pre Sc3_S (Anténa 2).....	88
Obrázok 59: AGC v čase pre Sc3_S (Anténa 2).....	88
Obrázok 60: Vypočítaná poloha z nameraných surových dát pre Sc3_S (Anténa 2).....	89
Obrázok 61: Kategorizácia typu GNSS rušenia [53].....	94



Zoznam tabuliek

Tabuľka 1: Parametre GNSS tried v Android API [37]	38
Tabuľka 2: Porovnanie Android aplikácií.....	42
Tabuľka 3: Navrhnuté scenáre pre nahrávanie dát.....	44
Tabuľka 4: Doba nahrávania dát spolu s predpovedanými hodnotami parametrov pre Sc1 .	46
Tabuľka 5: Doba nahrávania dát a predpokladané hodnoty parametrov pre Sc2	47
Tabuľka 6: Doba nahrávania dát pre Sc3	47
Tabuľka 7: Priebeh scenára Sc3_J.....	49
Tabuľka 8: Priebeh Sc3_S	50
Tabuľka 9: Priemerné hodnoty C/No pre jednotlivé GNSS konštelácie pre Sc1_L, uvedené v dB-Hz	58
Tabuľka 10: Odchýlky polohy pre Sc1_L	61
Tabuľka 11: Priemerné hodnoty C/No pre jednotlivé GNSS konštelácie pre Sc1_L pre zariadenie COLOSSUS, uvedené v dB-Hz	62
Tabuľka 12: Priemerné hodnoty C/No pre jednotlivé GNSS konštelácie pre Sc1_H, uvedené v dB-Hz	64
Tabuľka 13: Odchýlky polohy pre Sc1_H.....	67
Tabuľka 14: Priemerné hodnoty C/No pre jednotlivé GNSS konštelácie pre Sc1_H pre zariadenie COLOSSUS, uvedené v dB-Hz	68
Tabuľka 15: Porovnanie priemerných dosiahnutých hodnôt SQM parametrov low-cost a profesionálneho zariadenia pre Sc1_L	69
Tabuľka 16: Porovnanie priemerných dosiahnutých hodnôt SQM parametrov low-cost a profesionálneho zariadenia pre Sc1_H.....	70
Tabuľka 17: Priemerné hodnoty C/No pre jednotlivé GNSS konštelácie pre Sc2_L, uvedené v dB-Hz.....	71



Tabuľka 18: Priemerné hodnoty C/No pre jednotlivé GNSS konštelácie pre Sc2_H, uvedené v dB-Hz.....	74
Tabuľka 19: Priemerné hodnoty C/No pre jednotlivé GNSS systémy pre Sc3_J, uvedené v dB-Hz.....	78
Tabuľka 20: Priemerné hodnoty C/No pre jednotlivé GNSS systémy, uvedené v dB-Hz (Anténa 1).....	82
Tabuľka 21: Priemerné hodnoty C/No pre jednotlivé GNSS systémy, uvedené v dB-Hz (Anténa 2).....	86
Tabuľka 22: Porovnanie priemerných hodnôt SQM parametrov Sc1 a Sc2 zo smartfónu a zariadenia COLOSSUS	90
Tabuľka 23: Porovnanie vypočítaných odchýlok polohy v rámci Sc1	91
Tabuľka 24: Porovnanie jednotlivých prípadov Sc3 v dobe bez rušenia (RFI OFF) a s rušením (RFI ON).....	92



Zoznam skratiek

ABAS	Aircraft-Based Augmentation System
ADC	Analog-to-Digital Converter
AGC	Automatic Gain Control
A-GNSS	Assisted GNSS
ANSP	Air Navigation Service Provider
API	Application Programming Interface
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASRS	Aviation Safety Reporting System
C/No	Carrier to Noise ratio
CDDIS	Crustal Dynamics Data Information System
CDMA	Code Division Multiple Access
CEST	Central European Summer Time
CMC	Code Minus Carrier
CNES	Centre national d'études spatiales
DGPS	Differential GPS
DOP	Dilution of Precision
ECEF	Earth-Centric, Earth-Based
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
ENU	East, North, Up
ESA	European Space Agency
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GAGAN	GPS Aided Geo Augmented Navigation
GBAS	Ground-Based Augmentation System
GCE	GNSS Centre of Excellence
GDOP	Geometric DOP
GIASONE	GNSS Integrity and Authentication Services user-Oriented Network
GISMO	GNSS Integrity and Signal Monitoring Observatory
GLONASS	Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja systema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HDOP	Horizontal DOP
HPE	Horizontal Position Error
HPL	Horizontal Protection Level



ICAO	International Civil Aviation Organization
ILS	Instrument Landing System
IMU	Inertial Measurement Unit
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System
IRS	Inertial Reference System
LLA	Latitude, Longitude, Altitude
MEO	Medium Earth Orbit
MuSNAT	Multi Sensor Navigation Analysis Tool
NAGU	Notice Advisory to Galileo Users
NANU	Notice Advisory to Navstar Users
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NAVISP	Navigation Innovation and Support Program
NMEA	National Marine Electronics Association Format
NOTAM	Notice to Airmen
NSV	Number of Satellite Vehicles
OSNMA	Open Service Navigation Message Authentication
PA	Precision Approach
PDOP	Position DOP
PPP	Precise Point Positioning
PRN	Pseudorandom Noise
PSD	Power Spectral Density
PVT	Position, Velocity, Time
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
RAIM	Receiver autonomous integrity monitoring
RFI	Radio Frequency Interference
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RMSE	Root Mean Square Error
RTCM	Radio Technical Commission for Marine Services
RTK	Real Time Kinematics
SBAS	Satellite-Based Augmentation System
SDR	Software Defined Radio
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SQM	Signal Quality Monitoring
TDOP	Time DOP
UTC	Universal Time Coordinated



VDOP	Vertical DOP
VOR	VHF Omnidirectional Radio Range
VPE	Vertical Position Error
VPL	Vertical Protection Level
VUZ	Výzkumný Ústav Železniční
WAAS	Wide Area Augmentation System
WLS	Weighted Least Squares



Úvod

Globálne navigačné družicové systémy (GNSS) sú v dnešnej dobe neoddeliteľnou súčasťou každodenného života. Ich široké spektrum využitia siaha od aplikácií v kritickej infraštruktúre pre účely časovej synchronizácie a presného určenia polohy podľa stanovených požiadaviek, až po rýchle určenie polohy pre osobné potreby bežných užívateľov. V leteckej sfére sú tieto systémy využívané predovšetkým ako primárny zdroj polohovej informácie v navigačných systémoch lietadiel a v prehľadových systémoch stredísk riadenia letovej prevádzky pre presnú časovú synchronizáciu. Pre zabezpečenie bezproblémovej prevádzky systémov závislých na GNSS však s narastajúcim počtom hrozieb súvisiacich so zámerným GNSS rušením vzniká potreba zavedenia prostriedkov pre monitorovanie kvality GNSS signálu.

Táto diplomová práca skúma potenciálne možnosti využitia low-cost zariadení v podobe smartfónov pre účely monitorovania kvality GNSS signálu. Vývojári operačného systému Android umožnili prístup k surovým GNSS dátam v smartfónoch v máji roku 2016, čím sa otvoril priestor pre výskum nových a inovatívnych využití týchto zariadení. Medzi ich hlavné výhody patrí predovšetkým cenová dostupnosť a prenášateľnosť. Fakt, že tieto zariadenia v súčasnej dobe vlastní takmer každý im dodáva veľký crowdsourcingový potenciál, na základe čoho sú užívatelia schopní veľmi jednoducho prispievať k riešeniu komplexných problémov vyžadujúcich väčší počet zdrojov informácií.

Hlavným cieľom tejto diplomovej práce je vykonanie štúdie uskutočniteľnosti využitia smartfónov k meraniu kvality GNSS signálu. S týmto zámerom boli pre nahrávanie surových GNSS dát navrhnuté celkom tri scenáre v prostrediach s rôznou očakávanou kvalitou GNSS signálu, pričom v rámci posledného scenára je otestovaný vplyv dvoch rôznych typov GNSS rušenia. Namerané dáta sú následne vyhodnotené z hľadiska Signal Quality Monitoring (SQM) parametrov za pomoci Matlab skriptu, naprogramovaného špeciálne pre účely tejto práce. Výstupy zo smartfónu sú porovnané na úrovni jednotlivých scenárov meraní, rovnako ako sú porovnané aj s výstupmi z profesionálneho zariadenia pre analyzovanie kvality GNSS signálu. Získané výsledky slúžia pre vyvodenie záverov týkajúcich sa praktického využitia smartfónov pre SQM účely, rovnako ako aj pre ďalší rozvoj tejto problematiky.



1. Globálne navigačné družicové systémy

Pojem GNSS je súhrnný názov pre jednotlivé satelitné konštelácie, ktorých signály sú využívané GNSS prijímačmi na zemi pre určovanie geografickej polohy, rýchlosti a času (PVT, Position, Velocity, Time). V súčasnosti sa medzi globálne navigačné družicové systémy radí americký GPS (Global Positioning System), ruský GLONASS (Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistema), európsky Galileo a čínsky BeiDou. Okrem globálnych konštelácií existujú navyše regionálne systémy, ako napríklad japonský QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) alebo indický IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System).

Každý z týchto systémov sa skladá z troch systémových segmentov:

- Vesmírny segment – pozostávajúci z aktívnych a záložných satelitov,
- Riadiaci segment – tvorený pozemnými stanicami pre kontrolu činnosti systému a vysielanie informácií do satelitov,
- Užívateľský segment – reprezentovaný užívateľmi vybavenými GNSS prijímačmi a softwarom pre spracovanie GNSS signálu.

V súčasnom svete existuje obrovské množstvo aplikácií, ktorých neoddeliteľnou súčasťou je určovanie presnej polohy a času a navigácia pomocou GNSS. Do týchto aplikácií spadá aj niekoľko kľúčových prvkov kritickej infraštruktúry, akými sú napríklad finančný trh, energetika, poľnohospodárstvo a rôzne módy dopravy. V leteckej doprave umožňuje využitie GNSS systémov pre navigáciu lietadiel flexibilné a efektívne využitie kapacity vzdušného priestoru, rovnako ako aj navigáciu v odľahlých oblastiach alebo možnosť využitia optimálnych letových ciest pre zníženie spotreby paliva. Mimo iné tieto systémy denne využívajú aj obyčajní ľudia vo svojich osobných vozidlách a mobilných zariadeniach. Z takto širokej škály využítí plynú na GNSS systémy vysoké požiadavky na správnu funkčnosť. Výkonnosť GNSS systémov sa obvykle posudzuje z pohľadu štyroch výkonnostných parametrov: presnosti, dostupnosti, integrity a kontinuity [1].

Niektoré GNSS aplikácie, napríklad presné prístrojové priblíženie lietadiel k letisku alebo aplikácie v geodézii, vyžadujú omnoho väčšiu presnosť než tú, ktorú poskytuje samotný GNSS systém. Pre docielenie takto vysokej presnosti boli vyvinuté tzv. augmentačné systémy, ktoré dodatočne zlepšujú výkonnostné parametre GNSS.

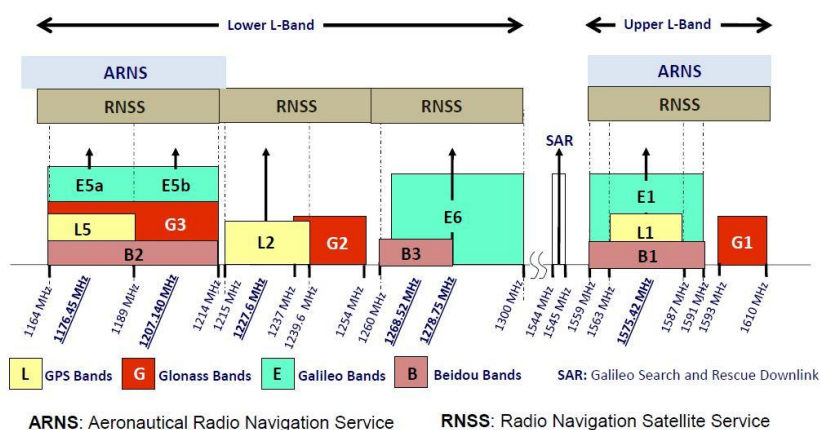
Satelitné augmentačné systémy (SBAS, Satellite Based Augmentation System) sú typom diferenciálneho GNSS systému, ktorý pokrýva rozsiahle územie. Tento systém využíva

niekoľko geostacionárnych satelitov pre vysielanie primárnych GNSS dát spolu s korekčnými dátami zo siete pozemných monitorovacích staníc. Korekčné dáta sú do satelitov vysielané zo siete pozemných monitorovacích staníc a zahŕňajú korekcie opravujúce efemeridy satelitov, ionosférické korekcie a kompenzáciu chyby hodín satelitov. V rôznych častiach sveta sa môžeme stretnúť s rôznym pomenovaním tohto typu systému – v Európe EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), v severnej Amerike WAAS (Wide Area Augmentation System) alebo v Indii GAGAN (GPS Aided Geo Augmented Navigation) [2].

V leteckej doprave sa okrem SBAS môžeme navyše stretnúť s palubným augmentačným systémom (ABAS, Aircraft Based Augmentation System) a pozemným augmentačným systémom (GBAS, Ground Based Augmentation System). Pomocou ABAS je možné monitorovať integritu GNSS priamo na palube lietadla za letu. GBAS je tvorený sieťou pozemných staníc, ktoré vysielajú korekčné dáta priamo do lietadla. Tento systém je v súčasnosti implementovaný na rôznych svetových letiskách a využíva sa prevažne vo fázach priblíženia a pristátia. Pomocou korekčných dát z tohto systému je možné dosiahnutie polohovej chyby do 1 metra, čím je systém bezpečne využiteľný aj pre PA CAT III [1].

1.1. GNSS signál

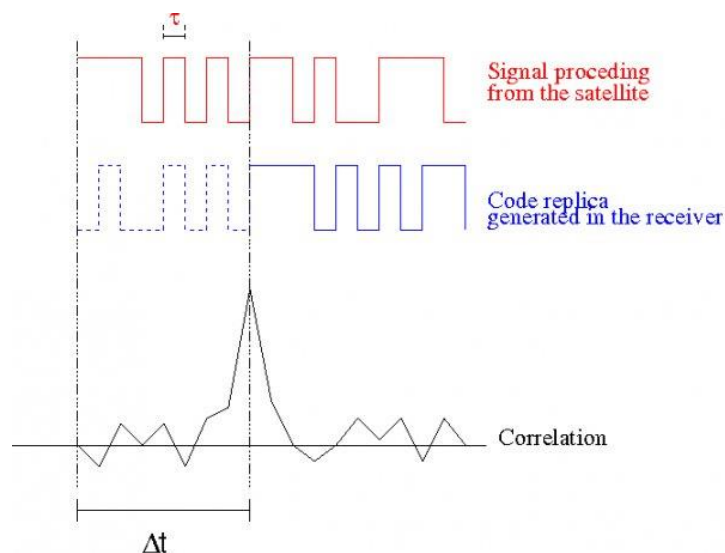
Satelity rôznych GNSS konštelácií obiehajú Zem na strednej obežnej dráhe Zeme (MEO, Medium Earth Orbit), čo je ekvivalentné výškam približne 20 000 km nad zemským povrchom. Na Obrázku 1 sú zobrazené frekvenčné pásma štyroch globálnych GNSS systémov. Pre potreby tejto práce sú najdôležitejšie pásma L1 a L5 pre GPS, E1 a E5a pre Galileo, G1 pre GLONASS a B1 pre BeiDou.



Obrázok 1: GNSS frekvencie [3]

1.1.1. Kódové meranie

GNSS satelity kontinuálne vysielajú navigačné signály na dvoch alebo viacerých frekvenciách v L pásme (1 – 2 GHz). Každý satelit vysiela signály namodulované pseudonáhodným kódom (PRN, Pseudorandom Noise) a navigačnou správou spolu s časovou značkou. PRN kód je pseudonáhodná postupnosť núl a jednotiek, pomocou ktorej možno jednoznačne identifikovať satelit. Zároveň ho GNSS prijímač využíva pre určenie transmisnej doby signálu. Časová informácia pochádza z presných atómových hodín, ktoré sú súčasťou každého satelitu. GNSS prijímač však pre určenie času používa svoje vlastné hodiny. Z dôvodu nepresnej časovej synchronizácie hodín GNSS prijímača musí mať prijímač pre určenie polohy signál z minimálne štyroch satelitov. Prijímač generuje pre každý satelit vlastnú repliku PRN kódu, ktorú kontinuálne porovnáva s prijatým PRN kódom zo satelitu, dokým nie je pomocou auto-korelačnej funkcie nájdená zhoda (Obrázok 2). Následne určí rozdiel medzi vyslaním a prijatím signálu (dobu šírenia signálu Δt), ktorý je použitý pre výpočet pseudovzdialenosti. Do tohto výpočtu vstupujú taktiež dáta z navigačnej správy, ktorá obsahuje efemeridy družíc, almanach s informáciami o ostatných satelitoch v danej konštelácii, informácie o presnom čase, prevádzkovom stave satelitu a ďalšie doplňujúce informácie. Pojem pseudovzdialenosť neoznačuje skutočnú geometrickú vzdialenosť, pretože jej výpočet je ovplyvnený ďalšími javmi. Do jej výpočtu sa dodatočne zahŕňajú systematické chyby, medzi ktoré patrí chyba hodín družíc, chyba hodín prijímača, efemeridická chyba a chyby spôsobené prechodom signálu ionosférou a troposférou [2].



Obrázok 2: Stanovenie doby šírenia signálu pomocou PRN kódov [4]



Tento princíp fungovania, kedy satelity vysielajú svoje signály na rovnakej frekvencii, ale s rozdielnymi kódmi, sa nazýva kódový multiplex (CDMA, Code Division Multiple Access). Systém GLONASS využíva princíp frekvenčného multiplexu (FDMA, Frequency Division Multiple Access), kedy každá družica vysielala signál na vlastnej frekvencii, namodulovaný rovnakým kódom [5].

1.1.2. Fázové meranie

Okrem kódov sa pre získanie pseudovzdialenosti využívajú fázové merania nosnej vlny. Tento spôsob spočíva v určení vzdialenosti medzi satelitom a prijímačom pomocou zistenia fázového rozdielu medzi nosnou vlnou zo satelitu a jej replikou generovanou v prijímači. Tieto merania sú však neisté o neznámy celočíselný počet vlnových dĺžok N (angl. ambiguity = nejednoznačnosť), ktoré si prijímač vždy na začiatku musí určiť. Získanie počiatočnej ambiguity je z výpočtového a časového hľadiska náročný proces. Pri každej strate signálu dochádza k fázovému skoku (angl. cycle slip) a prijímač je nútený celý výpočet N začať odznova. Táto metóda určenia pseudovzdialenosti je v porovnaní s kódovým meraním omnoho komplikovanejšia, avšak jej presnosť je o niekoľko rádov vyššia. Je možné s ňou dosiahnuť presnosť iba niekoľkých milimetrov a jej využitie je typické prevažne v oblasti geodézie [2].

1.2. GNSS rušenie

Intenzita GNSS signálu pri zemskom povrchu je typicky približne len -165 až -150 dBW [6], preto je tento signál veľmi náchylný na akékoľvek zdroje rušenia. Práve z dôvodu prudkého nárastu využitia GNSS signálu v rôznych dôležitých sektoroch infraštruktúry predstavuje akýkoľvek druh GNSS rušenia (RFI, Radio Frequency Interference) hrozbu, vedúcu k nesprávnej polohovej a časovej informácii alebo ich úplnej nedostupnosti. Rušiaci zariadenia sú navyše voľne dostupné na internete, čím sa útoky na GNSS signál stávajú ľahko realizovateľné. Už jednoduché rušiaci zariadenia s nižším dosahom si môže zakúpiť ktokoľvek za pomerne nízke ceny.

GNSS signál môže byť rušený úmyselne alebo neúmyselne. Medzi neúmyselné typy rušenia patrí prirodzené rušenie, kedy dochádza k degradácii GNSS signálu pri prechode atmosférou Zeme, vesmírne počasie alebo viaccestné šírenie signálu (angl. multipath). Kvôli lámaniu a odrazom vln v prostredí sa signál šíri dlhšie, čo má za následok vznik chýb určovania polohy. Ďalej je medzi neúmyselné typy rušenia možné zaradiť systémy, ktoré svojou prevádzkou



v důsledku poruchy alebo nedostatočnej kompatibility narúšajú frekvenčné pásmo vyhradené pre GNSS [7].

Úmyselné rušenie je spojené predovšetkým so zariadeniami určenými priamo pre účel znemožnenia príjmu autentického GNSS signálu alebo vysielania falošných GNSS signálov. Medzi základné typy úmyselného GNSS rušenia patrí jamming a spoofing.

Jamming funguje na princípe vysielania rušivého signálu, ktorý zahltí GNSS prijímač šumom, čo má za následok stratu príjmu autentického signálu. Je to najčastejšia forma zámerného GNSS rušenia a vo väčšine prípadoch sa konkrétne jedná o úzkopásmové rušenie vo frekvenčných pásmach L1 a L2 [7].

Spoofing predstavuje oproti jammingu oveľa komplexnejší spôsob rušenia GNSS signálu. Princíp tohto typu rušenia spočíva v zámernom vysielaní falošného GNSS signálu, ktorý má identickú povahu toho autentického. GNSS prijímač v prípade úspešného spoofingového útoku funguje bez akéhokoľvek narušenia prevádzky, keďže intenzita prijatého falošného signálu zostáva rovnaká, alebo sa jej hodnota dokonca mierne zvýši. Všeobecne je spoofing možné rozdeliť na synchronný a asynchronný spoofing. V rámci synchronného spoofingu je falošný signál úplne identický s autentickým GNSS signálom. Na spooferi je v tomto prípade postupne zvyšovaná intenzita do momentu, kedy GNSS prijímač nezačne sledovať falošný signál, po čom je možné s polohou a časom manipulovať. Asynchronný typ spoofingu sa líši tým, že vysielaný falošný signál nie je s autentickým signálom totožný a pri úspešnom zaspoofovaní v prijímači ihneď dôjde k náhlej zmene polohy a času [7], [8].

Reálnych prípadov GNSS RFI, ktoré mali negatívny vplyv na prevádzku dôležitých systémov je vo svete mnoho. V roku 2022 bol zaznamenaný nárast počtu prípadov prevažne v oblastiach Izraela a pri hraniciach s Ruskom, avšak veľa prípadov bolo hlásených aj zo severnej a južnej Ameriky [9]. Ako príklad možno uviesť rušenie z januára 2022 v oblasti Denveru, USA, kedy bol zaznamenaný jamming v okruhu 50 NM od Denverského medzinárodného letiska (KDEN) po dobu takmer 34 hodín. Behom tejto doby bolo podaných niekoľko hlásení priamo riadiacim letovej prevádzky, spolu s celkovo 19 oficiálnymi hláseniami do systému ASRS (Aviation Safety Reporting System) agentúry NASA (National Aeronautics and Space Administration). Reportované boli napríklad rušivé upozornenia a výstrahy v kokpite, abnormálne výstrahy zo systému TCAS alebo zlyhanie autopilota [10].

Obzvlášť závažný prípad GNSS rušenia bol zaznamenaný na konci septembra roku 2023, kedy bol pozdĺž iránskych hraníc hlásený silný GNSS spoofing, ktorý postihol dokopy až 20



lietadiel. Posádky niektorých lietadiel hlásili úplný výpadok navigačných systémov, vrátane funkčnosti inerčného navigačného systému (IRS, Inertial Reference System). Posádka lietadla Embraer 650 letiaceho do Dubaja informovala, že ich poloha bola zobrazovaná približne 80 NM mimo plánovanej trate, pričom takmer bez povolenia vstúpili do iránskeho vzdušného priestoru. Podobná situácia nastala v prípade letu Challenger 604 do Dohy, kedy posádka hlásila stratu všetkých navigačných systémov a odchýlku 70-90 NM od trate. Keďže sa navigačnú schopnosť nepodarilo obnoviť, muselo byť lietadlo vektorované až do cieľovej destinácie [11].

1.3. Monitorovanie kvality GNSS signálu

S rýchlou integráciou GNSS do systémov kritickej infraštruktúry rastie aj závislosť od presného PVT riešenia. Akékoľvek narušenie signálu priamo ovplyvňuje presnosť určenia pseudovzdialenosti a vnáša do riešenia chyby. Cieľom a podstatou monitorovania kvality GNSS signálu je overenie dôveryhodnosti výsledného PVT riešenia, identifikácia hrozieb a poskytovanie včasných varovaní v prípade degradácie signálu na nebezpečnú úroveň. Techniky monitorovania GNSS signálu sa líšia v závislosti od využitia rôznych technológií, kedy sa môže skúmať výkon prijatého signálu, až po komplexnejšie potenciálne poruchové mechanizmy. Všeobecne je SQM možné rozdeliť do troch skupín podľa systému, v akom sa SQM vykonáva [12]. Každá skupina má svoju vlastnú množinu SQM požiadaviek a parametrov:

1. Aplikácie pre každodenné využitie

Do tejto skupiny sa radia služby poskytované bežným užívateľom širokej verejnosti, ktorí obyčajne nevyžadujú menej ako metrovú presnosť. Ako príklad možno uviesť určovanie polohy v aplikáciách pre smartfóny, turistické mapy alebo navigácia automobilov na cestách. Nepresné určenie polohy tu prevažne vedie len k zníženému komfortu užívateľa, preto požiadavky na SQM nie sú tak striktné ako v nasledujúcich skupinách, prípadne žiadne požiadavky ani neexistujú [12].

2. Aplikácie s vysokou presnosťou

V rámci tejto skupiny uvažujeme aplikácie, pre ktoré výkonnosť samostatného GNSS systému z hľadiska presnosti určenia polohy nie je dostačujúca. Pre presné určenie polohy sú dodatočne využívané rôzne korekčné služby zabezpečujúce centimetrovú, až milimetrovú presnosť. Príkladom môže byť napríklad vytyčovanie presnej polohy v geodézii alebo využitia



v poľnohospodárstve, v ktorých by nepresné určenie polohy mohlo potenciálne viesť k finančným stratám [12].

3. Aplikácie s vysokou integritou

Do skupiny aplikácií s vysokou integritou sa radia tzv. Safety-of-life aplikácie, ktoré sú kritické z hľadiska bezpečnosti. Cieľovú aplikačnú sféru tvoria rôzne módy dopravy, kde by zhoršenie výkonnosti navigačného systému bez akejkoľvek výstrahy v stanovenom čase mohlo viesť k priamemu ohrozeniu života. Typickým príkladom môžu byť systémy SBAS a GBAS využívané v leteckej doprave. Niektoré SQM požiadavky týchto systémov sú obsiahnuté v Prílohe D k ICAO Annex 10 – Aeronautical Communications [12], [13].

1.3.1. SQM parametre

Pre SQM parametre neexistuje unifikovaná definícia, avšak všeobecne sa pod týmto pojmom chápu parametre, pomocou ktorých je možné kvalitu GNSS signálu kvantifikovať. Slúžia ako prostriedok pre detekciu degradácie signálu, ktorá by mohla negatívne ovplyvniť prevádzku systémov vyžadujúcich vysokú integritu, presnosť, dostupnosť a kontinuitu. V nasledujúcich odstavcoch sú popísané parametre, ktoré sa pre vyjadrenie kvality GNSS signálu a detekciu potenciálnych hrozieb využívajú najčastejšie.

1.3.1.1. C/No

Parameter C/No (Carrier to Noise) vyjadruje pomer sily prijatého signálu k šumu na jednotku šírky pásma. Tento parameter sa bežne nachádza v dátach z GNSS prijímača ako doplnkový parameter k PVT riešeniu, uvádzaný jednotlivito ku každej družici. Určuje citlivosť prijímača z hľadiska jeho schopnosti zachytiť sa na nosnú frekvenciu autentického signálu a dekodovať informáciu v signáli vzhľadom na množstvo šumu prítomného v prostredí. Je uvádzaný v jednotke dB-Hz a jeho optimálna hodnota sa obvykle pohybuje v rozmedzí od 35-45 dB-Hz. V prítomnosti rušenia, prípadne iného negatívneho vplyvu hodnota tohto parametru obvykle klesne. Práve preto je tento pomer jedným z najčastejších parametrov pre analyzovanie kvality prijatého signálu, prípadne aj pre detekciu GNSS rušenia [14].

Okrem parametra C/No je bežne používaný aj parameter SNR (Signal to Noise), ktorý však vyjadruje pomer intenzity signálu a šumu v danej šírke pásma a je obvykle vyjadrovaný v dB. Vzťah medzi SNR a C/No je:

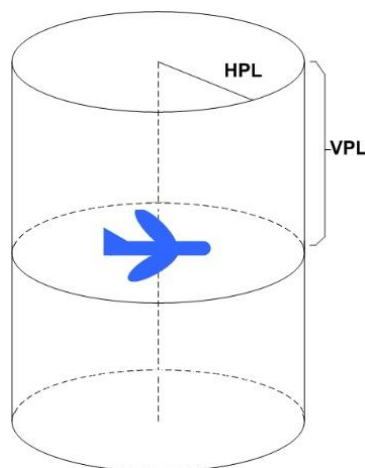
$$SNR = C/No - \text{šírka pásma} \quad (1)$$

1.3.1.2. Polohová chyba

Polohová chyba, typicky uvádzaná v metroch, je vyjadrená ako rozdiel medzi skutočnou a nameranou polohou. Obvykle je počítaná pre horizontálnu a vertikálnu zložku (HPE, VPE – Horizontal and Vertical Position Error). Určuje sa na základe porovnávania vypočítanej polohy s referenčnou polohou. Referenčná poloha sa všeobecne získava z osobitného vysoko presného referenčného prijímača.

1.3.1.3. HPL, VPL

Horizontal Protection Level (HPL) a Vertical Protection Level (VPL) sú parametre vyjadrujúce integritu a úroveň spoľahlivosti GNSS systému spojenú s výsledným polohovým riešením. HPL je definovaný ako polomer kružnice v horizontálnej rovine so stredom v polohe vypočítanej prijímačom, ktorá zaručene obsahuje skutočnú polohu objektu s danou pravdepodobnosťou. VPL je definované analogicky vo vertikálnej rovine. Do výpočtu týchto parametrov vstupujú chybové zložky, ktorými je GNSS zaťažené, parameter DOP popisujúci geometriu satelitov, a maximálne povolené pravdepodobnosti vydania falošnej výstrahy alebo nedetegovania chyby, ktoré plynú z požiadaviek na integritu daného systému. Všeobecne platí, že ak hodnota polohovej chyby prekročí hodnoty Protection Level, jedná sa o situáciu so zníženou bezpečnosťou prevádzky [2].

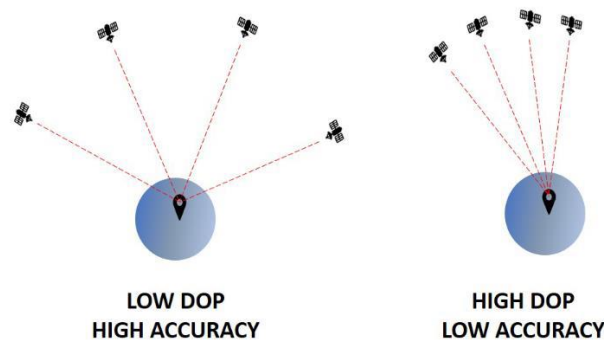


Obrázok 3: HPL a VPL [15]

1.3.1.4. DOP

Bezrozmerný parameter Dilution of Precision (DOP) popisuje efektivitu vzájomného geometrického rozostavenia sledovaných satelitov nad obzorom v danom čase. Pre jeho stanovenie je potrebné mať znalosť o azimute a elevácii viditeľných satelitov, a polohu

samotného GNSS přijímača. Všeobecne platí, že čím nižšia hodnota DOP, tým efektívnejšia je konfigurácia satelitov, a tým taktiež vyššia presnosť vypočítanej polohy.



Obrázok 4: DOP [16]

Vyjadrení parametra DOP existuje niekoľko, pričom najvšeobecnejším vyjadrením tohto parametra je Geometric DOP (GDOP), ktorý zahŕňa súčasne polohovú aj časovú zložku. Najčastejšie používaným prvkom DOP je Position DOP (PDOP), definovaným v trojrozmernom priestore. Pre horizontálnu a vertikálnu rovinu sú ďalej definované Horizontal DOP (HDOP) a Vertical DOP (VDOP), a pre časovú zložku je definovaný Time DOP (DOP) [2].

1.3.1.5. NSV

Skratka NSV (Number of Satellite Vehicles) označuje počet satelitov, ktoré môže v danú chvíľu GNSS prijímač využívať pre určovanie polohy. Presnosť určenia polohy sa s väčšou hodnotou NSV zvyšuje, keďže prijímač je schopný k určeniu polohy počítať sústavu viacerých rovníc. Ak je prijímač navyše vybavený funkciou monitorovania integrity (RAIM, Receiver Autonomous Integrity Monitoring), pri dostatočnom počte satelitov je schopný identifikovať satelit vysielajúci chybný signál.

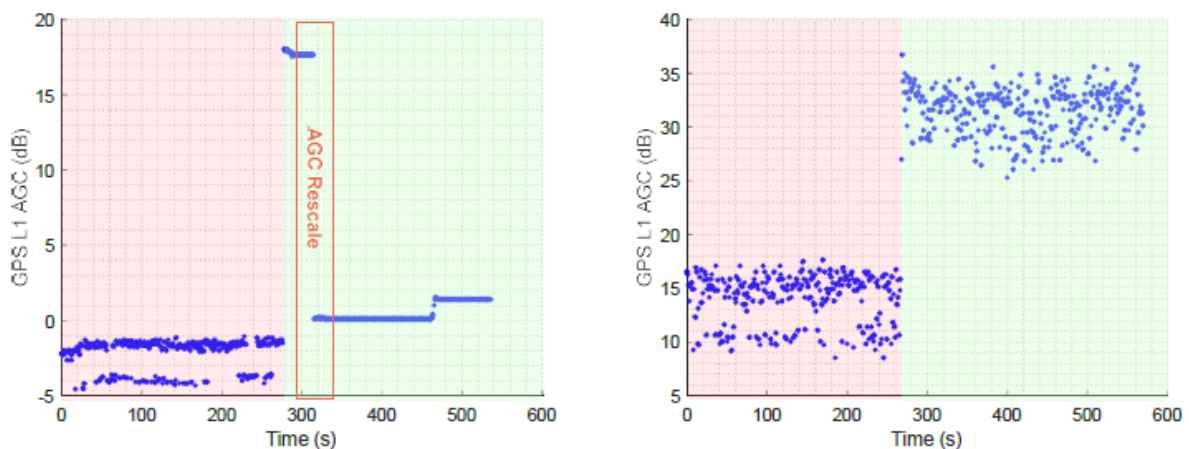
Je dôležité tu upozorniť na rozdiel medzi pojmami „počet viditeľných satelitov“ a „počet sledovaných satelitov“, kde druhý výraz tvorí podmnožinu toho prvého. Konkrétne druhý výraz značí počet satelitov, ktoré GNSS prijímač reálne použije k výpočtu PVT informácie.

1.3.1.6. AGC

Automatické vyrovnávanie citlivosti (AGC, Automatic Gain Control) je jeden z kľúčových elementov GNSS prijímača, ktorý sa nachádza pred vstupom do analógovo-digitálneho prevodníku (ADC, Analog-to-Digital Converter), kde upravuje výkon vstupujúceho signálu tak,

aby výsledný signál odpovedal vstupnému rozsahu ADC. Je veľmi citlivý na akékoľvek výchyľky v okolitom šume a v prítomnosti rušenia hodnota tohto parametra poklesne v dôsledku zvýšeného výkonu v GNSS pásme. Práve preto je tento parameter využívaný aj pre detekciu GNSS rušenia [17], [18], [19]. Jeho hodnota je uvádzaná v dB.

V rámci surových GNSS dát zo smartfónov tento parameter nie je prezentovaný jednotne naprieč všetkými zariadeniami. V závislosti na výrobcovi GNSS čipsetu inštalovaného v danom zariadení môžu byť hodnoty AGC v nameraných dátach uvádzané buď ako relatívne alebo absolútne. V prípade absolútnych hodnôt sa hodnoty AGC v priebehu času za rovnakých podmienok nemenia a sú rovnaké aj po zmene referenčnej hodnoty, voči ktorej sa AGC určuje. Toto môže nastať napríklad pri reštartovaní zariadenia. Ak uvažujeme situáciu s aktívnym zdrojom RFI v blízkosti zariadenia, pri uvádzaní absolútnych AGC hodnôt sa aj po odstránení zdroja RFI nepozoruje žiadny reset hodnôt na pôvodnú úroveň. Pre lepšiu predstavu je toto chovanie zobrazené na Obrázku 5 vpravo, kde červená časť reprezentuje oblasť s GNSS rušením, zelená reprezentuje oblasť bez GNSS rušenia. Ak sa naopak uvádza relatívne AGC, po odstránení zdroja RFI sa hodnoty AGC vrátia späť na svoje nominálne hodnoty tak, ako je zobrazené na Obrázok 5 vľavo [19].



Obrázok 5: Rozdiel medzi chovaním relatívnej (vľavo) a absolútnej (vpravo) uvedenej hodnoty AGC [19]

1.3.1.7. Multipath Indicator

Viaccestné šírenie je jedna z najčastejších príčin degradácie GNSS signálu u smartfónov. Zariadenia určené pre meranie kvality GNSS signálu môžu navyše disponovať algoritmi pre detekciu prítomnosti viaccestného šírenia v meraní. Jedná sa o bezrozmernú veličinu, indikujúcu prítomnosť, respektíve neprítomnosť viaccestného šírenia v meraní. V prípade



smartfónov sa priamo v surových GNSS dátach nachádza parameter *Multipath Indicator*, ktorý môže dosahovať troch hodnôt:

- 1 – značí detekciu multipath v danom meraní,
- 2 – značí neprítomnosť multipath v meraní alebo
- 0 – značí, že prítomnosť alebo absencia multipath v meraní je neznáma [20].

1.4. Zariadenia a nástroje pre monitorovanie kvality GNSS signálu

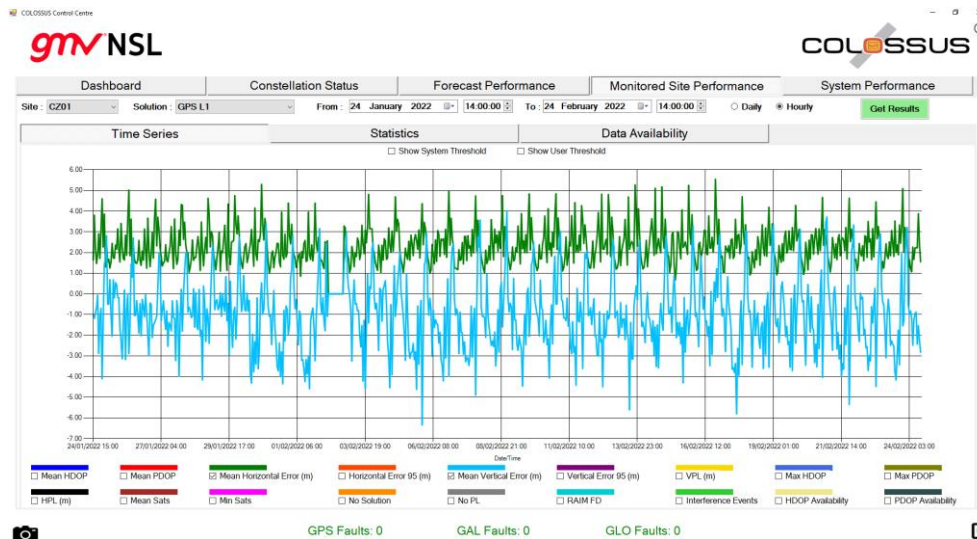
Táto podkapitola obsahuje zoznam dostupných zariadení a softwarových nástrojov určených k monitorovaniu kvality GNSS signálu. Takéto zariadenia môžu byť obzvlášť prínosné pre prevádzkovateľov rôznych systémov, ktorí v danej oblasti vyžadujú zaistenie špecifickej výkonnosti GNSS signálu, prípadne by ich nečakaná degradácia GNSS signálu mohla negatívne ovplyvniť, či už z prevádzkového alebo finančného hľadiska. Užívateľovi umožňujú pochopiť správanie GNSS systému v danom čase a mieste a stanoviť, či signál spĺňa ich špecifické požiadavky na výkonnosť. V neposlednom rade im tieto zariadenia umožnia GNSS signál analyzovať aj spätne, čím je zaistená podpora pri vyšetrení porúch a anomálií.

1.4.1. COLOSSUS

Zariadenie COLOSSUS od spoločnosti GMV NSL, zobrazené na Obrázku 6, je určené pre monitorovanie výkonnostných parametrov GNSS a identifikáciu potenciálnych porúch. Poskytuje informácie o GNSS signáli, upozornenia o degradácii signálu v reálnom čase, a taktiež umožňuje vykonávať štatistiku nameraných dát. Taktiež vykonáva dlhodobú analýzu výkonnosti signálu, generuje hodinové a denné štatistiky a predpovede. Mimo iné tiež poskytuje informácie o aktuálnom stave GNSS konštelácií, medzi ktoré sa radí prevádzkový stav satelitov, správnosť navigačných správ a informácie od poskytovateľov GNSS systému, obsiahnuté v správach NANU (Notice Advisory to Navstar Users) a NAGU (Notice Advisory to Galileo Users) [21]. Užívateľské rozhranie tohto zariadenia je zobrazené na Obrázku 7. Dáta z tohto zariadenia boli pre potreby tejto práce poskytnuté v rámci spolupráce s GCE (GNSS Centre of Excellence), a sú súčasťou porovnania schopnosti merať kvalitu GNSS signálu medzi low-cost a profesionálnym zariadením.



Obrázok 6: Zariadenie COLOSSUS [21]



Obrázok 7: Uživatelské rozhranie COLOSSUS [21]

1.4.2. GP-Probe

Spoločnosť GPSParton poskytuje vo svojom portfóliu produktov zariadenie GP-Probe, ktoré je určené pre meranie kvality signálu a detekciu rušenia. Zariadenie je prepojené s centrálnou platformou GP-Cloud, ktorá dáta spracováva v reálnom čase a generuje upozornenia, ak parametre prijatého signálu prekročia stanovené medze. Prostredníctvom užívateľského prostredia má užívateľ priamy prístup k dátam v reálnom čase, štatistikám za zvolené časové obdobie a prehľad o rade parametrov popisujúcich prijatý signál [22]. Uživatelské rozhranie tohto zariadenia je zobrazené na Obrázku 8.



Obrázok 8: Užívateľské rozhranie GP-Probe [22]

1.4.3. G-NUT/Anubis software

G-Nut/Anubis je open-source nástroj vyvinutý českou spoločnosťou G-Nut Software, ktorý slúži pre kontrolu kvality GNSS dát z rôznych GNSS systémov a obsahu dátových súborov v štandardných GNSS formátoch (RINEX a RTCM). Ďalej disponuje schopnosťou monitorovania prostredia (multipath, C/No), DOP a navigačných dát. Pokročilejšia verzia podporuje monitorovanie GNSS dát v reálnom čase a obsahuje množstvo doplnkových funkcií. Základný softwarový balíček pre operačný systém Linux je dostupný bezplatne [23].

1.4.4. MuSNAT

Univerzitou Bundeswehr v Mníchove bol vyvinutý komplexný analytický software MuSNAT (Multi Sensor Navigation Analysis Tool), ktorý slúži ako doplnok k prevádzke samostatného GNSS prijímača. Software je typicky používaný pre monitorovanie kvality prijatého signálu, aplikáciu korekčných GNSS dát pre určenie presnej polohy, integráciu s inými navigačnými technológiami, autentifikáciu Galileo signálov (OSNMA), detekciu GNSS rušenia, rovnako ako aj pre vývoj nových algoritmov [24].

1.4.5. GIASONE

V rámci programu NAVISP (Navigation Innovation and Support Program) od Európskej vesmírnej agentúry (ESA, European Space Agency) je talianskou spoločnosťou Intecs Solutions v súčasnosti vyvíjané zariadenie GIASONE (GNSS Integrity and Authentication Services user-Oriented Network). Zariadenie má za účel poskytovať koncovým užívateľom



širokú škálu služieb súvisiacich s monitorovaním integrity a výkonu, stavu polohovacej služby, autentifikáciou signálov, generovaním štatistík a podobne [25].

1.4.6. NAVBLUE GNSS Monitoring

GNSS Monitoring systém od dcérskej spoločnosti Airbus NAVBLUE, je systém určený pre nahrávanie, monitorovanie a analýzu výkonnosti GNSS signálov. Medzi hlavné funkcie tohto systému patrí monitorovanie GNSS signálu, detegovanie anomálií a GNSS rušenia a generovanie príslušných výstrah takmer v reálnom čase. Systém bol vyvinutý v súlade s požiadavkami obsiahnutých v ICAO Annex 10 pre monitorovanie a zaznamenávanie GNSS dát, čo umožňuje poskytovateľom letových navigačných služieb a prevádzkovateľom letísk spĺňať všetky legálne náležitosti [26].



2. Surové GNSS dáta z Android smartfónov

Táto kapitola je úvodom do problematiky surových GNSS dát (angl. *raw GNSS measurements*) z Android smartfónov a aplikácií s nimi pracujúcich. Začiatok kapitoly je venovaný limitáciám súčasných smartfónov z hľadiska kvality inštalovaného hardwaru a s tým súvisiacim príjmom signálu a dostupnosťou výstupných informácií. Ďalej sú popísané základné formáty súborov využívané pre nahrávanie a prenos surových GNSS dát. Posledná časť kapitoly sa venuje voľne dostupným Android aplikáciám, ktoré surové GNSS dáta využívajú pre rôzne účely.

Pred rokom 2016 mali užívatelia smartfónov s operačným systémom Android prístup iba k polohovým súradniciam vypočítaných GNSS čipom. Zmenilo sa to v máji roku 2016, kedy Google predstavil operačný systém Android 7.0 spolu s novým API (Application Programming Interface), ktorý po novom umožňoval prístup k surovým GNSS dátam. Vzniklo tým obrovské množstvo nových potenciálnych možností pre vývoj pokročilejších spôsobov spracovania GNSS signálu.

Do dnešného dňa bolo publikovaných niekoľko desiatok vedeckých článkov, zameriavajúcich sa na využitie surových GNSS dát zo smartfónov pre RTK (Real Time Kinematics) a PPP (Precise Point Positioning) aplikácie, alebo detekciu GNSS rušenia. Keďže smartfóny v súčasnej dobe využívajú na dennej báze miliardy ľudí po celom svete, rozširuje to ďalej ich potenciál využitia pre implementáciu rôznych crowdsourcingových aplikácií.

2.1. Hardware smartfónov a príjem GNSS signálu

Kvalita hardwaru smartfónov, konkrétne GNSS anténa, predstavuje jednu z najväčších prekážok príjmu kvalitných GNSS dát a dosiahnutia presnej polohy pomocou smartfónu. V porovnaní s vysokokvalitnými komponentami pokročilých GNSS prijímačov využívaných pre geodetické a prieskumné účely, ktoré bežne dosahujú centimetrovú presnosť, je ich kvalita výrazne nižšia. Smartfóny využívajú všesmerovú lineárne polarizovanú anténu, ktorej vyžarovacia charakteristika síce umožňuje vysokú dostupnosť signálu, avšak na úkor kvality prijatých dát. Svedčí o tom značná prítomnosť šumu v signáli a náchylnosť na vplyvy viaccestného šírenia. V štúdiách skúmajúcich kvalitu prijatého signálu pomocou smartfónov bolo zistené, že priemerné hodnoty C/No sú v porovnaní s presnými geodetickými prijímačmi nižšie o približne 10 dB-Hz, čo taktiež dokáže znateľne ovplyvniť spoľahlivé určenie polohy užívateľa a jej presnosť [27], [28].



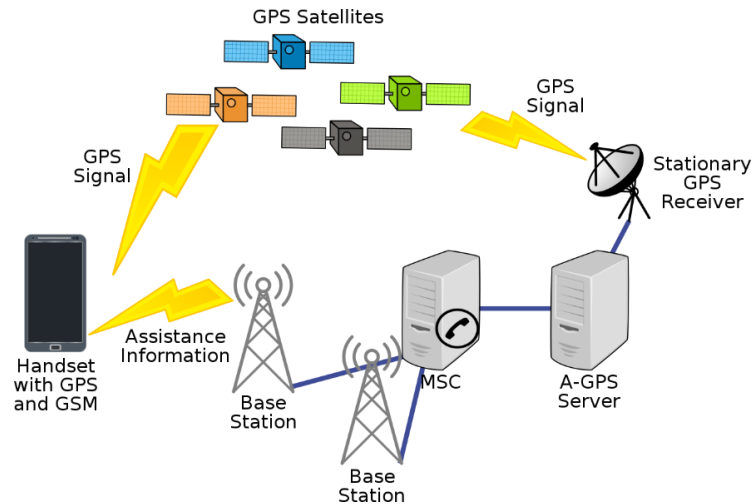
Príjem kvalitných GNSS dát pomocou smartfónov je taktiež do určitej miery znemožnený špecifickým predvoleným nastavením smartfónu. Jedná sa o tzv. „*duty cycling*“, čo znamená, že GNSS čip vo vnútri smartfónu pracuje prerušovane. Čip je tak aktívny len na zlomok každej sekundy, čím sa zaisť nízka spotreba energie a zabráni sa rýchlemu vybíjaniu batérie. Toto nastavenie sa však dá vypnúť prostredníctvom aktivácie vývojárskeho režimu a následným vypnutím tejto funkcie v Možnostiach pre vývojárov v nastaveniach telefónu.

Smartfóny pôvodne podporovali príjem GNSS signálu len na jednej frekvencii (L1/E1). Zmena nastala v roku 2018, kedy bol spoločnosťou Xiaomi na trh uvedený prvý smartfón podporujúci duálnu frekvenciu. Konkrétne sa jednalo o model Xiaomi Mi 8 s čipom Broadcom BCM47755, podporujúcim príjem signálu na dvoch frekvenciách (L1/E1 a L5/E5) súčasne [29]. V roku 2023 je u novo predstavených modelov smartfónov podpora duálnej frekvencie už skôr štandardom, rovnako ako príjem signálov zo všetkých globálnych satelitných konštelácií. Od marca 2022 je navyše pre smartfóny predávané v EÚ povinné okrem iných GNSS konštelácií prijímať signály zo systému Galileo. Vzišlo tak z delegovaného nariadenia Európskej komisie (EÚ) 2019/320 z 12. decembra 2018, ktorého cieľom je zabezpečenie presnej lokalizácie volajúceho na tiesňovú linku z mobilného zariadenia [30].

Ďalšou komplikáciou pre prácu so surovými GNSS dátami zo smartfónov je rozmanitosť čipových sád, ktoré sa dovážajú rôzne do rôznych častí sveta. Parametre nachádzajúce sa na výstupe zo smartfónov teda z veľkej miery závisia od krajiny, do ktorej sa dané zariadenie dováža. Vzniká tým problém v dostupnosti niektorých výstupných parametrov, preto je pred zamýšľanou kúpou zariadenia pre potreby vývoja nových GNSS aplikácií a algoritmov nutné vopred si overiť presný typ čipovej sady dodávanej so zariadením. Pre toto overenie sú dostupné napríklad voľne prístupné databázy smartfónov, v ktorých sa dajú ľahko vyhľadať podporované výstupné informácie jednotlivých typov zariadení. Konkrétnym príkladom je zoznam telefónov na webových stránkach Android Developers [31], alebo zdieľaná databáza vytvorená vývojárom Android aplikácie GPS Test [32].

Aj napriek týmto limitáciám existuje snaha o vývoj nových techník pre čo najrýchlejšie a najspoľahlivejšie určenie polohy. Na rozdiel od komplexnejších a drahších geodetických GNSS prijímačov sú smartfóny schopné pre rýchly príjem GNSS dát a lokalizáciu využívať aj externé informácie poskytované alternatívnymi kanálmi, napríklad cez internetové pripojenie alebo mobilnú sieť. Pomocou techniky nazývanej Assisted GNSS (A-GNSS) smartfón prijíma dáta potrebné pre určenie polohy nielen priamo zo satelitov, ale aj zo siete pozemných asistenčných centier tak, ako je schematicky zobrazené na Obrázku 9. S rýchlejšim príjmom

dát s orbitálními parametrami satelitov, almanachom a korekciami je smartfón schopný rýchlejšie a spoľahlivejšie určiť polohu. Pomocou tejto asistencie sa výrazne znižuje čas do prvotného získania polohy (Time to First Fix), čím je celkovo zlepšený výkon GNSS čipovej sady [2].



Obrázok 9: Schéma princípu fungovania A-GNSS, aplikované na GPS [33]

2.2. GNSS dátové formáty

Rôzni výrobcovia GNSS prijímačov majú bežne pre ukladanie a prenos GNSS dát definované svoje vlastné formáty. Táto skutočnosť sa môže stať komplikáciou pri následnom vyhodnotení dát pomocou softwaru od iného výrobcu, alebo pri kombinácii dát z prijímačov od dvoch rôznych výrobcov. Pre odstránenie týchto limitácií formátov GNSS súborov existuje niekoľko štandardizovaných výmenných ASCII (American Standard Code for Information Interchange) formátov. Ich hlavnou výhodou je predovšetkým zjednodušená výmena dát a uľahčenie vývoja softwarov pre širokú škálu GNSS prijímačov, namiesto vyvíjania osobitného softwaru pre každý prijímač zvlášť.

Štandardných výmenných GNSS formátov existuje mnoho, avšak najčastejšie sa môžeme stretnúť s formátmi RINEX (Receiver Independent Exchange Format), NMEA (National Marine Electronics Association Format) a RTCM (Radio Technical Commission for Marine Services). Pre nahrávanie surových GNSS dát výlučne z Android smartfónov je dodatočne popísaný formát, ktorý bol zavedený pre používanie v rámci Android aplikácie GNSS Logger.



2.2.1. RINEX

Formát RINEX, prvýkrát predstavený v roku 1989, je určený pre ukladanie, prenos a post-processing surových GNSS dát. V priebehu rokov od jeho zavedenia sa formát prispôboval vznikom nových satelitných systémov a novým typom meraní. V súčasnosti existujú štyri verzie tohto formátu, z ktorých najpoužívanejší je RINEX v.3. Posledná verzia, RINEX v.4, bola predstavená koncom roka 2021 [34], [35]. Formát RINEX definuje 3 základné dátové typy súborov:

- Navigation File – „**N“ alebo „NAV“ – súbor s navigačnými správami družíc – efemeridy, parametre pre korekciu hodín a ionosféry;
- Observation File – „**O“ alebo „OBS“ – súbor s kódovými, fázovými a Dopplerovskými meraniami, spolu s príslušnou silou prijatého signálu (SNR);
- Meteorological File – „**M“ alebo „MET“ – súbor s meteorologickými dátami v mieste merania.

Každý RINEX súbor pozostáva z hlavičky a sekcie s dátami. Posledný záznam v sekcii hlavičky je vždy „END OF HEADER“. Dátová časť je rozdelená na epochy, ktoré obsahujú časovú značku, ID jednotlivých satelitov a rôzne typy meraní a parametrov v rovnakom poradí, ako sú uvedené v hlavičke súboru [35]. Na Obrázku 10 sa nachádza názorný príklad dát vo formáte RINEX, nameraných pomocou smartfónu.

```

| 3.03      OBSERVATION DATA  M      RINEX VERSION / TYPE
GnssLogger  Xiaomi 12      20221117 131050 UTC  PGM / RUN BY / DATE
Google GnssLogger  Unknown  MARKER NAME
Unknown      Unknown  MARKER NUMBER
Unknown      GnssLogger  v3.0.5.6  OBSERVER / AGENCY
Unknown      Unknown  REC # / TYPE / VERS
Unknown      Unknown  ANT # / TYPE
0.0000      0.0000      0.0000  APPROX POSITION XYZ
0.0000      0.0000      0.0000  ANTEENNA: DELTA H/E/N
G 8 C1C L1C D1C S1C C5I L5I D5I S5I  SYS / # / OBS TYPES
R 4 C1C L1C D1C S1C  SYS / # / OBS TYPES
C 8 C2I L2I D2I S2I C7I L7I D7I S7I  SYS / # / OBS TYPES
E 8 C1C L1C D1C S1C C5I L5I D5I S5I  SYS / # / OBS TYPES
2022 11 17 13 10 50.0000000  GPS  TIME OF FIRST OBS
7 R06 -4 R07 5 R08 6 R09 -2 R10 -7 R17 4 R24 2  GLONASS SLOT / FRQ #
G L1C  SYS / PHASE SHIFT
G L5I  SYS / PHASE SHIFT
R L1C  SYS / PHASE SHIFT
C L2I  SYS / PHASE SHIFT
C L7I  SYS / PHASE SHIFT
E L1C 0.00000  SYS / PHASE SHIFT
E L5I  SYS / PHASE SHIFT
C1C 0.000 C1P 0.000 C2C 0.000 C2P 0.000  GLONASS COD/PHS/BIS
END OF HEADER
> 2022 11 17 13 10 50.0009998 0 23
G20 22972246.44525 76606.83425 -8641.89525 32.69525
G07 23409897.26526 70942.77526 -8000.62526 41.28226
G05 21517153.08525 60674.57125 -6840.03425 31.73225
E27 ----- 49244.01905 -5655.19105 31.60005 24120029.45125 36897.90925

```

Obrázok 10: RINEX súbor s dátami zo smartfónu



2.2.2. NMEA

Formát NMEA, prijatý v roku 1983, je štandardný dátový formát v súčasnosti používaný väčšinou komerčných GNSS prijímačov, ktorý bol pôvodne určený pre námorné elektronické zariadenia. Dáta sú v NMEA súbore uložené v riadkoch, respektíve v tzv. vetách, v ktorých sú obsiahnuté dáta o polohe, rýchlosti, čase a satelitoch. Každá veta začína znakom „\$“. Za ním nasleduje päťmiestne pole, v ktorom sa nachádza identifikačný kód GNSS konštelácie (tzv. Talker ID, napr. \$GP pre GPS) spolu s kódom určujúcim typ správy (napr. GGA). Zo všetkých typov NMEA viet sú najvyužívanejšie nasledujúce:

- RMC – základné informácie o polohe;
- GGA – obsahuje časovú značku, údaje o počte sledovaných satelitov, polohe vrátane nadmorskej výšky a tzv. *QualityIndicator*, označujúci kvalitu určenej polohy;
- GSA – obsahuje hodnoty parametrov PDOP, HDOP a VDOP [35].

Na Obrázku 11 sa nachádza vzorová ukážka dát vo formáte NMEA, nameraných pomocou smartfónu.

```
NMEA,$GNNGGA,131032.000,5003.2197,N,01425.6982,E,1,22,0.63,240.6,M,45.5,M,,*7D,1668690632000
NMEA,$GNGSA,A,3,20,07,05,14,30,,,,,,,,,0.87,0.63,0.60,1*0B,1668690632000
NMEA,$GNGSA,A,3,74,71,70,81,88,,,,,,,,,0.87,0.63,0.60,2*05,1668690632000
NMEA,$GNGSA,A,3,27,14,21,,,,,,,,,0.87,0.63,0.60,3*0C,1668690632000
NMEA,$GNGSA,A,3,45,10,05,14,07,25,42,26,24,,,,,0.87,0.63,0.60,4*0C,1668690632000
NMEA,$GNGSA,A,3,,,,,,,,,,,,,0.87,0.63,0.60,5*09,1668690632000
NMEA,$GNGSA,A,3,,,,,,,,,,,,,0.87,0.63,0.60,6*0A,1668690632000
NMEA,$GPGSV,3,1,11,13,65,299,,14,59,131,41.8,30,59,068,35.6,05,49,239,31.7,1*78,1668690632000
NMEA,$GPGSV,3,2,11,15,34,299,,36,30,158,35.0,20,26,201,32.7,07,24,070,41.3,1*75,1668690632000
NMEA,$GPGSV,3,3,11,08,12,038,,18,10,310,,02,03,275,,1*5F,1668690632000
NMEA,$GPGSV,1,1,2,14,59,131,39.7,30,59,068,35.7,8*58,1668690632000
NMEA,$GLGSV,2,1,7,73,88,158,,71,83,175,18.3,72,42,319,,74,38,219,34.3,1*4E,1668690632000
NMEA,$GLGSV,2,2,7,70,30,147,25.7,81,10,020,24.5,88,08,331,19.9,1*66,1668690632000
NMEA,$GAGSV,3,1,12,19,68,295,,27,60,084,31.6,21,45,183,37.9,30,16,041,,7*75,1668690632000
NMEA,$GAGSV,3,2,12,04,10,302,,11,10,316,,14,09,115,16.8,10,08,290,,7*6A,1668690632000
NMEA,$GAGSV,3,3,12,12,03,267,,36,03,001,,01,03,205,,07,,32.7,7*5E,1668690632000
NMEA,$GAGSV,1,1,4,27,60,084,34.6,21,45,183,28.7,14,09,115,29.6,07,,29.7,1*75,1668690632000
NMEA,$GBGSV,5,1,18,14,69,217,40.2,26,64,068,37.4,24,62,218,36.3,33,59,286,,1*6A,1668690632000
NMEA,$GBGSV,5,2,18,42,51,173,40.9,10,37,073,38.6,07,30,059,27.2,40,29,045,,1*61,1668690632000
NMEA,$GBGSV,5,3,18,05,18,129,35.8,41,13,317,,45,11,055,29.7,25,07,232,25.6,1*62,1668690632000
NMEA,$GBGSV,5,4,18,60,06,110,,29,05,049,,21,05,150,,09,03,090,,1*7C,1668690632000
NMEA,$GBGSV,5,5,18,02,03,107,,30,01,001,,1*7B,1668690632000
NMEA,$GBGSV,1,1,3,26,64,068,28.4,24,62,218,24.6,42,51,173,33.1,5*66,1668690632000
NMEA,$GNRMC,131032.000,A,5003.2197,N,01425.6982,E,0.252,171.43,171122,,A,V*37,1668690632000
```

Obrázok 11: NMEA súbor s dátami zo smartfónu

2.2.3. RTCM

Formát RTCM, vytvorený v roku 1983, slúži pre prenos a výmenu korekčných GNSS dát v diferenciálnych GPS (DGPS) službách a RTK aplikáciách. Dáta v tomto formáte svojim užívateľom ponúka v rámci svojich služieb napríklad česká sieť permanentných staníc pre presné určovanie polohy, známa pod názvom CZEPOS [36]. Bežný užívateľ smartfónu však korekčné GNSS údaje pre dosiahnutie presnosti v rádoch niekoľkých cm nevyžaduje. Keďže



sa v rámci tejto práce nepracuje s korekčnými GNSS dátami, ďalej sa formátom RTCM nebudeme zaoberať.

2.2.4. GNSS Logger formát

Aplikácia GNSS Logger, bližšie popísaná v podkapitole 2.4, využíva vlastný formát vytvorený vývojármi aplikácie, špeciálne pre nahrávanie GNSS dát z Android smartfónov. Tento formát začali pre nahrávanie dát využívať aj niektoré ďalšie Android aplikácie. Formát pozostáva z hlavičky a dátovej časti. Dáta sú nahrávané v riadkoch, ktoré začínajú predponou identifikujúcou typ dát. Za ňou nasledujú jednotlivé parametre patriace do daného typu, ktorých názvy a poradie sú definované v hlavičke súboru. V súbore sa nachádzajú surové GNSS dáta (Raw), dáta obsahujúce status GNSS konštelácií (Status), navigačné správy (Nav), vypočítaná poloha (Fix) a taktiež dáta z inerčných senzorov zariadenia. Vzorové dáta v tomto formáte sú pre ukážku zobrazené na Obrázku 12.

```
Status,1668690632000,58,50,5,29,1561097980,23.40,49.0,5.0,1,0,0,19.9
Status,1668690632000,58,51,5,21,1561097980,22.10,150.0,5.0,1,0,0,18.6
Status,1668690632000,58,52,5,9,1561097980,0.00,90.0,3.0,0,0,0,0.0
Status,1668690632000,58,53,5,2,1561097980,0.00,107.0,3.0,0,0,0,0.0
Status,1668690632000,58,54,5,30,1561097980,0.00,1.0,1.0,0,0,0,0.0
Status,1668690632000,58,55,5,26,1176450050,31.70,68.0,64.0,1,0,0,28.2
Status,1668690632000,58,56,5,24,1176450050,30.80,218.0,62.0,1,0,0,27.3
Status,1668690632000,58,57,5,42,1176450050,35.40,173.0,51.0,1,0,0,31.9
Fix,GPS,50.0536650000,14.4283033333,286.0,0.054560557,1.8,217.52,1668690633000,0.7,179.9,23386604800000,11.2
Raw,1668690633000,86415000000,18,29.506538130050668,-
1352725764585999872,0.0,29.506538130050668,3337.475645621241,0.0,0,20,0.0,47,393050924367136,51,35.70899963378906
420030,,,,0,18.146627915029086,1,6.0,35.70899963378906,0.0,0.0,0.0,66.7128,C,
Raw,1668690633000,86415000000,18,29.506538130050668,-
1352725764585999872,0.0,29.506538130050668,3337.475645621241,0.0,0,7,0.0,16431,393050922907704,42,41.199001312255
575420030,,,,0,22.413109930279752,1,6.0,41.19900131225586,0.0,0.0,0.0,66.7128,C,
Raw,1668690633000,86415000000,18,29.506538130050668,-
1352725764585999872,0.0,29.506538130050668,3337.475645621241,0.0,0,5,0.0,47,393050929221956,74,32.36399841308594,
20030,,,,0,14.351759691497989,1,6.0,32.36399841308594,0.0,0.0,0.0,66.7128,C,
Raw,1668690633000,86415000000,18,29.506538130050668,-
1352725764585999872,0.0,29.506538130050668,3337.475645621241,0.0,0,27,0.0,16431,393050920540479,396,24.3999996185
1575420030,,,,0,5.329843143030104,6,6.0,24.399999618530273,0.0,0.0,2.0342954300256455,66.7128,C,
Raw,1668690633000,86415000000,18,29.506538130050668,-
```

Obrázok 12: GNSS Logger súbor s dátami zo smartfónu

2.3. Parametre z Android API

GNSS dáta sú od predstavenia API 24 v roku 2016 prístupné prostredníctvom troch Android tried:

- GnsClock,
- GnsMeasurement,
- GnsNavigationMessage.

Trieda GnsNavigationMessage obsahuje bity navigačnej správy spolu s údajmi o stave navigačnej správy. Presné poskytnuté informácie však závisia od čipovej sady a výrobcu



zariadenia. Základné parametre, s ktorými sa typicky pracuje, sú obsiahnuté v triedach GnssClock a GnssMeasurement a sú uvedené v Tabuľke 1.

Tabuľka 1: Parametre GNSS tried v Android API [37]

GnssClock Class

<i>TimeNanos</i>	Čas GNSS prijímača zariadenia [ns]
<i>TimeUncertaintyNanos</i>	Chybový odhad predchádzajúcej hodnoty
<i>FullBiasNanos</i>	Rozdiel medzi <i>TimeNanos</i> a pravým GPS časom od 0000Z, 6.1.1980 [ns]
<i>BiasNanos</i>	Sub-nanosekundová časť hodín prijímača [ns]
<i>DriftNanosPerSecond</i>	Posun hodín prijímača [ns/s]
<i>DriftUncertaintyNanosPerSecond</i>	Chybový odhad predchádzajúcej hodnoty
<i>HardwareClockDiscontinuityCount</i>	Počet diskontinuit hardvérových hodín
<i>LeapSecond</i>	Rozdiel medzi časom GPS a UTC [s]

GnssMeasurements Class

<i>Svid</i>	ID satelitu
<i>ConstellationType</i>	Typ GNSS systému (BeiDou, Galileo, GLONASS, GPS, QZSS, SBAS, Unknown)
<i>TimeOffsetNanos</i>	Posun času, ak sú merania asynchrónne [ns]
<i>State</i>	Stav synchronizácie
<i>ReceivedSvTimeNanos</i>	Prijatý satelitný čas v čase merania [ns]
<i>ReceivedSvTimeUncertaintyNanos</i>	Chybový odhad predchádzajúcej hodnoty
<i>Cn0DbHz</i>	Pomer C/No [dB-Hz]
<i>PseudorangeRateMetersPerSecond</i>	Pseudorange rate – Dopplerovský posun násobený zápornou hodnotou nosnej vlnovej dĺžky [m/s]
<i>PseudorangeRateUncertaintyMetersPerSecond</i>	Chybový odhad predchádzajúcej hodnoty
<i>AccumulatedDeltaRangeMeters</i>	Fázové meranie [m]
<i>AccumulatedDeltaRangeUncertaintyMeters</i>	Chybový odhad predchádzajúcej hodnoty
<i>AccumulatedDeltaRangeState</i>	Validita fázového merania
<i>CarrierFrequencyHz</i>	Nosná frekvencia signálu [Hz]
<i>AgcDb</i>	AGC [dB]

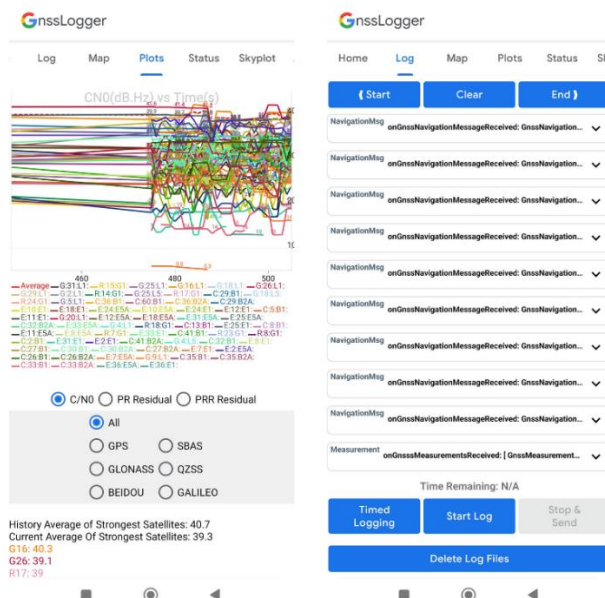
K identifikovaniu GNSS konštelácie slúži číselný parameter *ConstellationType*, identifikovanie jednotlivých satelitov je následne možné pomocou parametra *Svid*. Triedy GnssClock a GnssMeasurement obsahujú všetky informácie potrebné pre výpočet pseudovzdialenosti, keďže tá nie je priamo na výstupe poskytovaná. Výpočet pseudovzdialenosti ρ vychádza z rozdielu času vyslania a príjmu signálu. Používa sa rovnica:

$$\rho = \frac{(t_{Rx} - t_{Tx})}{1E9} * c, \quad (2)$$

kde t_{Tx} vyjadruje čas vyslania signálu zo satelitu a odpovedá priamo parametru *ReceivedSvTimeNanos*, t_{Rx} je čas príjmu signálu a c je rýchlosť svetla vo vákuu. Výpočet t_{Rx} je rôzny v závislosti na danej GNSS konštelácii, no všeobecne sa k výpočtu používajú parametre *TimeNanos*, *BiasNanos* a *FullBiasNanos* [37].

2.4. Android aplikácie

O záujme pre využitie surových GNSS dát svedčí veľké množstvo voľne dostupných aplikácií v Google Play Store, ktoré s nimi pracujú. Najpočetnejšie zastúpenie majú aplikácie pre nahrávanie (angl. *logging*) dát v rôznych formátoch. Hneď po oznámení nového API v roku 2016 Google vyvinul aplikáciu pre nahrávanie dát s názvom GNSS Logger, zobrazenej na Obrázku 13.



Obrázok 13: Aplikácia GNSS Logger

Aplikácia disponuje radou rôznych funkcií pre analyzovanie signálu a v nastaveniach je možné si zvoliť požadovaný formát nahrávania dát. Dáta je možné nahrávať v štandardných formátoch RINEX, NMEA, alebo vo vlastnom GNSS Logger formáte, v ktorom sa nachádzajú parametre priamo z API zariadenia, navigačné správy a dáta z inerčných (IMU) senzorov. Je možné generovať aj všetky tri formáty súčasne. Aplikácia v sebe zahŕňa algoritmy pre vylepšenie vypočítanej polohy pomocou metódy najmenších štvorcov (WLS, Weighted Least Squares). V reálnom čase aplikácia vizualizuje priebeh sily signálu a reziduá



pseudovzdialenosti v čase. Na ďalších záložkách v aplikácii je možné nájsť skyplot a informácie o stave jednotlivých GNSS systémov [38]. Spolu s aplikáciou GNSS Logger Google vydal aj komplementárnu počítačovú aplikáciu založenú na počítačovom softvare Matlab, umožňujúcu hlbšiu analýzu nahraných dát. Google taktiež zverejnil zdrojový kód oboch programov, ktorý má slúžiť ako podklad pre inšpiráciu a tvorbu nových aplikácií a algoritmov [31].

Prvá Android aplikácia schopná konvertovať surové GNSS dáta z Android API priamo do štandardného GNSS formátu RINEX bola aplikácia Geo++ RINEX Logger, vydaná v roku 2017. Do dnešnej doby bola aplikácia optimalizovaná na základe spätnej väzby od užívateľov a úspešne testovaná na mnohých typoch zariadení [39]. Postupom času boli Android aplikácie rozšírené o schopnosti nahrávania dát vo viacerých formátoch súčasne, nahrávanie údajov z inerčných senzorov daného zariadenia a nové možnosti analýzy signálu v reálnom čase priamo v užívateľskom prostredí aplikácie. Ako príklad možno uviesť aplikáciu GNSS/IMU Logger, ktorá podporuje nahrávanie surových dát, RINEX dát a taktiež dát z IMU senzorov zariadenia. Okrem toho tiež aplikácia vykonáva základnú analýzu prijatého signálu [40].

Pre overenie, prípadne zistenie poskytovaných výstupných informácií daného zariadenia je dostupná aplikácia GPSTest. Užívateľ aplikácie môže údaje o svojom type zariadenia nahráť do zdieľanej databázy vytvorenej a udržiavanej vývojárom aplikácie. Do dnešného dňa databáza obsahuje viac ako 4 000 vstupov od užívateľov z celého sveta a obsahuje údaje o type hardwaru v zariadení, type Androidu a API zariadenia, podpore raw GNSS measurements, duálnej frekvencie, navigačných správ a ďalších parametrov nutných pre využitie zariadenia na experimentálne alebo testovacie účely [32]. Mimo iné aplikácia taktiež v reálnom čase zobrazuje informácie o stave viditeľných GNSS a SBAS satelitoch [41].

Surové GNSS dáta zo smartfónov je možné v neposlednom rade využiť taktiež pre vývoj nových spôsobov určenia presnej polohy. Medzi dostupné aplikácie, ktorým sa podarilo dosiahnuť väčšiu presnosť určenia polohy pomocou implementácie inovatívnych algoritmov patria napríklad aplikácie PPP Wizlite a 3Pgo [42], [43].

PPP Wizlite je aplikácia vyvinutá Francúzskou vesmírnou agentúrou (CNES, Centre national d'études spatiales), ktorá užívateľom pomáha dosiahnuť vysokú presnosť. Aplikácia je schopná spracovávať signály L1 a L5 z konštelácií GPS, GLONASS a Galileo. Pomocou aplikácie je možné dosiahnuť lokalizáciu s presnosťou približne 1 m. K tejto aplikácii je dodatočne vyvinutá aplikácia RTCM Converter, ktorá namerané dáta konvertuje do



štandardného formátu RTCM, čo následne užívateľovi umožňuje dáta distribuovať ďalším subjektom pre ich ďalšie využitie [42], [44].

Aplikácia 3PGo, vyvinutá spoločnosťou Spaceopal, využíva pre presné určenie polohy NAVCAST korekcie dráh a hodín s využitím interného algoritmu. Vypočítané polohy z merania sa dajú uložiť v .kml formáte pre vykreslenie vypočítanej polohy v prehliadači, napríklad Google Earth [43].

Pre detekciu GNSS rušenia za pomoci surových GNSS dát zo smartfónov je v súčasnej dobe vyvíjaná aplikácia GNSS Alarm, ktorá pre detekciu jammingu a spoofingu využíva štyri detekčné metódy. Aplikácia je z dôvodu rôznorodosti vlastností a prahových hodnôt rôznych typov zariadení v čase písania tejto práce stále v testovacej fáze a nie je dostupná k stiahnutiu [18].

2.4.1. Porovnanie aplikácií

Tabuľka 2 obsahuje zoznam Android aplikácií pracujúcich so surovými GNSS dátami, ktoré boli dohľadane v rámci rešeršnej časti tejto práce. Aplikácie sú navzájom porovnané najskôr z hľadiska ich účelu, typu formátu nahrávania GNSS dát (ak sú schopné ich nahrávať) a ostatných funkcií a možností.

Z Tabuľky 2 je zrejmé, že prevažná väčšina aplikácií podporuje nahrávanie surových GNSS dát v štandardných formátoch (RINEX, NMEA, GNSS Logger formát) pre post-processing. Väčšina z týchto aplikácií súčasne signál analyzuje v reálnom čase a uvádza stav satelitov a konštelácií. Výstupom analýzy sú vizualizácie základných metrík a parametrov, poskytujúce užívateľovi prehľad o vlastnostiach prijatého signálu. Jedná sa napríklad o priebeh C/No v čase, počet viditeľných satelitov a skyplot. Samozrejmosťou väčšiny aplikácií je taktiež podpora duálnej frekvencie, ktorou v súčasnej dobe disponujú skoro všetky nové zariadenia. Celkovo tri aplikácie sú v čase písania tejto práce vo fáze vývoja a ešte nie sú dostupné k stiahnutiu v Google Play Store. V Tabuľke 2 sú odlišené červenou farbou.



Tabuľka 2: Porovnanie Android aplikácií

	Aplikácia vo vývoji	Účel				Nahrávanie dát						Prostredie aplikácie							
		Nahrávanie dát	Zistenie schopností	Analýza GNSS signálu	PPP	Detekcia GNSS rušenia	RINEX	Raw data	NMEA	RTCM	IMU senzory	Navigačné správy	Analýza v reálnom čase	Podpora duálnej frekvencie	Podpora SBAS	Vizualizácia polohy na	Stav GNSS	Chyba polohy	Skyplot
GNSS Logger		✓				✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
rinex ON		✓				✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓			✓	
Geo++ Rinex Logger		✓				✓						✓	✓			✓			
GNSS Data Recorder		✓		✓		✓	✓	✓				✓			✓	✓		✓	
to RINEX		✓				✓	✓				✓					✓			
GeolocPVT	✓	✓		✓	✓	✓	✓			✓		✓	✓		✓	✓			✓
G-Nut Client		✓				✓						✓	✓		✓	✓			
GNSS Compare		✓					✓	✓				✓	✓		✓	✓	✓		✓
GNSS/IMU Logger		✓		✓		✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	
G-Ritz Logger	✓	✓	✓			✓		✓		✓		✓				✓		✓	
GPSTest		✓	✓	✓		✓	✓	✓			✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	
GPS Status				✓								✓			✓	✓	✓	✓	
GNSS Check			✓										✓						
PPP Wizlite					✓								✓	✓	✓	✓			✓
RTCM Converter		✓			✓				✓										
3PGo				✓								✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
GNSS Alarm	✓				✓							✓	✓		✓	✓			



3. Metodika

Cieľom praktickej časti tejto práce je vykonanie štúdie uskutočniteľnosti merania kvality GNSS signálu za pomoci low-cost zariadení. Za týmto účelom bolo navrhnutých niekoľko scenárov v rôznych typoch prostredí pre nahrávanie surových GNSS dát. Na základe porovnania získaných dát a hodnôt dostupných SQM parametrov na výstupe z meracieho zariadenia je následne možné vyvodit' závery pre praktickú využiteľnosť tejto metódy merania kvality GNSS signálu.

Obsahom tejto kapitoly je metodika nahrávania surových GNSS dát so smartfónom, popis scenárov nahrávania dát a proces vyhodnotenia SQM parametrov. Začiatok kapitoly je venovaný opisu použitého meracieho zariadenia a Android aplikácie, pomocou ktorej sú surové GNSS dáta zaznamenávané. Následne sa kapitola venuje popisu prípravy a priebehu jednotlivých scenárov nahrávania dát. V závere kapitoly je popísaný proces vyhodnotenia nameraných dát pomocou Matlab skriptu, ktorý bol vytvorený špecificky pre účely tejto práce.

3.1. Popis meracieho zariadenia

Ako meracie zariadenie bol použitý smartfón značky Xiaomi, model 11T, ktorý bol uvedený na trh v roku 2021. Smartfón disponuje operačným systémom Android 11 a 8-jadrovým procesorom MediaTek MT6893 Dimensity 1200 5G. Operačná pamäť smartfónu je 8 GB a interné úložisko činí 128 GB. Variant tohto smartfónu dovážaný na český trh je schopný prijímať signály z GNSS systémov GPS (L1+L5), Galileo (E1+E5), GLONASS (G1) a BeiDou (B1). V rámci systémov GPS a Galileo je podporovaný príjem signálu na dvoch frekvenciách. Taktiež disponuje funkciou A-GPS, bližšie popísanou v kapitole 2.1 [45].

3.2. Použitá Android aplikácia

K nahrávaniu surových GNSS dát bola použitá aplikácia GNSS Logger, vyvinutá spoločnosťou Google. Cez nastavenia v aplikácii bolo umožnené nahrávanie dát do dvoch formátov súčasne, konkrétne NMEA a GNSS Logger formát. SQM parameter DOP je totiž možné získať iba z formátu NMEA, ktorý v textovom súbore so surovými GNSS dátami zakódovaný nie je. Nahrávanie dát z inerčných sensorov zariadenia bolo vypnuté.

3.3. Nahrávanie dát

Pre nahrávanie dát boli naplánované tri statické scenáre v prostrediach s rôznou očakávanou kvalitou GNSS signálu, ktoré sú uvedené v Tabuľke 3. V rámci Scenáru 1 (Sc1) sú dáta



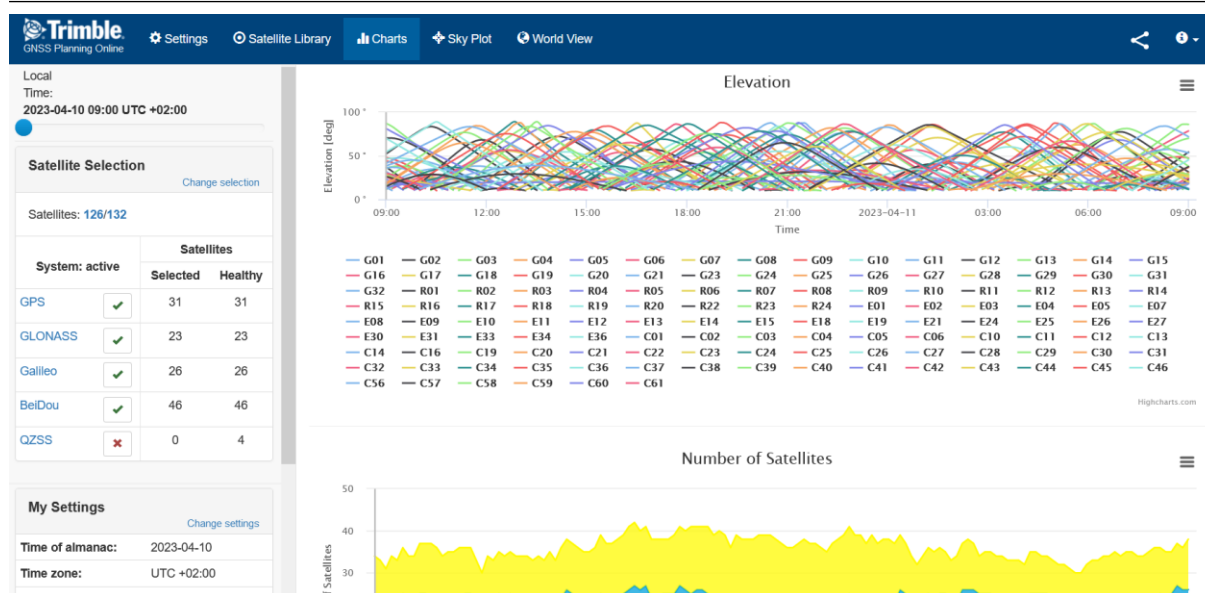
nahrávané v tzv. *clear sky* prostredí, kedy sa v blízkom okolí meracieho zariadenia nenachádzajú žiadne vysoké prekážky, ktoré by príjem signálu akokoľvek obmedzovali. V Scenári 2 (Sc2) sú dáta nahrávané v mestskom prostredí s hustou zástavbou (tzv. *urban canyon*), v ktorom dochádza k odrazu signálu od okolitých budov a k úplnému zatieneniu signálov z niektorých družíc. Sc1 a Sc2 sú ďalej rozdelené na dva prípady: prípad s nízkou a prípad s vysokou predpokladanou hodnotou DOP.

Pojem vysokej hodnoty DOP sa v rámci tejto práce uvažuje v kontexte strednej Európy, kde hodnoty DOP nikdy nedosahujú skutočne vysokých hodnôt. Pre predikciu parametra DOP bol pre potreby Sc1 a Sc2 použitý voľne dostupný internetový nástroj Trimble GNSS Planning, zobrazený na Obrázku 14. Tento nástroj je všeobecne používaný pre plánovanie dostupnosti jednotlivých GNSS satelitov a hodnôt DOP pre účely GNSS meraní [46].

Posledný scenár, Scenár 3 (Sc3), simuluje prostredie s prítomným RFI signálom. Scenár je opäť rozdelený do dvoch prípadov, tentokrát však s rôznym typom GNSS rušenia. V prvom prípade sa jedná o GNSS rušenie typu jamming, v druhom prípade rušenie typu spoofing.

Tabuľka 3: Navrhnuté scenáre pre nahrávanie dát

Označenie scenára	Prostredie	Prípady
Scenár 1 (Sc1)	Clear sky	Nízka hodnota DOP
		Vysoká hodnota DOP
Scenár 2 (Sc2)	Urban canyon	Nízka hodnota DOP
		Vysoká hodnota DOP
Scenár 3 (Sc3)	RFI	Jamming
		Spoofing



Obrázok 14: Trimble GNSS Planning [46]

3.3.1. Príprava

Pred každým nahrávaním dát bolo overené, že software smartfónu, rovnako ako aj samotná aplikácia pre nahrávanie dát, sú aktualizované na najnovšiu dostupnú verziu. Pre zaistenie, aby smartfón v priebehu nahrávania dát určoval svoju polohu výhradne za pomoci GNSS systémov, boli cez nastavenia smartfónu vypnuté funkcie Wi-Fi a Bluetooth a cez nastavenia aplikácie GNSS Logger vypnuté určovanie polohy z IMU a mobilnej siete. V telefóne sa taktiež nenachádzala SIM karta, umožňujúca použitie funkcie A-GPS. V súčasnosti sa tieto technológie v smartfónoch využívajú ako dodatočný zdroj určenia polohy telefónu v interiéri a exteriéri (technológie ako napr. Cell-ID, fingerprinting,...). Ich vypnutie teda zaistí, že zdrojom určenej polohy v získaných dátach bude len GNSS. Cez vývojárske nastavenia smartfónu bola ďalej vypnutá funkcia *duty cycling* (bližšie popísaná v kapitole 2.1), ktorej vypnutím je zaistený plynulý a neprerušovaný záznam dát. Telefón bol v priebehu nahrávania dát v každom scenári uložený na pevnej podložke v horizontálnej polohe, obrazovkou smerom nahor.

3.3.2. Scenár 1

Nahrávanie dát pre Sc1 prebehlo na streche budovy VUZ (Výzkumný Ústav Železniční) v časti Novodvorská, Praha 4. Miesto na streche budovy sa nachádzalo v dostatočnej výške nad ostatnými budovami a prírodným porastom na ulici, čím sa zaistila čo najlepšia viditeľnosť družíc. V Tabuľke 4 sú uvedené dátumy a časy nahrávania dát pre jednotlivé prípady nízkej a vysokej predpokladanej hodnoty DOP (označené Sc1_L a Sc1_H), spolu s predpokladanými rozsahmi hodnôt PDOP a počtom viditeľných satelitov pre daný časový úsek. Za účelom

predídania možných budúcich nejasností sú časy v tabuľke a ďalej v tejto práci uvádzané v UTC (Universal Time Coordinated). Smartfón bol počas nahrávania dát v rámci tohto scenára umiestnený v tesnej blízkosti antény profesionálneho zariadenia COLOSSUS, určeného pre meranie kvality GNSS signálu tak, ako je zobrazené na Obrázku 15. Ako už bolo zmienené v kapitole 1.4.1, získané dáta budú následne navzájom porovnané pre účely porovnania low-cost a profesionálneho zariadenia.

Tabuľka 4: Doba nahrávania dát spolu s predpovedanými hodnotami parametrov pre Sc1

	Dátum a čas	Lokalita	PDOP	NSV
Nízka hodnota DOP (Sc1_L)	6.4.2023 9:00 – 10:00	Novodvorská, Praha 4	1,25 – 1,26	39 – 41
Vysoká hodnota DOP (Sc1_H)	3.4.2023 11:30 – 12:30		1,44 – 1,67	31 - 34



Obrázok 15: Nahrávanie dát pre Sc1

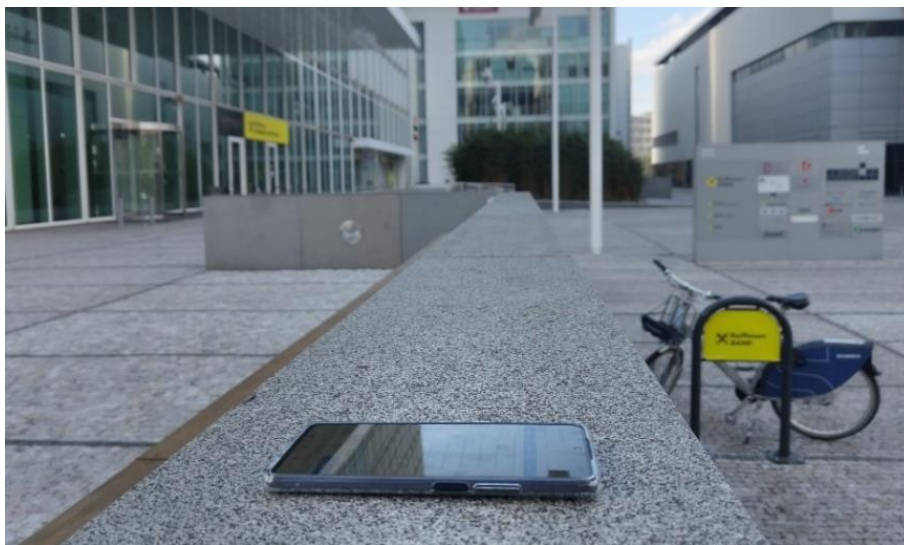
3.3.3. Scenár 2

Pre realizáciu Sc2 bola zvolená mestská časť Pankrác v Prahe 4, konkrétne miesto medzi budovou City Tower a nákupným centrom Arkády Pankrác. Toto miesto z každej strany obkolesujú výškové budovy, ktoré ideálne reprezentujú mestské prostredie s hustou zástavbou. Scenár je rovnako ako Sc1 rozdelený do prípadov nízkej a vysokej predpokladanej hodnoty DOP (označené Sc2_L a Sc2_H). Dátumy a časy realizácie jednotlivých prípadov Sc2 sú uvedené v Tabuľke 5 spolu s predpokladanými rozsahmi hodnôt PDOP a počtom

viditeľných satelitov pre daný časový úsek. Smartfón bol v priebehu nahrávania dát umiestnený na vyvýšenej betónovej ploche tak, ako je zobrazené na Obrázku 16.

Tabuľka 5: Doba nahrávania dát a predpokladané hodnoty parametrov pre Sc2

	Dátum a čas	Lokalita	PDOP	NSV
Nízka hodnota DOP (Sc2_L)	10.4.2023 15:50 – 16:50	Pankrác, Praha 4	1,2 – 1,29	39 – 41
Vysoká hodnota DOP (Sc2_H)	11.4.2023 11:00 – 12:00		1,55 – 1,68	32 – 33



Obrázok 16: Realizácia Sc2

3.3.4. Scenár 3

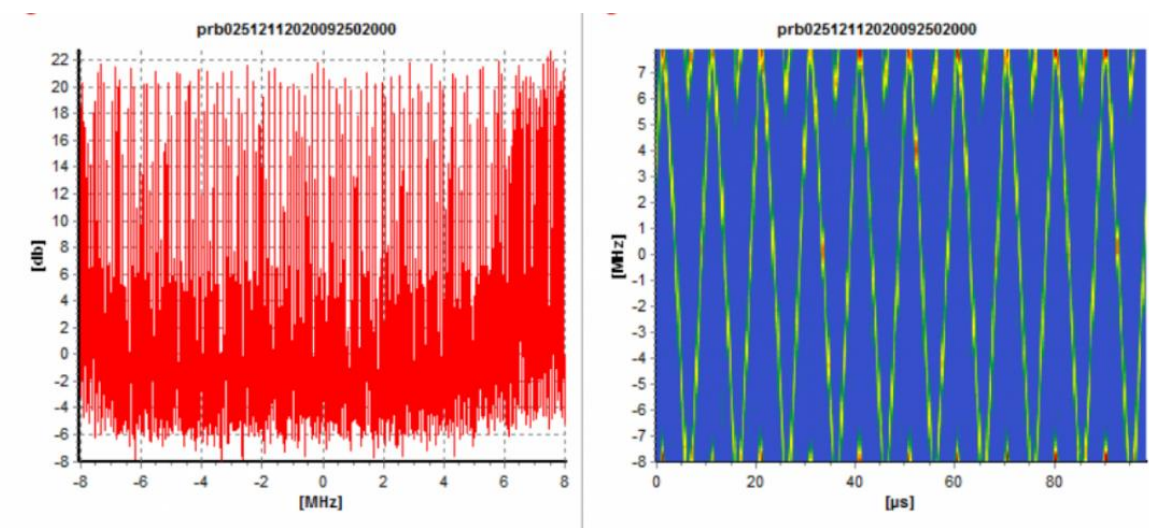
Sc3 je rozdelený do dvoch rôznych prípadov, ktoré simulujú prostredia s rôznym typom GNSS rušenia. V prvom prípade sa jedná o GNSS rušenie typu jamming (Sc3_J), v druhom prípade spoofing (Sc3_S). V Tabuľke 6 sú uvedené dátumy a časy spolu s lokalitou realizácie oboch prípadov tohto scenára.

Tabuľka 6: Doba nahrávania dát pre Sc3

	Dátum a čas	Lokalita
Jamming (Sc3_J)	22.4.2023 10:40 – 11:10	Dívčí hrady, Praha 5
Spoofing (Sc3_S)	15.8.2023 8:37 – 9:20	Horská, Praha 4

3.3.4.1. Scenár 3 – Jamming

K rušeniu GNSS signálu bola použitá rušička TG5CA, ktorá bola zapožičaná v rámci spolupráce s GCE. Táto rušička je schopná súčasne rušiť až 5 pásiem, konkrétne pásma GPS (L1), GSM (900 + 1800 MHz), UMTS (2,1 GHz) a RLAN (2,4 GHz). V rámci Sc3_J bolo rušené len pásmo GPS L1. Anténne konektory sú navyše nezávislé, čím je umožnená kontrola jednotlivých kanálov oddelene [47]. Na Obrázku 17 vľavo sa nachádza tzv. Power Spectral Density (PSD) diagram a vpravo tzv. waterfall diagram, ktoré zobrazujú intenzitu a časový vývoj rušiaceho signálu vysielaného rušičkou TG5CA v pásme frekvenčného spektra. Celkovo má rušička 10 stupňov intenzity rušiaceho signálu, pričom najnižší stupeň odpovedá -13 dBm a najvyšší 36 dBm [48].



Obrázok 17: PSD (vľavo) a waterfall diagram (vpravo) rušičky TG5CA, zdroj: GCE

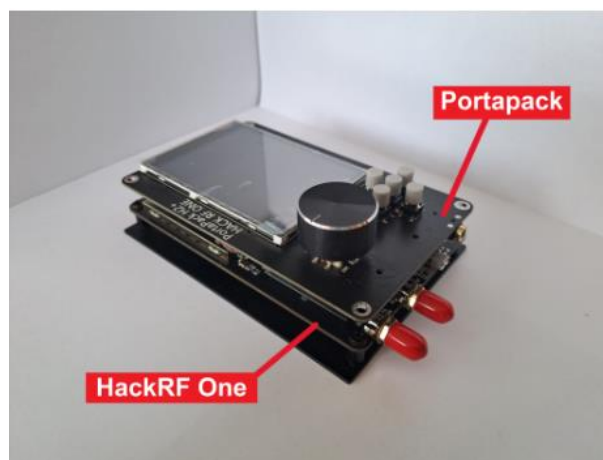
Tabuľka 7 zhŕňa celý priebeh Sc3_J. Rušenie bolo započaté 10 minút po spustení nahrávania dát. Na základe konzultácie s odborníkmi z GCE bolo rušenie spočiatku vykonávané na úrovni intenzity 3, ktorá odpovedá intenzite 14 dBm. Po 5 minútach rušenia na tejto úrovni bola intenzita zvýšená na úroveň 4, odpovedajúca 28 dBm. Na tejto úrovni sa rušilo po dobu ďalších 5 minút, následne bola rušička vypnutá. Nahrávanie dát bolo ukončené 10 minút od vypnutia rušičky. Celkové trvanie tohto scenára činilo 30 minút a smartfón sa počas celej doby nahrávania dát nachádzal vo vzdialenosti približne 10 m od rušičky.

Tabuľka 7: Priebeh scenára Sc3_J

10:40	Spustenie nahrávania dát
10:50	Zapnutie rušičky (úroveň 3)
10:55	Prepnutie rušenia na vyššiu úroveň (úroveň 4)
11:00	Vypnutie rušičky
11:10	Ukončenie nahrávania dát

3.3.4.2. Scenár 3 – Spoofing

V rámci Sc3_S bol testovaný asynchrónny typ spoofingu. K spoofingu bol použitý GNSS simulátor vytvorený v rámci bakalárskej práce, ktorej autorom je Bc. Jan Slezáček. Zostrojený GNSS simulátor funguje za pomoci softwarovo definovaného rádia (SDR, Software Defined Radio) HackRF One s nadstavbou Portapack [49], zobrazeného na Obrázku 18, a open-source kódu „gps-sdr-sim“ [50]. GNSS simulátor je schopný vysielat' na frekvencii GPS L1 a disponuje možnosťou nastaviteľného výkonu [51].



Obrázok 18: SDR HackRF One + Portapack [51]

Pred samotným spustením vysielania spoofingového signálu boli z voľne prístupnej webovej databázy CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System) od agentúry NASA stiahnuté aktuálne efemeridy pre daný deň, ktoré sa následne presunuli do GNSS simulátoru. V simulátore sa ďalej nastavila požadovaná fiktívna poloha, uvedená v súradnom systéme LLA (súradnice zadané v stupňoch zemepisnej šírky a dĺžky, nadmorská výška zadaná v metroch). Zvolenou simulovanou lokalitou bola obec Úvaly, ktorá sa nachádza približne 30 km od Prahy.



Čas v spooferi bol nastavený na 7:30:00 UTC. Následné samotné generovanie falošného GNSS signálu predstavovalo 10 minútový cyklus so vzorkovacou frekvenciou 2,6 MHz.

Pre vysielanie falošného GNSS signálu boli použité dve vysielacie antény:

- Anténa GPS L1 2J0801b tyčová, 1575,42 MHz (ďalej len Anténa 1),
- Anténa GPS L1 2J7C01MC3F plochá, 1575,42 MHz (ďalej len Anténa 2).

Nahrávané boli dva súbory dát, každý pre jednu použitú anténu. Tabuľka 8 zhŕňa celý priebeh Sc2_S. Zapnutie spooferu bolo vykonané vždy 10 minút po spustení nahrávania dát na smartfóne. Spoofovací zariadenie bolo po celú dobu spoofingu zapnuté na najvyššej možnej intenzite. U Antény 1 táto úroveň odpovedá intenzite približne -108,18 dBm, u Antény 2 je to približne -111,2 dBm. Tieto hodnoty boli zmerané v rámci testovania vytvoreného GNSS simulátoru v bezdrazovej komore na spektrálnom analyzátore, pričom simulátor sa od antény spektrálneho analyzátora nachádzal v približne rovnakej vzdialenosti, ako smartfón v rámci tohto scenára (menej než 5 cm) [51].

Po vypnutí spooferu bolo nahrávanie dát ponechané ďalších 10 minút. Po ukončení nahrávania dát došlo na spooferi k výmene antény a bol vykonaný reštart smartfónu, čím sa zaistilo vymazanie medzipamäte (tzv. *cache*) v telefóne, v ktorej si smartfón môže ukladať dáta o predchádzajúcej vypočítanej polohe spolu s prijatými navigačnými správami.

Tabuľka 8: Priebeh Sc3_S

Anténa 1	
8:37:00	Spustenie nahrávania dát
8:44:30	Zapnutie spooferu (maximálna úroveň intenzity)
8:56:00	Vypnutie spooferu
9:00:00	Ukončenie nahrávania dát
	<i>Reštart telefónu</i>
Anténa 2	
9:01:00	Spustenie nahrávania dát
9:05:00	Zapnutie spooferu (maximálna úroveň intenzity)



9:15:00	Vypnutie spooferu
9:20:00	Ukončenie nahrávania dát

3.4. Proces vyhodnotenia dát

Za účelom vyhodnotenia nameraných dát bol vytvorený skript v programovacom prostredí Matlab. Pre účely preskúmania kvality GNSS signálu je dôraz kladený predovšetkým na SQM parametre, ktoré je daný smartfón schopný poskytnúť. Jedná sa o nasledujúce:

- C/No,
- NSV,
- DOP,
- AGC,
- Polohová chyba (ak je dostupná referenčná poloha),
- Multipath Indicator.

Vyhodnotenie je zamerané predovšetkým na priebeh týchto parametrov a ich významné odchýlky v čase, rovnako ako aj priemerné hodnoty pre názornejšie následné porovnanie jednotlivých scenárov. Toto všetko súvisí s následným posúdením vhodnosti využitia smartfónov pre účely monitorovania kvality GNSS signálu.

Po detailnejšom preskúmaní všetkých nameraných dát bolo zistené, že parameter *Multipath Indicator* v dátach zo všetkých scenárov nadobúda hodnoty 0, ktorá značí neznámu prítomnosť alebo absenciu viaccestného šírenia v meraní. Presný mechanizmus za výpočtom tohto parametra v použítom smartfóne nie je známy a výrobca ho nikde nešpecifikuje. Z tohto dôvodu je používanie tohto parametra s cieľom jednoznačnej detekcie viaccestného šírenia v meraní nemožné, a vo finálnej verzii vytvoreného Matlab skriptu tento parameter nie je zahrnutý. Vytvorený Matlab skript, ktorý sa nachádza v Prílohe 1, pozostáva z nižšie uvedených krokov.

Krok 1: Načítanie súborov s nameranými dátami

Ako bolo zmienené v kapitole 3.2, dáta boli pre jednotlivé scenáre nahrávané do dvoch formátov zároveň. Výstupom z každého merania sú teda dva súbory:

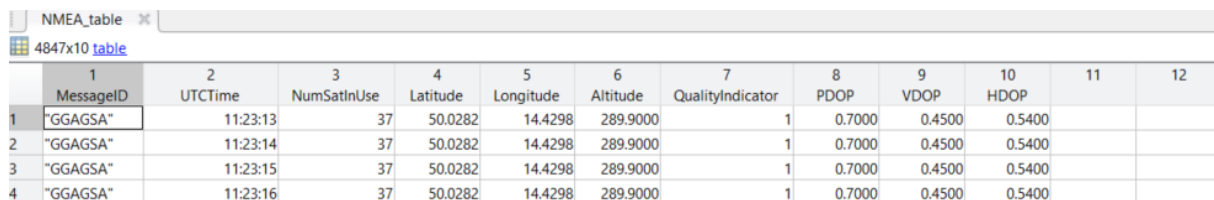


- Textový súbor so surovými GNSS dátami (prípona .txt),
- NMEA súbor (prípona .nmea).

Prvá časť skriptu slúži pre načítanie týchto dvoch súborov do prostredia Matlab, čo je dosiahnuté použitím Matlab funkcie *readlines*, ktorá zo súboru vytvorí textové pole. Takto načítané dáta sú pripravené na následnú úpravu do tabuľkovej podoby.

Krok 2: Spracovanie NMEA súboru

NMEA súbor je v skripte spracovaný ako prvý. Pre separáciu obsiahnutých dát do prehľadnejšej tabuľkovej podoby sú najskôr za pomoci natívnej Matlab funkcie *nmeaParser* vytvorené objekty odpovedajúce GGA a GSA správam. Následne prebehne cyklus, ktorý z týchto správ vyextrahuje všetky parametre nachádzajúce sa v danom type NMEA správy a zapíše ich do tabuľky, pre názornosť zobrazenej na Obrázku 19.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	MessageID	UTCtime	NumSatInUse	Latitude	Longitude	Altitude	QualityIndicator	PDOP	VDOP	HDOP		
1	"GGAGSA"	11:23:13	37	50.0282	14.4298	289.9000		1	0.7000	0.4500	0.5400	
2	"GGAGSA"	11:23:14	37	50.0282	14.4298	289.9000		1	0.7000	0.4500	0.5400	
3	"GGAGSA"	11:23:15	37	50.0282	14.4298	289.9000		1	0.7000	0.4500	0.5400	
4	"GGAGSA"	11:23:16	37	50.0282	14.4298	289.9000		1	0.7000	0.4500	0.5400	

Obrázok 19: Tabuľka z NMEA súboru

Z extrahovaných dát z NMEA správ sa na záver vykreslí priebeh parametrov PDOP, HDOP a VDOP v čase a vypíše sa priemerná hodnota PDOP za celú dobu merania. PDOP v sebe zahŕňa aj horizontálnu aj vertikálnu zložku, preto je vypísaná hodnota len tohto parametra.

Krok 3: Spracovanie textového súboru so surovými GNSS dátami

Textový súbor obsahuje surové GNSS dáta, z ktorých na výstupe dostaneme SQM parametre C/No, NSV, AGC a polohovú chybu (na základe porovnania s referenčnou polohou, ak je k dispozícii). Táto časť skriptu pozostáva z niekoľkých čiastkových krokov, popísaných nižšie.

a) Vyfiltrovanie riadkov označených „#Raw“ a „#Fix“

V prvej časti sa z textového súboru vyfiltrujú riadky označené predponou „#Raw“, obsahujúce surové GNSS dáta a „#Fix“, obsahujúce údaje o polohe, ktorá bola v priebehu nahrávania dát vypočítaná. Výstupom tohto kroku sú dve tabuľky, pre názornosť zobrazené na Obrázkoch 20 a 21.



1	2	3	4	5	6	7	8	9
# Raw	UTCTime	TimeNanos	LeapSecond	TimeUncertaintyNanos	FullBiasNanos	BiasNanos	BiasUncertaintyNanos	DriftNanosPerSecond
"Raw"	06-Apr-2023 09:00:00	7.7325e+11	18	9.4869	-1.3648e+18	0	9.4869	3.1776e+03
"Raw"	06-Apr-2023 09:00:00	7.7325e+11	18	9.4869	-1.3648e+18	0	9.4869	3.1776e+03
"Raw"	06-Apr-2023 09:00:00	7.7325e+11	18	9.4869	-1.3648e+18	0	9.4869	3.1776e+03
"Raw"	06-Apr-2023 09:00:00	7.7325e+11	18	9.4869	-1.3648e+18	0	9.4869	3.1776e+03

Obrázok 20: Tabuľka raw, obsahujúce surové GNSS dáta

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Provider	LatitudeDegrees	LongitudeDegrees	AltitudeMeters	SpeedMps	AccuracyMeters	BearingDegrees	UTCTime	SpeedAccuracyMps
"GPS"	50.0282	14.4298	333.9000	0	1	225.9600	06-Apr-2023 09:00...	0.5000
"GPS"	50.0282	14.4298	333.9000	0	1	225.9600	06-Apr-2023 09:00...	0.4000
"GPS"	50.0282	14.4298	333.9000	0	1	225.9600	06-Apr-2023 09:00...	0.3000
"GPS"	50.0282	14.4298	333.9000	0	1	225.9600	06-Apr-2023 09:00...	0.5000

Obrázok 21: Tabuľka fix, obsahujúca údaje o vypočítanej polohe

b) Vykreslenie vypočítanej polohy a výpočet chyby polohy

Z tabuľky *fix* z predchádzajúceho kroku sú využité dáta so zemepisnou šírkou a dĺžkou k vykresleniu vypočítanej polohy na mapovom podklade za pomoci Matlab funkcie *geoplot*. V prípade, že je do skriptu zadaná referenčná poloha, sú následne vypočítané odchýlky polohy spolu s príslušnými hodnotami strednej kvadratickej chyby (RMSE, Root Mean Square Error).

Odchýlky polohy sa vypočítajú prevodom všetkých zadaných geodetických súradníc (súradnice referenčnej polohy a súradnice z nameraných dát zadané v stupňoch zemepisnej šírky a dĺžky) do súradnicového systému ENU (East, North, Up), ktorý má lokálny počiatok v zadanej referenčnej polohe. K tomuto účelu je použitá Matlab funkcia *geodetic2enu*.

Keďže nulovým bodom lokálneho systému je referenčná poloha, výsledné vektory E, N a Up sú priamo vypočítané odchýlky polohy, uvedené v metroch. Z výsledných vektorov sa ďalej počíta RMSE. RMSE je počítané pre vertikálnu, horizontálnu (2D) a priestorovú rovinu (3D) podľa vzťahov (3) – (8).

1. Priemer pre všetky observácie, ktorej výsledkom je číselná hodnota:

$$\text{Vertikálne RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta U_i^2} \quad (3)$$



$$2D \text{ RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta E_i^2 + \Delta N_i^2)} \quad (4)$$

$$3D \text{ RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta E_i^2 + \Delta N_i^2 + \Delta U_i^2)} \quad (5)$$

2. Pre každú observáciu zvlášť:

$$\text{Vertikálne RMSE} = \sqrt{\Delta U^2} = \text{abs}(\Delta U) \quad (6)$$

$$2D \text{ RMSE} = \frac{\sqrt{\Delta E^2 + \Delta N^2}}{n} \quad (7)$$

$$3D \text{ RMSE} = \frac{\sqrt{\Delta E^2 + \Delta N^2 + \Delta U^2}}{n} \quad (8)$$

Výstupmi tohto kroku sú nasledujúce:

- Vykreslenie vypočítanej polohy na mapovom podklade spolu s referenčnou polohou, ak je k dispozícii
- Graf chýb N, E a Up v čase
- Graf časových priebehov RMSE pre vertikálnu, horizontálnu a priestorovú rovinu
- Číselné hodnoty RMSE pre vertikálnu, horizontálnu a 3D zložku za celú dobu merania

c) Filtrovanie dát z jednotlivých GNSS konštelácií

V nasledujúcom kroku sú dáta rozdelené podľa jednotlivých konštelácií (GPS, GLONASS, Galileo a BeiDou) za pomoci premennej *ConstellationType*, nachádzajúcej sa v surových dátach. Dáta zo systémov GPS a Galileo sú navyše rozdelené do dvoch frekvenčných pásiem, keďže použitý smartfón podporuje príjem GNSS signálu z týchto GNSS systémov aj na druhej frekvencii. Toto je dosiahnuté za pomoci parametra *CodeType*, kde „C“ značí frekvenčné pásmo L1/E1 a „I“ značí pásmo L5/E5 [52]. Na výstupe z tohto kroku je osem tabuliek pre GNSS systémy GPS (*gps*, *gps_L1*, *gps_L5*), Galileo (*galileo*, *galileo_E1*, *galileo_E5*), GLONASS (*glonass*) a BeiDou (*beidou*).



d) Vykreslenie priebehu SQM parametrov v čase a výpočet ich priemerných hodnôt

Vstupom do tohto kroku sú tabuľky vytvorené v predchádzajúcich krokoch. Z tabuliek sa vykreslia nasledujúce grafy, zobrazujúce:

- Priemerné C/No v čase pre jednotlivé GNSS konštelácie pre frekvencie L1/E1/G1/B1 spolu s priebehom celkovej priemernej hodnoty C/No, zahŕňajúcej všetky sledované GNSS systémy a frekvenčné pásma (L1 + L5)
- Priemerné C/No v čase pre jednotlivé GNSS konštelácie pre frekvencie L5/E5
- Stĺpcový graf zobrazujúci priemerné hodnoty C/No sledovaných satelitov jednotlivých GNSS systémov za celú dobu merania daného scenára
- Priebeh počtu sledovaných satelitov jednotlivých GNSS konštelácií na frekvenciách L1/E1/G1/B1 spolu s priebehom celkového priemerného počtu satelitov, zahŕňajúceho všetky sledované GNSS systémy a frekvenčné pásma (L1 + L5)
- Priebeh počtu sledovaných satelitov jednotlivých GNSS konštelácií na frekvenciách L5/E5
- Priebeh hodnoty AGC v čase

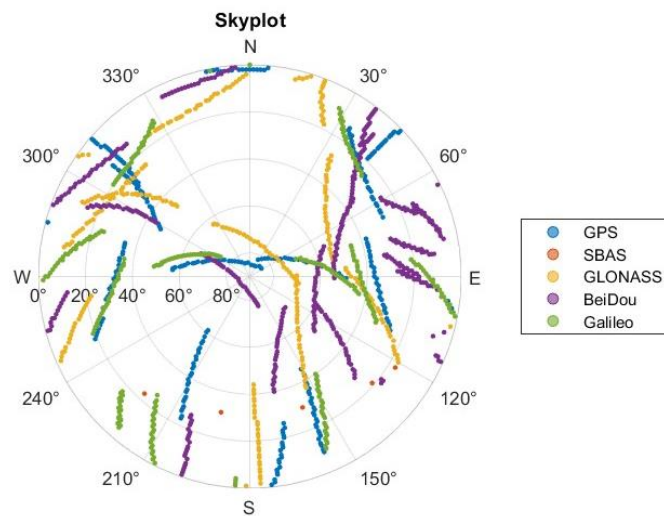
Všetky zmienené grafy v tomto kroku sú súčasťou vyhodnotenia dát v nasledujúcej kapitole. Komplementárne k nim sú počítané celkové priemerné hodnoty daných SQM parametrov za celú dobu merania:

- Priemerná hodnota C/No za celú dobu merania daného scenára, zahŕňajúca všetky sledované GNSS systémy a frekvenčné pásma (L1 + L5)
- Priemerné hodnoty C/No za celú dobu merania daného scenára pre jednotlivé sledované GNSS konštelácie a frekvenčné pásma
- Priemerný počet sledovaných satelitov za celú dobu merania daného scenára, zahŕňajúci všetky sledované GNSS systémy a frekvenčné pásma (L1 + L5)
- Priemerný počet sledovaných satelitov za celú dobu merania daného scenára pre jednotlivé sledované GNSS konštelácie a frekvenčné pásma
- Priemerná hodnota AGC za celú dobu merania daného scenára

e) Vykreslenie grafu *skyplot* pre dané meranie

Pre doplnenie SQM parametrov skript v závere umožňuje vykreslenie grafu *skyplot*, zobrazujúceho rozstavenie všetkých viditeľných satelitov na oblohe počas celej doby merania.

Pre názornosť je tento graf zobrazený na Obrázku 22. Dáta o elevácii a azimute satelitov sú vyfiltrované z pôvodného nahraného textového súboru, konkrétne z riadkov označených „#Status“.



Obrázok 22: Názorná ukážka grafu skyplot



4. Výsledky

Obsahom tejto kapitoly sú výsledky vyhodnotenia SQM parametrov z dát nameraných v jednotlivých scenároch. Výsledky sú členené do podkapitol podľa jednotlivých scenárov. V rámci Sc1 a Sc2 sú výsledky ďalej rozčlenené podľa jednotlivých prípadov nízkej a vysokej predpokladanej hodnoty DOP. U Sc3 sa výsledky členia podľa typov GNSS rušenia (jamming a spoofing).

4.1. Scenár 1

Kedže sú v rámci tohto scenára dostupné súradnice presnej referenčnej polohy (presne zameraná poloha antény zariadenia COLOSSUS), sú pre tento scenár počítané odchýlky polohy. V závere sú taktiež prezentované výsledky zo samotného zariadenia COLOSSUS, z ktorého dáta boli poskytnuté pre potreby tejto práce v rámci spolupráce s GCE. Súčasťou vyhodnotenia Sc1 je v závere taktiež porovnanie výsledných priemerných hodnôt SQM parametrov z COLOSSUS a smartfónu.

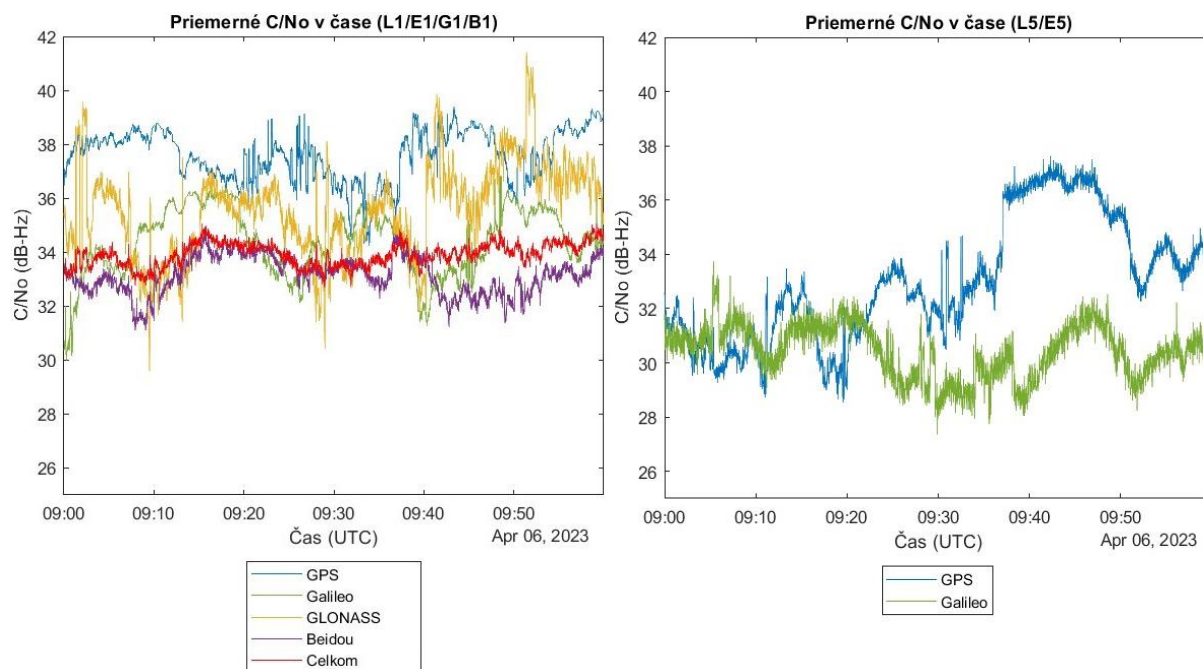
Po vyhodnotení Sc1_L a Sc1_H bolo zistené, že SQM parameter AGC zostal v priebehu obidvoch prípadov nemenný a jeho hodnota sa udržiavala na konštantných **6 dB**. Z tohto dôvodu tomuto SQM parametru v rámci Sc1 nie sú ďalej venované samostatné podkapitoly.

4.1.1. Nízka predpokladaná hodnota DOP

4.1.1.1. Výsledky zo smartfónu

C/No

Na Obrázku 23 sú zobrazené časové priebehy priemerných hodnôt parametra C/No pre všetky satelity daného GNSS systému s frekvenciou 1 Hz. Obrázok 23 vľavo zobrazuje priebehy týchto hodnôt vo frekvenčnom pásme L1, vpravo sú zobrazené hodnoty pre prijímané signály z pásma L5. Celková priemerná hodnota C/No zahŕňajúca všetky GNSS systémy a frekvencie bola **33,95 dB-Hz**. Časový priebeh celkovej priemernej hodnoty C/No zahŕňajúci všetky GNSS systémy a frekvencie je vyznačený na Obrázku 23 vľavo červenou farbou.

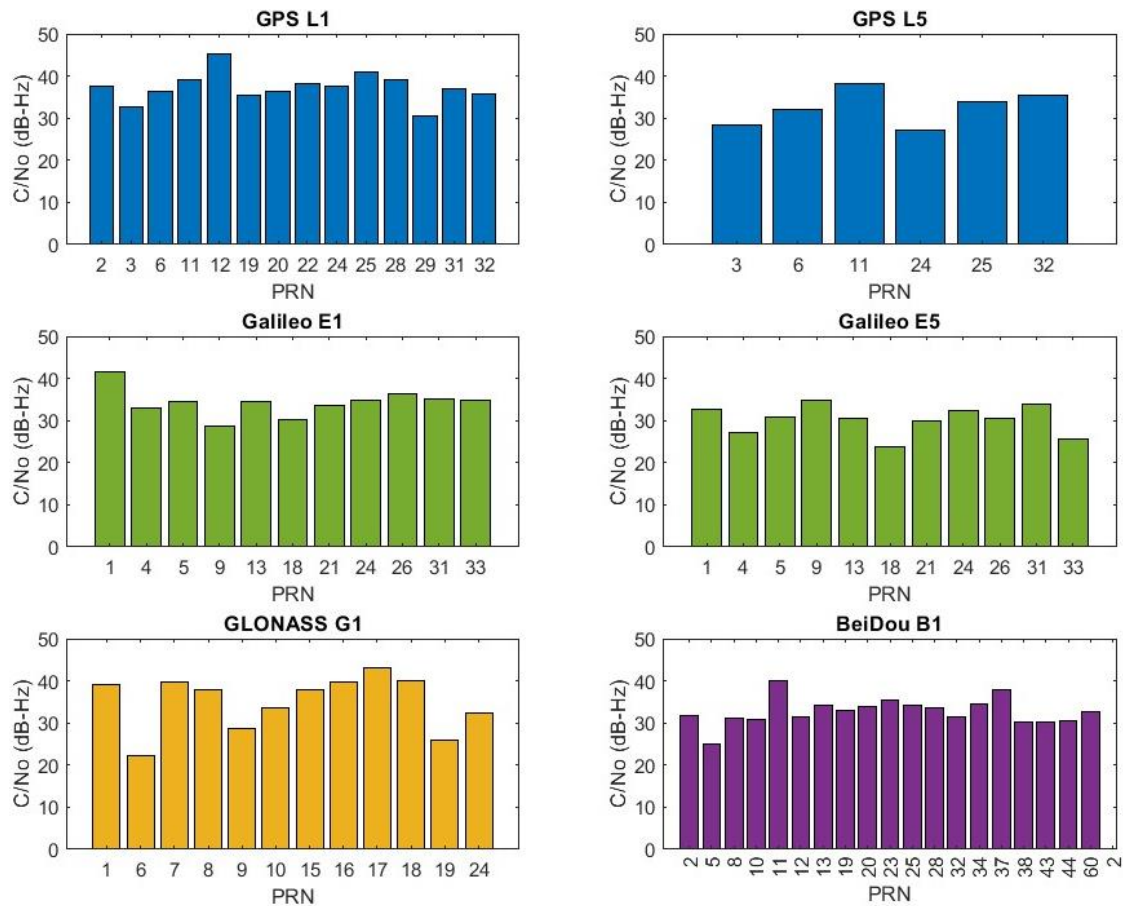


Obrázok 23: Priemerné hodnoty C/No pre Sc1_L v čase

Tabuľka 9 obsahuje číselné vyjadrenie priemerných hodnôt C/No jednotlivých GNSS systémov za celé obdobie Sc1, z ktorých najvyššiu priemernú hodnotu C/No na oboch frekvenciách dosiahol systém GPS. Obrázok 24 zobrazuje priemerné hodnoty C/No za celú dobu merania pre jednotlivé satelity daných GNSS systémov, ktoré sú v grafoch označené podľa ich PRN čísla.

Tabuľka 9: Priemerné hodnoty C/No pre jednotlivé GNSS konštelácie pre Sc1_L, uvedené v dB-Hz

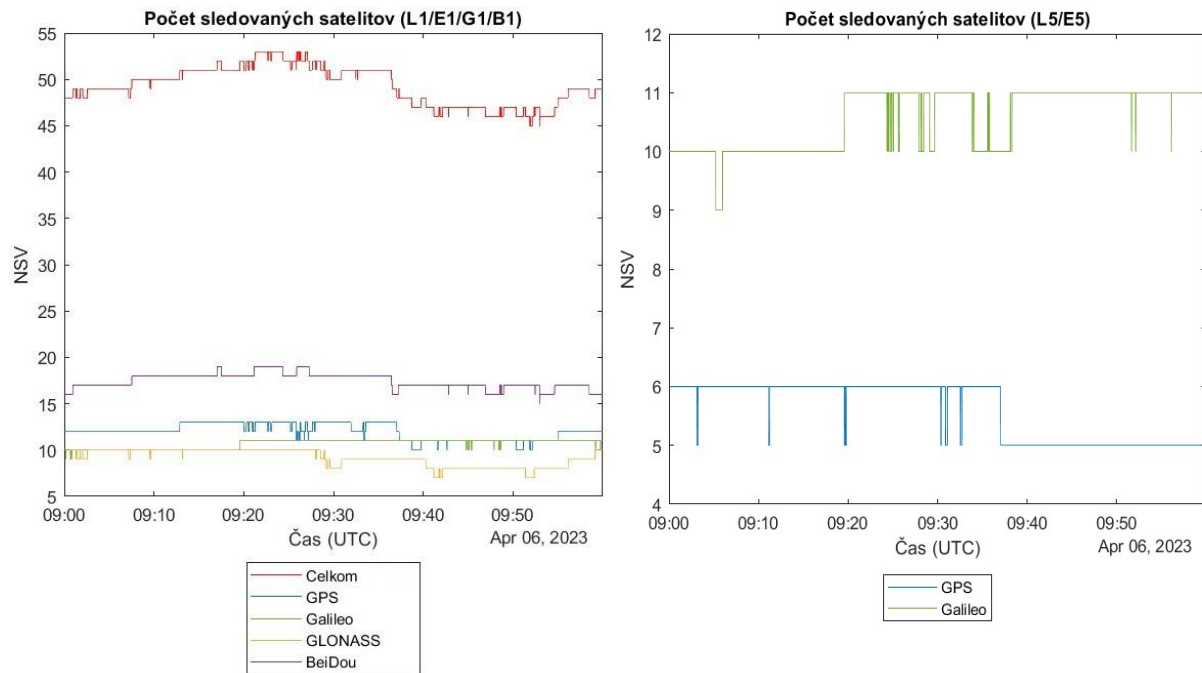
	GPS	Galileo	GLONASS	BeiDou
L1	37,58	34,37	32,49	33,28
L5	32,83	30,42	-	-



Obrázok 24: Priemerné hodnoty C/No jednotlivých družíc pre Sc1_L

NSV

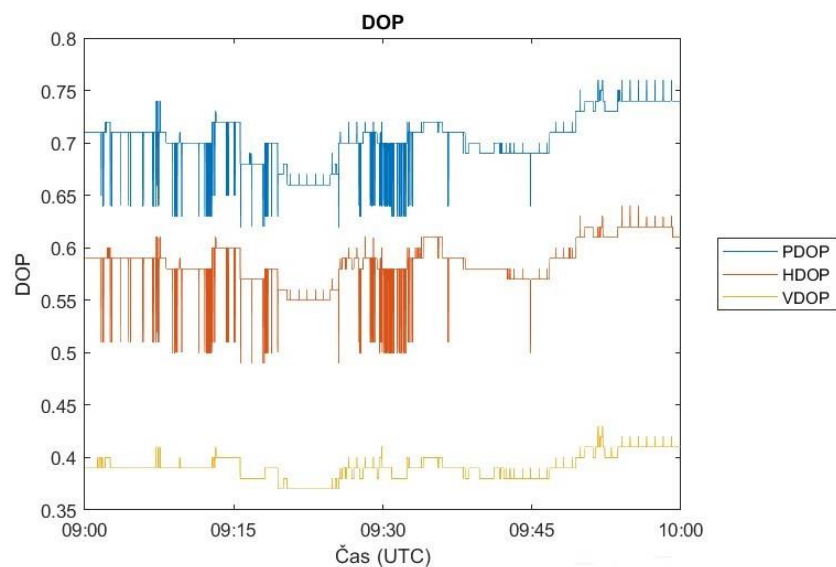
Priebeh počtu sledovaných satelitov v čase je zobrazený na Obrázku 25, kde naľavo sú zobrazené časové priebehy pre frekvenčné pásmo L1, napravo pre pásmo L5. Priebeh vyznačený červenou farbou na obrázku vľavo znázorňuje celkový počet sledovaných satelitov (všetky frekvencie a všetky GNSS systémy) v čase. V priemere smartfón po dobu nahrávania dát v Sc1_L sledoval **49,31 satelitov**. Vo frekvenčnom pásme L5 smartfón po dobu nahrávania dát sledoval v priemere 5,6 satelitov systému GPS a 10,6 satelitov systému Galileo.



Obrázok 25: NSV pre Sc1_L v čase

DOP

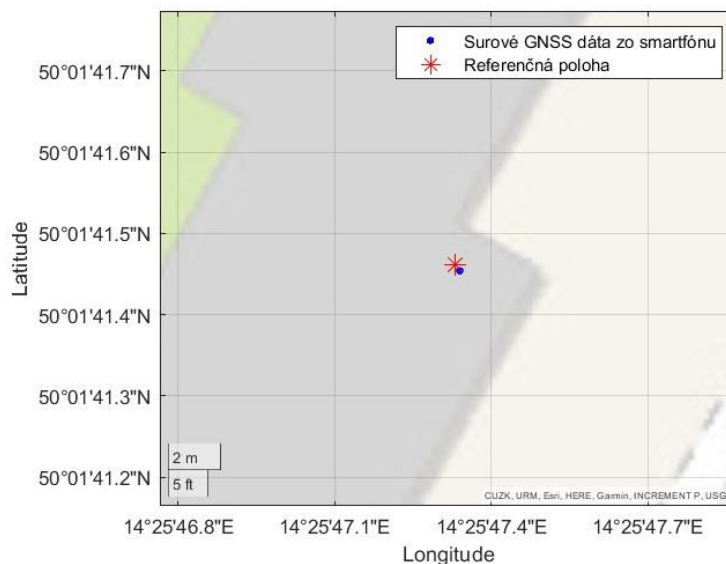
Priebehy PDOP, HDOP a VDOP v čase sú zobrazené na Obrázku 26. Priemerná hodnota PDOP za celú dobu merania je **0,70**, čo je o 0,55 menej než predpokladaná najnižšia hodnota tohto parametra, ktorá bola podľa nástroja Trimble GNSS Planning v dobe merania 1,25.



Obrázok 26: DOP pre Sc1_L v čase

Vypočítaná poloha a jej odchýlky

Na Obrázku 27 je vykreslená vypočítaná poloha z nameraných surových GNSS dát zo smartfónu spolu s referenčnou polohou (anténa zariadenia COLOSSUS). Číselné hodnoty výsledných vektorov N, E, Up a vypočítané chyby jednotlivých zložiek RMSE sa nachádzajú v Tabuľke 10. Všetky tieto hodnoty boli po celú dobu nahrávania dát pre Sc1_L konštantné, preto ich priebehy v čase nie sú zahrnuté.



Obrázok 27: Vykreslenie vypočítanej a referenčnej polohy pre Sc1_L

Tabuľka 10: Odchýlky polohy pre Sc1_L

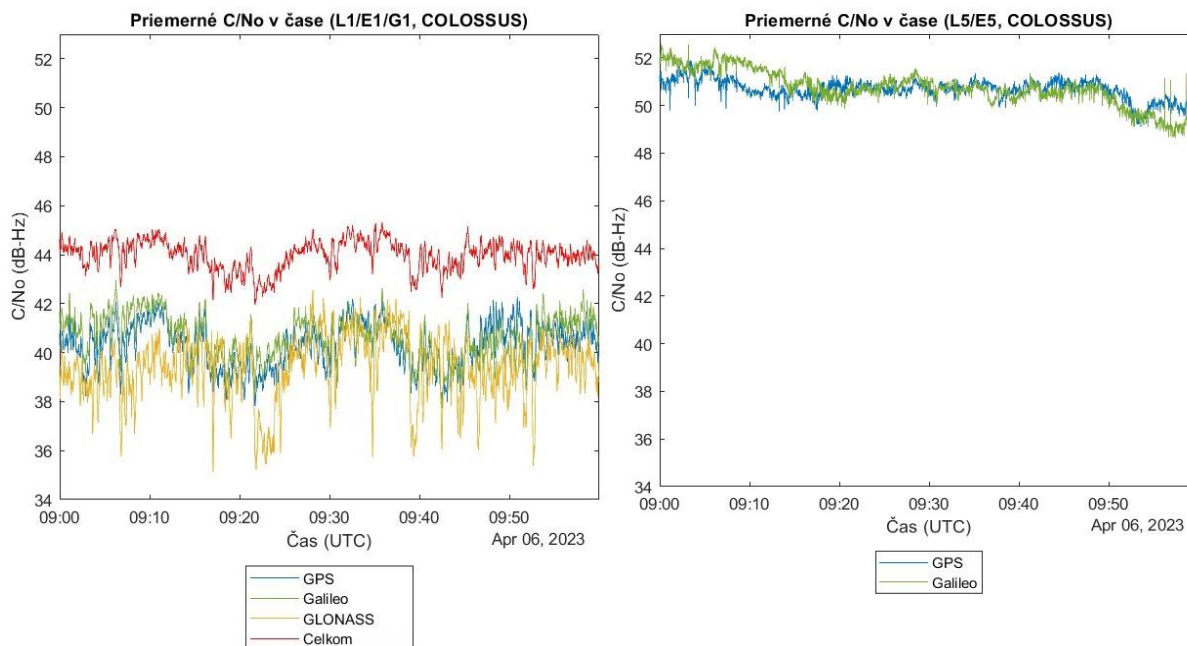
N	E	Up	3D RMSE	2D RMSE	Vertical RMSE
-0,2128 m	0,1775 m	2,9650 m	2,9779 m	0,2771 m	2,9650 m

4.1.1.2. Výsledky zo zariadenia COLOSSUS

C/No

Dáta zo zariadenia COLOSSUS boli poskytnuté vo formáte RINEX, z ktorého bolo možné získať parametre C/No a NSV pre GNSS systémy GPS, Galileo a GLONASS. Z dôvodu veľkého zašumenia dát v rámci parametra C/No vo frekvenčnom pásme L1 v obidvoch prípadoch (u Sc1_L aj Sc1_H) bola pre vyhladenie dát použitá metóda kĺzavého priemeru (*moving average*). Táto metóda spočíva v počítaní priemeru v rámci pevne stanoveného „okna“ o šírke k , reprezentujúceho počet za sebou idúcich hodnôt. Šírka okna bola v tomto konkrétnom prípade nastavená na hodnotu 12, ktorá sa experimentálne ukázala byť najmenšou hodnotou pre získanie prehľadnej grafickej reprezentácie výsledku.

Na Obrázku 28 sú zobrazené priebehy priemerných hodnôt C/No GNSS systémov a frekvencií, ktoré sú spoločné pre COLOSSUS a smartfón. Celková priemerná hodnota C/No naprieč všetkými GNSS systémami a frekvenciami bola pre Sc1_L **43,98 dB-Hz** (priebeh vyznačený červenou farbou na Obrázku 28 vľavo). Tabuľka 11 obsahuje číselné vyjadrenie priemerných hodnôt C/No jednotlivých GNSS systémov za celé obdobie nahrávania dát scenára Sc1_L.



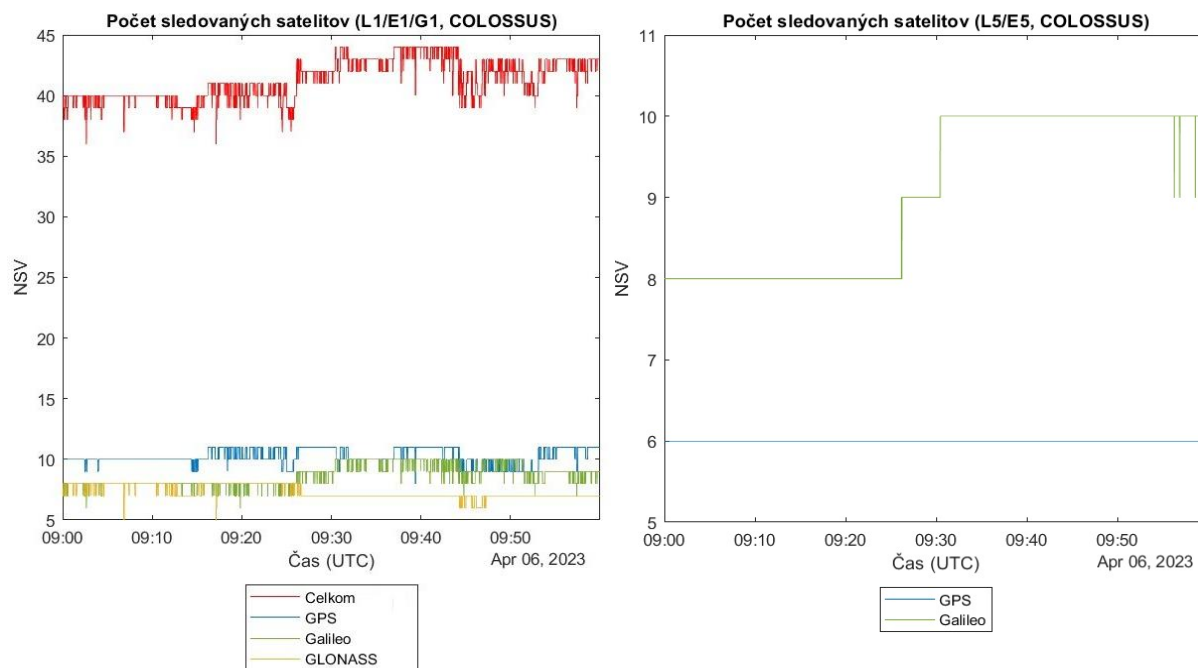
Obrázok 28: Priemerné hodnoty C/No v čase pre Sc1_L pre zariadenie COLOSSUS

Tabuľka 11: Priemerné hodnoty C/No pre jednotlivé GNSS konštelácie pre Sc1_L pre zariadenie COLOSSUS, uvedené v dB-Hz

	GPS	Galileo	GLONASS
L1	40,27	40,46	39,34
L5	50,67	50,67	-

NSV

Počet satelitov, ktoré zariadenie COLOSSUS sledovalo počas nahrávania dát v rámci Sc1_L je zobrazený na Obrázku 29, kde vľavo sú zobrazené počty pre pásmo L1 spolu s priebehom celkového počtu sledovaných satelitov pre všetky GNSS systémy a frekvenčné pásma (čiara vyznačená červenou farbou), vpravo je zobrazený počet sledovaných satelitov pre pásmo L5. Po dobu merania toto zariadenie priemerne sledovalo **41,32 satelitov**.



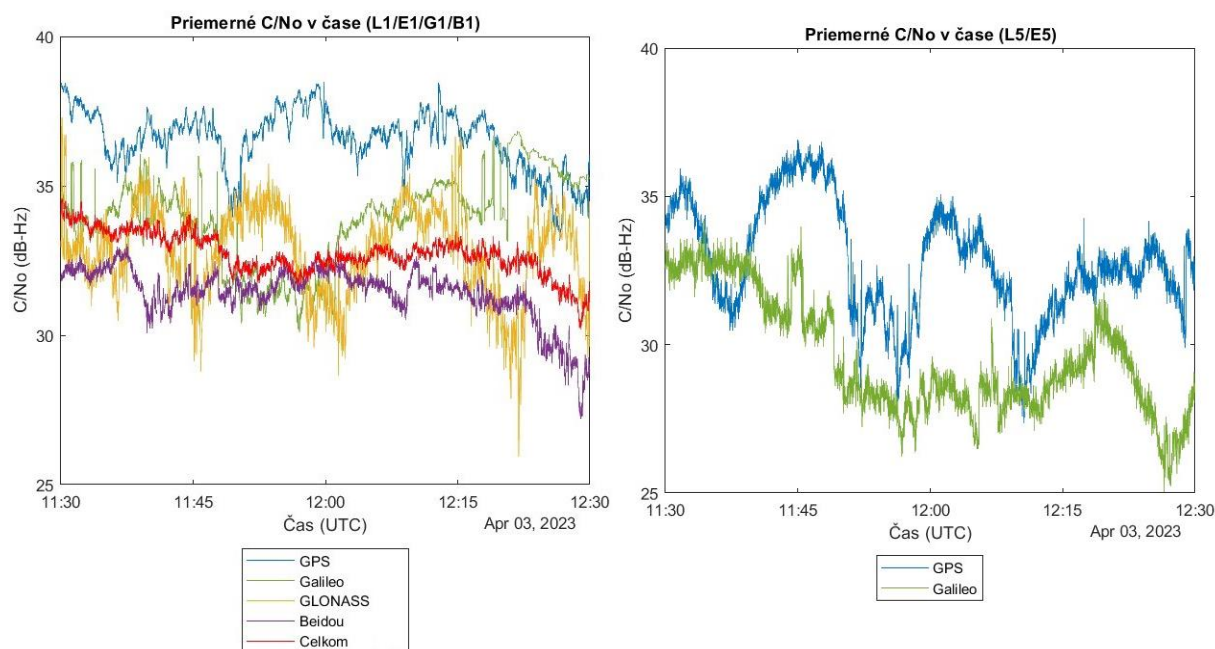
Obrázok 29: NSV v čase pre Sc1_L pre zariadenie COLOSSUS

4.1.2. Vysoká predpokladaná hodnota DOP

4.1.2.1. Výsledky zo smartfónu

C/No

Časové priebehy priemerných hodnôt C/No satelitov jednotlivých GNSS systémov v danej sekunde pre prípad Sc1_H sú zobrazené na Obrázku 30. Vľavo sú zobrazené priebehy pre frekvenčné pásmo L1 spolu s priebehom celkovej priemernej hodnoty C/No zahŕňajúcej obidve prijímané frekvencie, vpravo sú zobrazené priebehy pre pásmo L5. Celková priemerná hodnota C/No v rámci všetkých GNSS systémov a frekvencií bola za celú dobu merania **32,79 dB-Hz**.

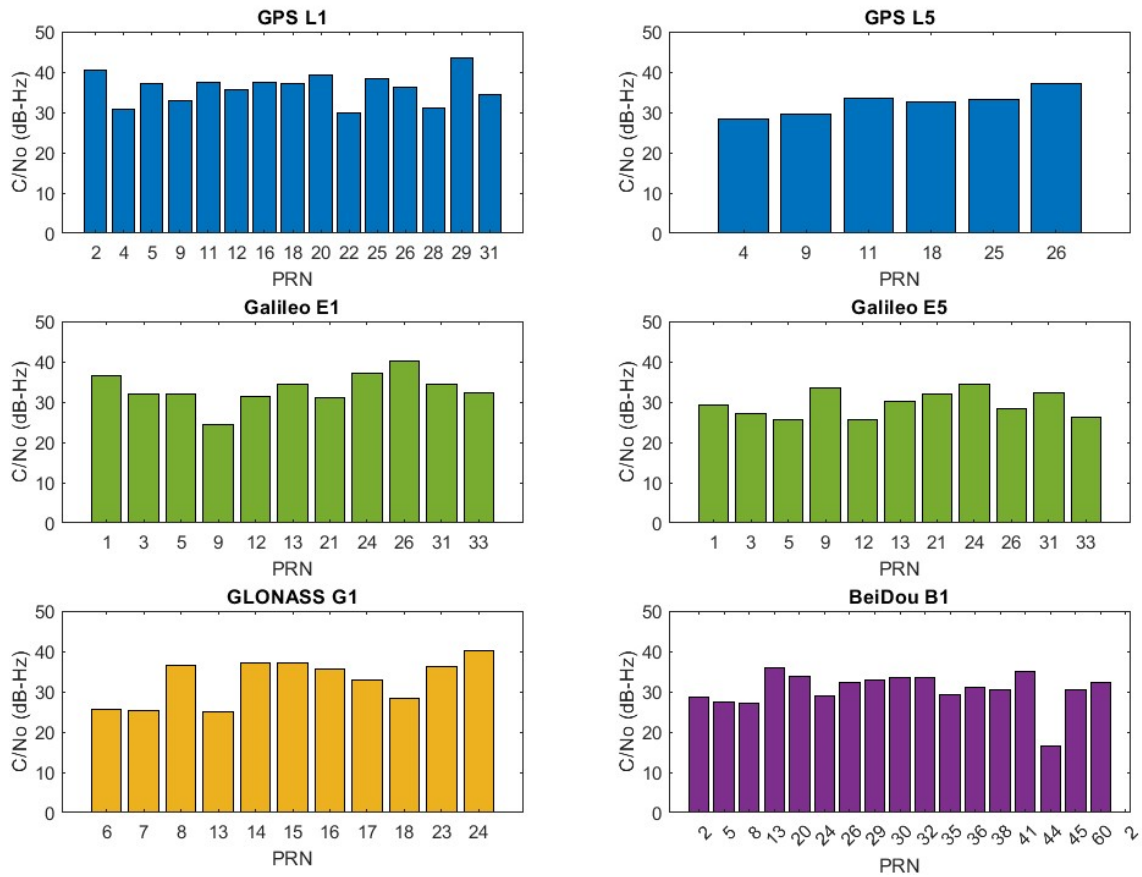


Obrázok 30: Priemerné hodnoty C/No pre Sc1_H v čase

Tabuľka 12 uvádza číselné vyjadrenia priemerných hodnôt daných GNSS systémov počas celej doby nahrávania dát. Rovnako ako v prípade Sc1_L vykazuje najvyššie hodnoty systém GPS. Priemerné hodnoty C/No jednotlivých satelitov daných GNSS systémov za celú dobu merania sú zobrazené na Obrázku 31.

Tabuľka 12: Priemerné hodnoty C/No pre jednotlivé GNSS konštelácie pre Sc1_H, uvedené v dB-Hz

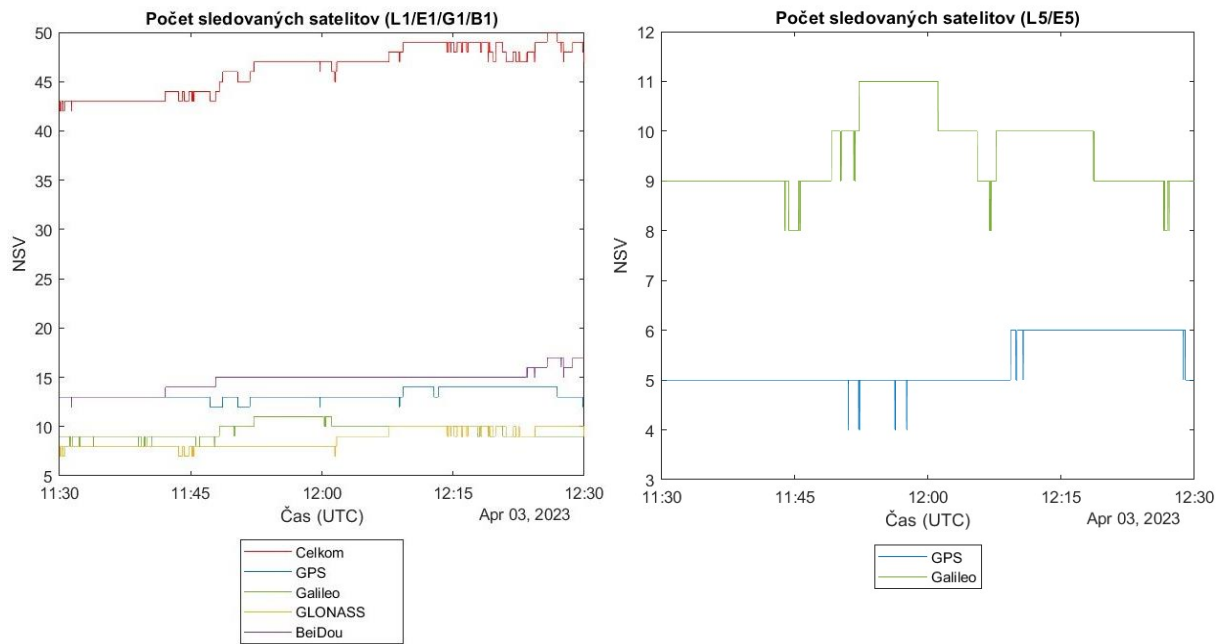
	GPS	Galileo	GLONASS	BeiDou
L1	36,55	33,81	33,54	31,32
L5	32,71	29,46	-	-



Obrázok 31: Priemerné hodnoty C/No jednotlivých družíc pre Sc1_H

NSV

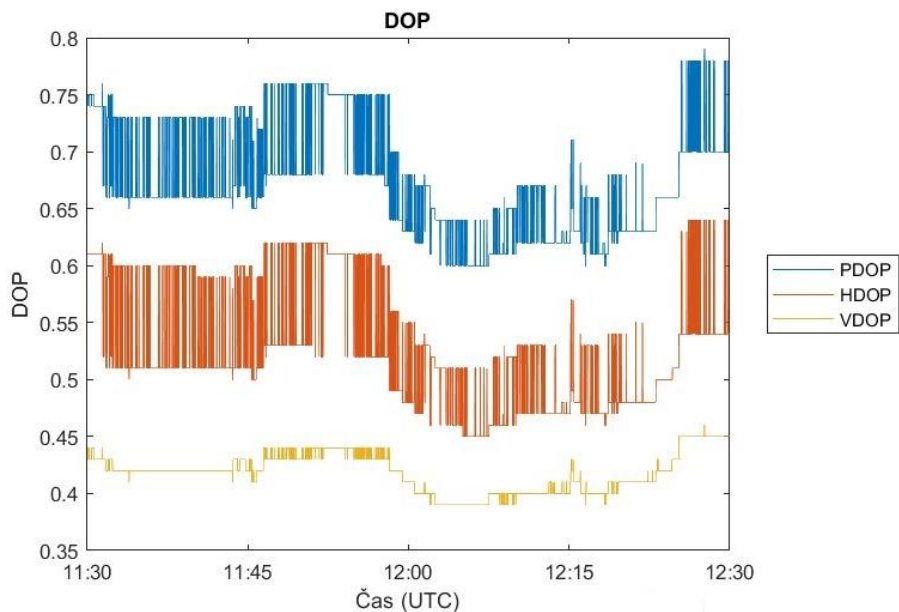
Obrázok 32 zobrazuje priebehy počtu sledovaných satelitov v čase pre jednotlivé GNSS systémy a frekvencie. V rámci Sc1_H smartfón počas celej doby nahrávania dát sledoval priemerne **46,33 satelitov**. Vo frekvenčnom pásme L5 smartfón sledoval priemerne 5,3 satelitov systému GPS a 9,57 satelitov systému Galileo.



Obrázok 32: NSV pre Sc1_H v čase

DOP

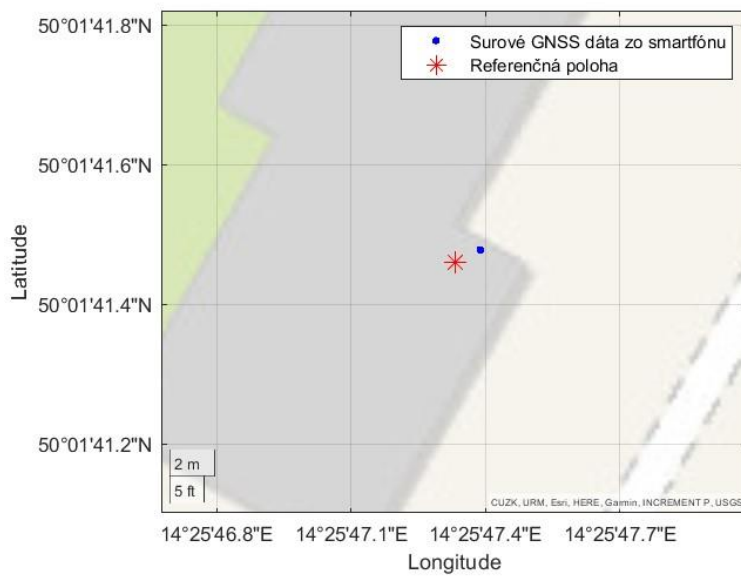
Na Obrázku 33 sú zobrazené časové priebehy parametrov PDOP, HDOP a VDOP. Priemerná hodnota PDOP za celú dobu merania bola v prípade Sc1_H **0,67**, čo je o 0,88 menej ako najmenšia predpokladaná hodnota tohto parametra, ktorá bola 1,55.



Obrázok 33: DOP pre Sc1_H v čase

Vypočítaná poloha a jej odchýlky

Obrázok 34 zobrazuje vykreslenie vypočítanej polohy z nameraných surových GNSS dát spolu s referenčnou polohou antény zariadenia COLOSSUS. Číselné hodnoty výsledných vektorov N, E a Up spolu s vypočítanými chybami RMSE sa nachádzajú v Tabuľke 13. Rovnako ako v prípade Sc1_L boli všetky tieto hodnoty po celú dobu nahrávania dát konštantné, preto ich priebehy v čase nie sú zahrnuté ani v tomto prípade.



Obrázok 34: Vypočítaná poloha z nameraných surových dát pre Sc1_H

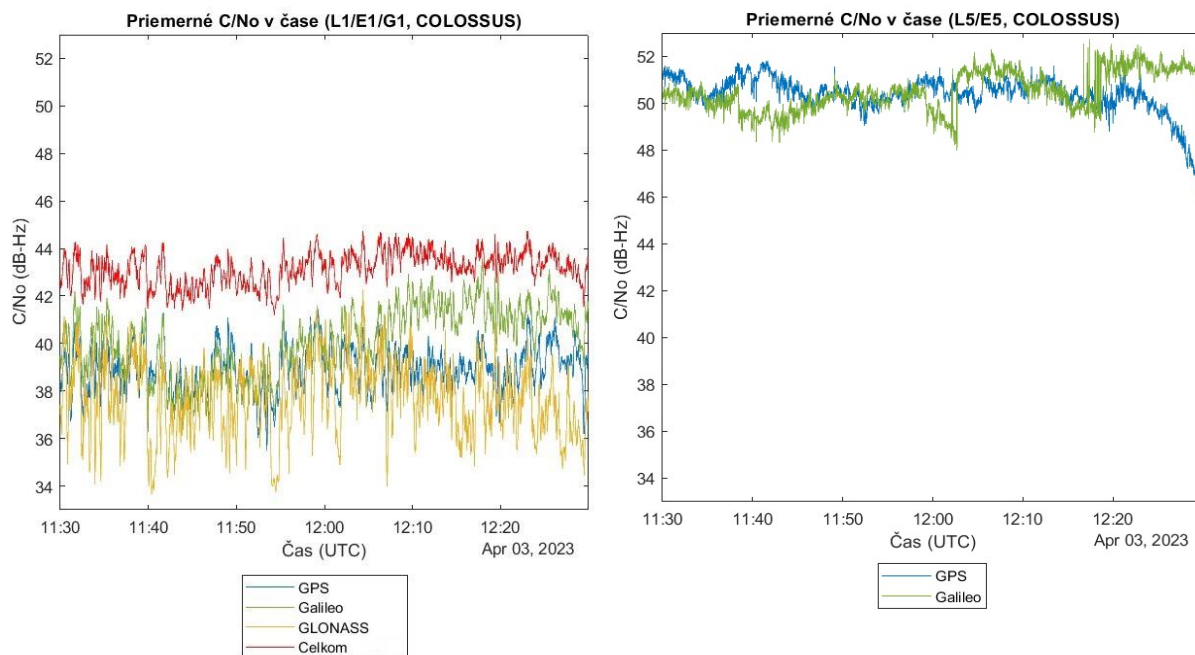
Tabuľka 13: Odchýlky polohy pre Sc1_H

N	E	Up	3D RMSE	2D RMSE	Vertical RMSE
0,5287 m	1,1329 m	4,4650 m	4,6367 m	1,2502 m	4,4650 m

4.1.2.2. Výsledky zo zariadenia COLOSSUS

C/No

Rovnako ako u Sc1_L boli dáta aj v tomto prípade z dôvodu veľkého zašumenia na frekvencii L1 vyhladené pomocou metódy kĺzavého priemeru na 12 hodnotách. Obrázok 35 zobrazuje časový priebeh priemerných hodnôt C/No tých GNSS systémov a frekvencií, ktoré má zariadenie COLOSSUS a smartfón spoločné. V prípade Sc1_H bola priemerná hodnota C/No naprieč všetkými zobrazenými GNSS systémami a frekvenciami u zariadenia COLOSSUS **43,15 dB-Hz**. Tabuľka 14 ďalej obsahuje číselné vyjadrenia priemerných hodnôt C/No jednotlivých GNSS systémov za celé obdobie nahrávania dát. Najvyššie priemerné hodnoty C/No dosahoval na obidvoch frekvenciách systém Galileo.



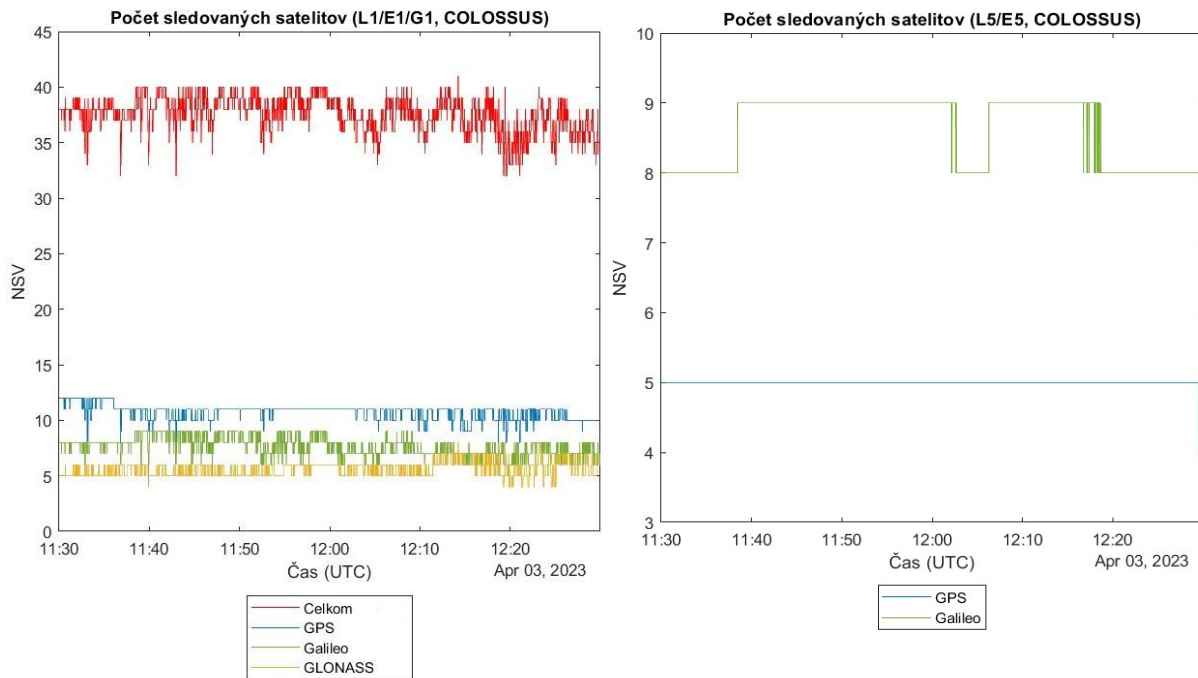
Obrázok 35: Priemerné hodnoty C/No v čase pre Sc1_H pre zariadenie COLOSSUS

Tabuľka 14: Priemerné hodnoty C/No pre jednotlivé GNSS konštelácie pre Sc1_H pre zariadenie COLOSSUS, uvedené v dB-Hz

	GPS	Galileo	GLONASS
L1	38,94	40,07	37,70
L5	50,38	50,48	-

NSV

Na Obrázku 36 je zobrazený priebeh počtu satelitov, ktoré zariadenie COLOSSUS sledovalo v priebehu Sc1_H. Počas celej doby zariadenie COLOSSUS sledovalo celkovo priemerne **37,59 satelitov**.



Obrázok 36: NSV v čase pre Sc1_H pre zariadenie COLOSSUS

4.1.3. Porovnanie smartfónu s profesionálnym zariadením

Tabuľky 15 a 16 obsahujú porovnanie priemerných hodnôt SQM parametrov C/No a NSV na výstupe zo smartfónu a zo zariadenia COLOSSUS pre jednotlivé prípady Sc1. Zariadenie COLOSSUS dosahuje na všetkých frekvenciách v oboch prípadoch vyššie výsledné priemerné hodnoty C/No v porovnaní so smartfónom. Z uvedených hodnôt je najviac zreteľný významný rozdiel medzi priemernými hodnotami C/No na frekvencii L5 u systémov GPS a Galileo, ktoré sa vzájomne líšia až 20 dB-Hz. Čo sa týka počtu sledovaných satelitov, s výnimkou frekvencie GPS L5 u Sc1_L sledoval smartfón v priemere viac družíc v oboch scenároch. Celková priemerná hodnota počtu sledovaných satelitov bola u smartfónu vyššia z dôvodu prijmu signálu z jedného GNSS systému navyše (BeiDou).

Tabuľka 15: Porovnanie priemerných dosiahnutých hodnôt SQM parametrov low-cost a profesionálneho zariadenia pre Sc1_L

		Xiaomi 11T	COLOSSUS
C/No [dB-Hz]	GPS L1	37,58	40,27
	GPS L5	32,83	50,67
	Galileo E1	34,37	40,64
	Galileo E5	30,42	50,67



	GLONASS	32,49	39,34
	Celkom	33,95	43,98
NSV	GPS L1	12,00	10,22
	GPS L5	5,61	6,00
	Galileo E1	10,66	8,73
	Galileo E5	10,57	9,06
	GLONASS	9,15	7,32
	Celkom	49,31	41,32

Tabuľka 16: Porovnanie priemerných dosiahnutých hodnôt SQM parametrov low-cost a profesionálneho zariadenia pre Sc1_H

		Xiaomi 11T	COLOSSUS
C/No [dB-Hz]	GPS L1	36,55	38,94
	GPS L5	32,71	50,38
	Galileo E1	33,81	40,07
	Galileo E5	29,46	50,48
	GLONASS	33,54	37,70
	Celkom	32,79	43,15
NSV	GPS L1	13,23	10,69
	GPS L5	5,32	5,00
	Galileo E1	9,64	7,73
	Galileo E5	9,57	8,60
	GLONASS	8,75	5,57
	Celkom	46,33	37,59

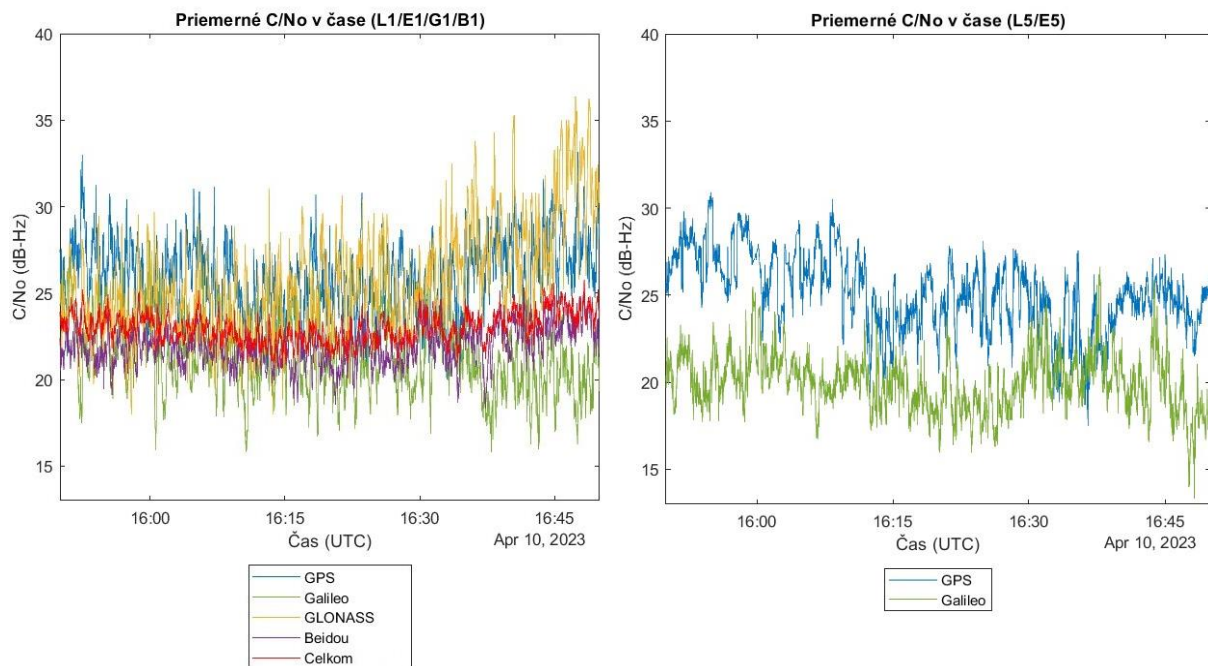
4.2. Scenár 2

U Sc2 neboli dostupné prostriedky pre presné určenie referenčnej polohy, preto vykreslenie polohy a výpočet odchýlok polohy nie sú súčasťou výsledkov Sc2. V tomto scenári bolo chovanie parametra AGC v čase totožné s Sc1. Jeho hodnota sa počas nahrávania dát obidvoch prípadov Sc2 nemenila a zostávala na konštantnej hodnote **6 dB**. Osobitne tomuto SQM parametru teda nie sú ďalej venované samostatné podkapitoly.

4.2.1. Nízka predpokladaná hodnota DOP

C/No

Priebeh priemerných hodnôt C/No pre všetky satelity daných GNSS systémov v čase je zobrazený na Obrázku 37. Obrázok 37 vľavo zobrazuje priebehy hodnôt pre frekvenčné pásmo L1, napravo sú zobrazené hodnoty pre prijímané signály z pásma L5. Celková priemerná hodnota C/No naprieč všetkými GNSS systémami bola **23,13 dB-Hz** (priebeh vyznačený červenou čiarou).

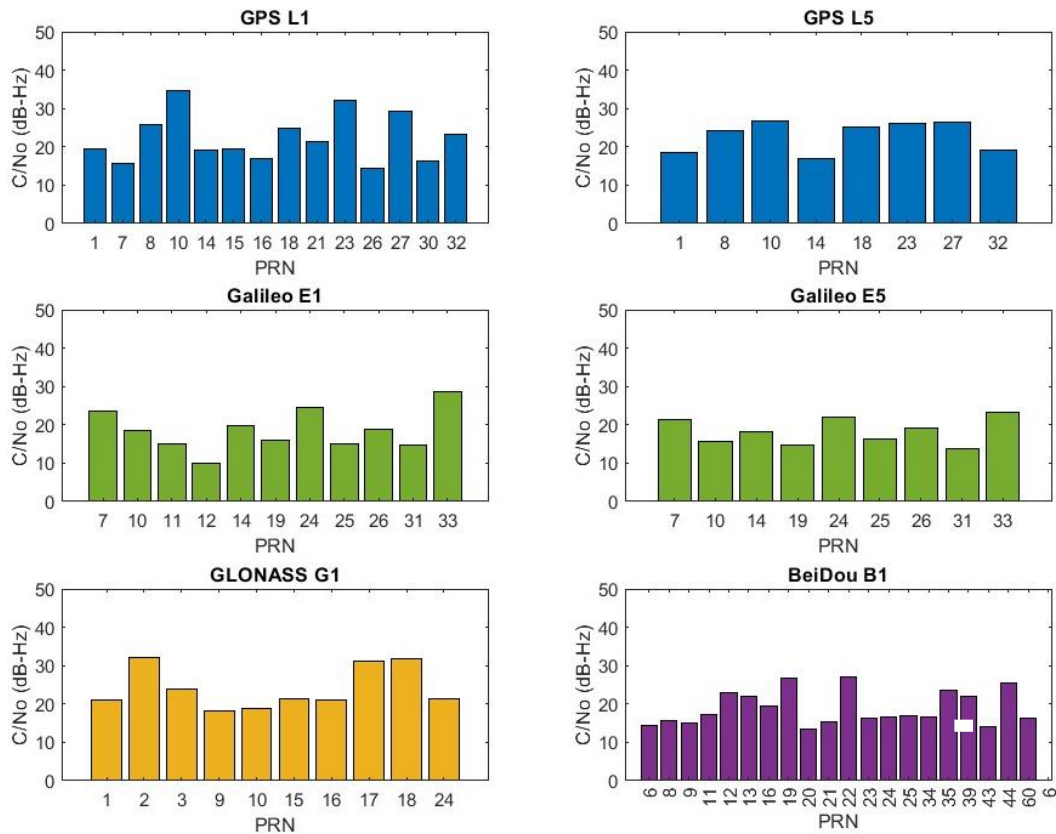


Obrázok 37: Priemerné hodnoty C/No pre Sc2_L v čase

Tabuľka 17 obsahuje číselné vyjadrenie priemerných hodnôt C/No pre jednotlivé GNSS systémy za celú dobu nahrávania dát. Najvyššiu priemernú hodnotu C/No dosiahol na oboch frekvenciách systém GPS. Obrázok 38 ďalej zobrazuje priemerné hodnoty C/No za celú dobu merania pre jednotlivé satelity daných GNSS systémov, označené podľa ich PRN čísla.

Tabuľka 17: Priemerné hodnoty C/No pre jednotlivé GNSS konštelácie pre Sc2_L, uvedené v dB-Hz

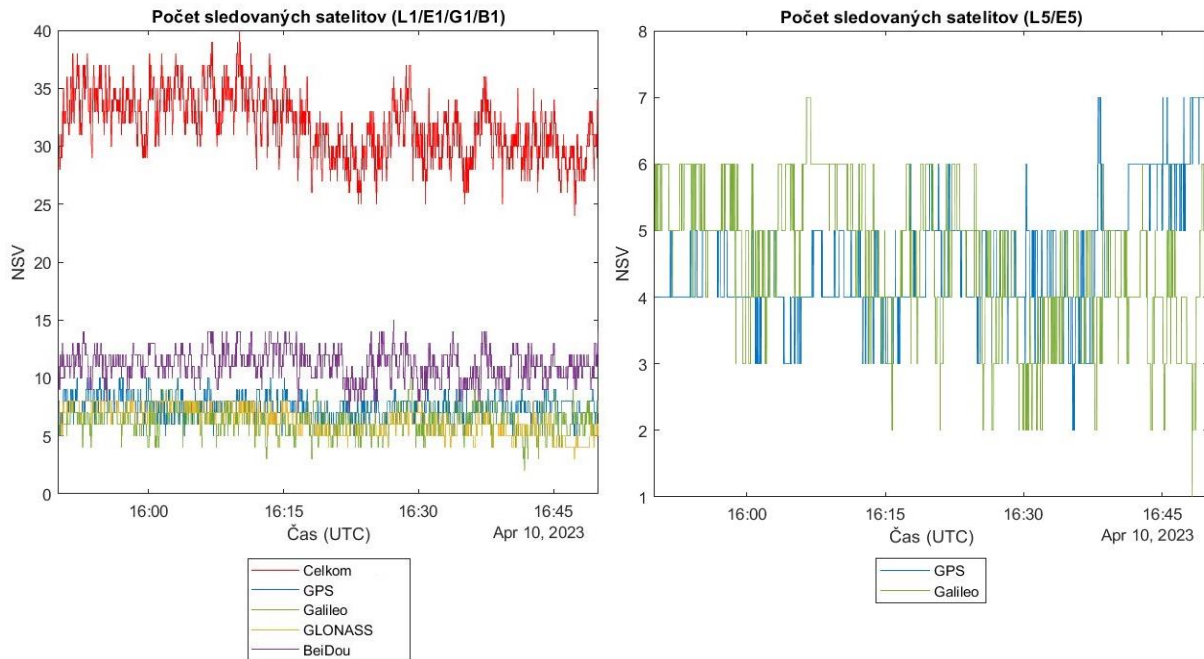
	GPS	Galileo	GLONASS	BeiDou
L1	25,83	21,13	25,51	21,94
L5	24,97	19,84	-	-



Obrázok 38: Priemerné hodnoty C/No jednotlivých družíc pre Sc2_L

NSV

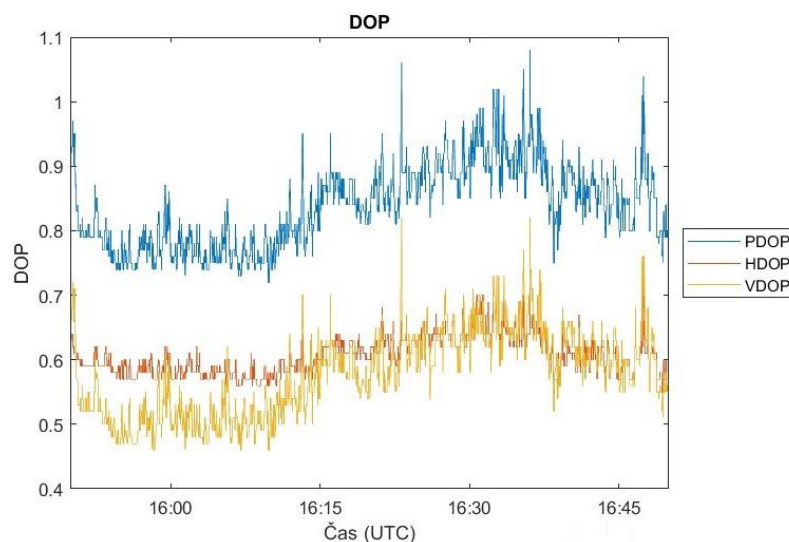
Priebeh počtu sledovaných družíc v čase je zobrazený na Obrázku 39, kde naľavo sa nachádzajú počty sledovaných družíc na frekvencii L1, napravo na frekvencii L5. Priebeh vyznačený červenou farbou na obrázku vľavo znázorňuje časový priebeh celkového počtu sledovaných družíc, ktorý zahŕňa všetky frekvencie a všetky GNSS systémy. V priemere smartfón po dobu nahrávania dát sledoval **31,85 družíc**. Na frekvencii L5 smartfón sledoval priemerne 4,5 satelitov u oboch dostupných GNSS systémov.



Obrázok 39: NSV pre Sc2_L v čase

DOP

Na Obrázku 40 je zobrazený priebeh PDOP, HDOP a VDOP v čase. Priemerná hodnota PDOP za celú dobu merania je **0,84**, čo je o 0,34 menej, ako predpokladaná najnižšia hodnota tohto parametra, ktorá bola 1,2. Pre druhú polovicu nahrávania dát je možné pozorovať mierny nárast hodnôt všetkých troch zložiek.

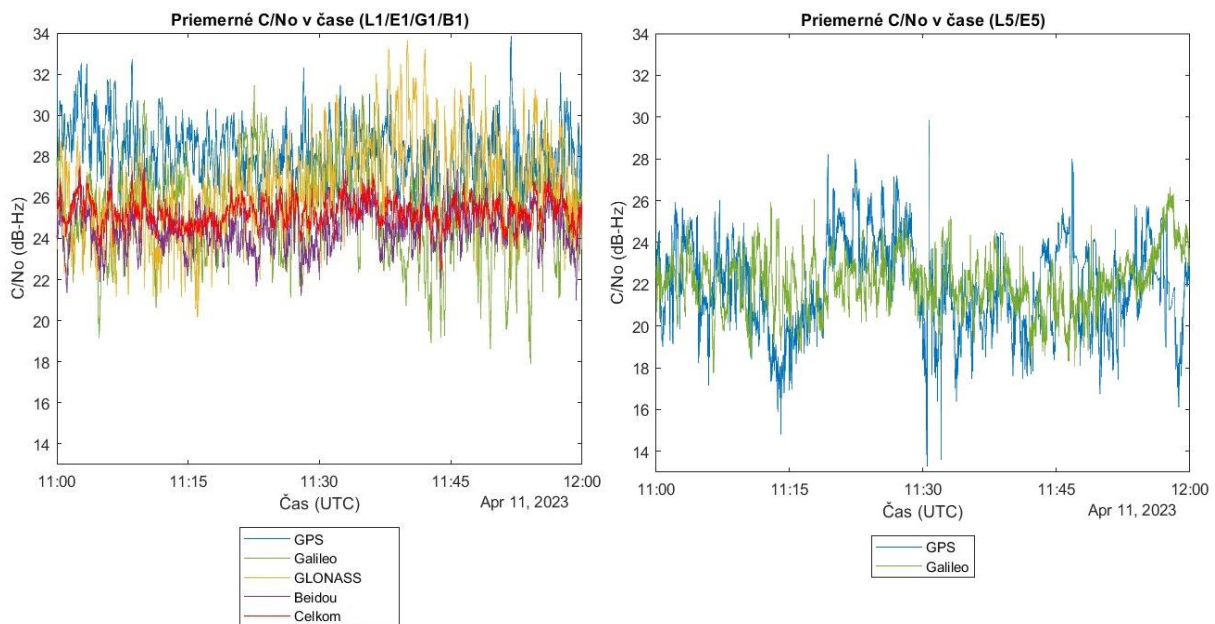


Obrázok 40: DOP pre Sc2_L v čase

4.2.2. Vysoká predpokladaná hodnota DOP

C/No

Obrázok 41 zobrazuje priebehy priemerných hodnôt C/No satelitov daných GNSS systémov v čase. Obrázok 41 vľavo zobrazuje časové priebehy pre frekvenčné pásmo L1, vpravo sú zobrazené priebehy pre pásmo L5. Priebeh vyznačený červenou farbou na obrázku vľavo zobrazuje celkové priemerné hodnoty pre všetky frekvencie a všetky GNSS systémy. Celková priemerná hodnota C/No zahŕňajúca obidve frekvencie a všetky GNSS systémy je pre tento prípad **25,29 dB-Hz**.

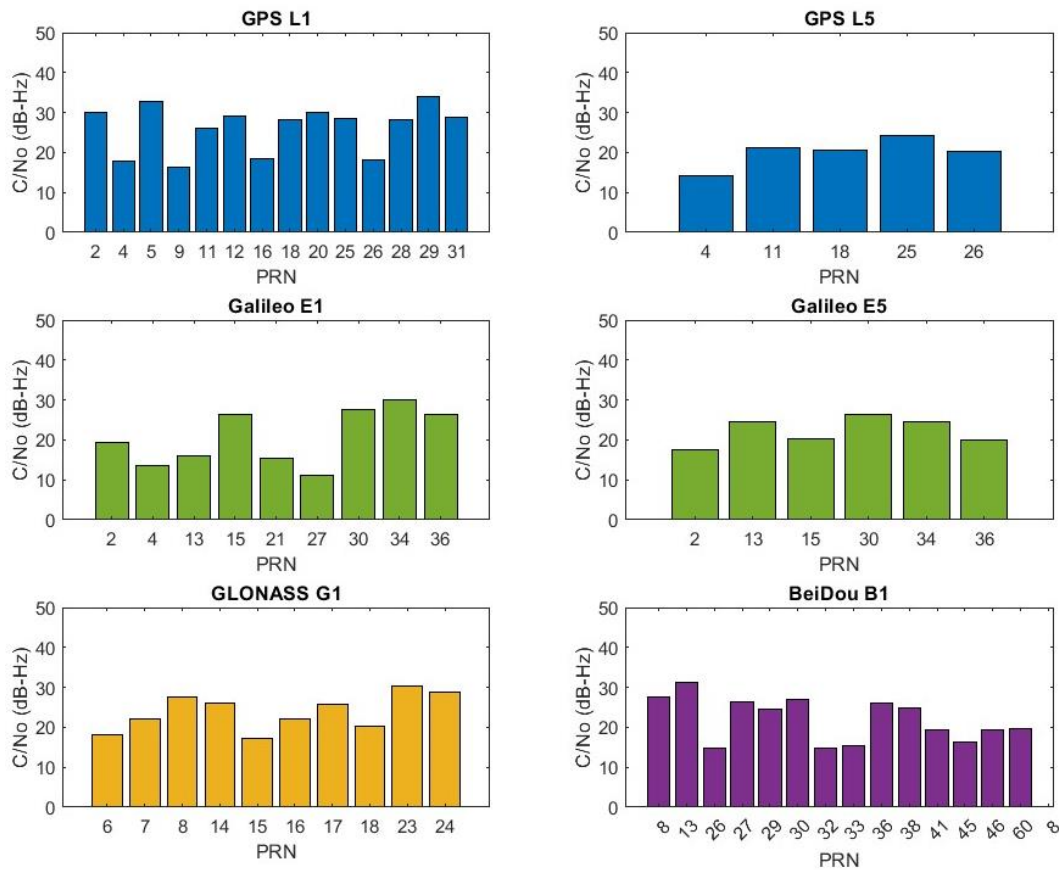


Obrázok 41: Priemerné hodnoty C/No pre Sc2_H v čase

V Tabuľke 18 sú uvedené číselné vyjadrenia priemerných hodnôt, ktoré boli dosiahnuté danými GNSS systémami počas celej doby nahrávania dát. Najvyššie priemerné hodnoty C/No na frekvencii L1 vykazuje systém GPS, na frekvencii L5 systém Galileo. Priemerné hodnoty C/No za celú dobu merania pre jednotlivé sledované satelity daných GNSS systémov sú zobrazené na Obrázku 42.

Tabuľka 18: Priemerné hodnoty C/No pre jednotlivé GNSS konštelácie pre Sc2_H, uvedené v dB-Hz

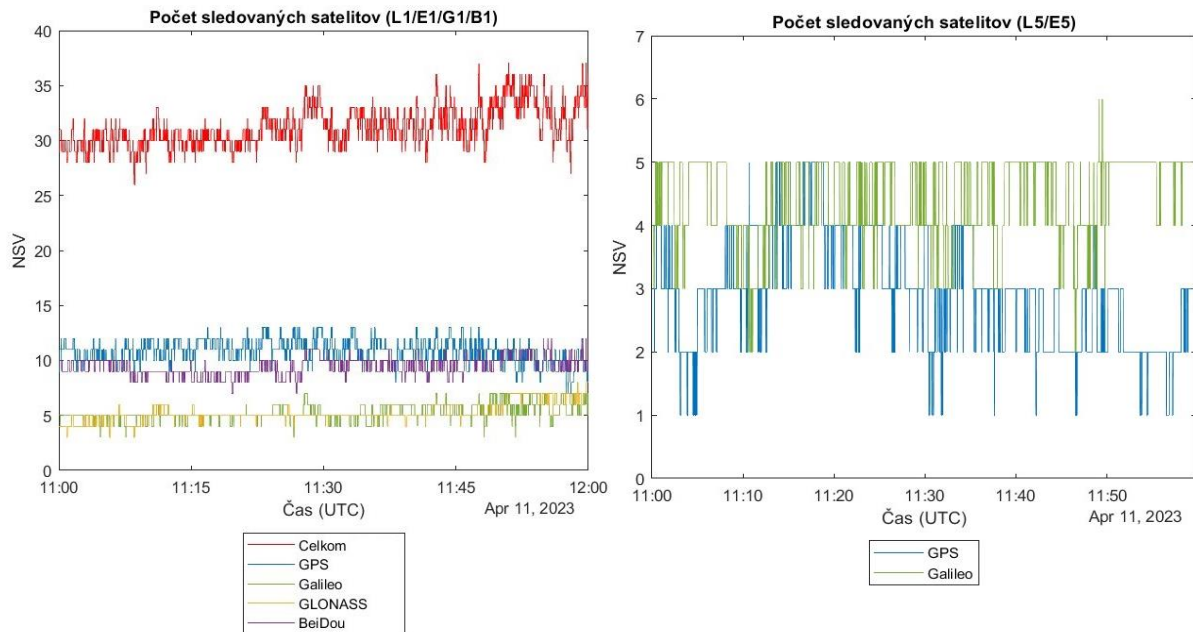
	GPS	Galileo	GLONASS	BeiDou
L1	28,03	25,17	26,60	24,50
L5	21,70	22,04	-	-



Obrázok 42: Priemerné hodnoty C/No jednotlivých družíc pre Sc2_H

NSV

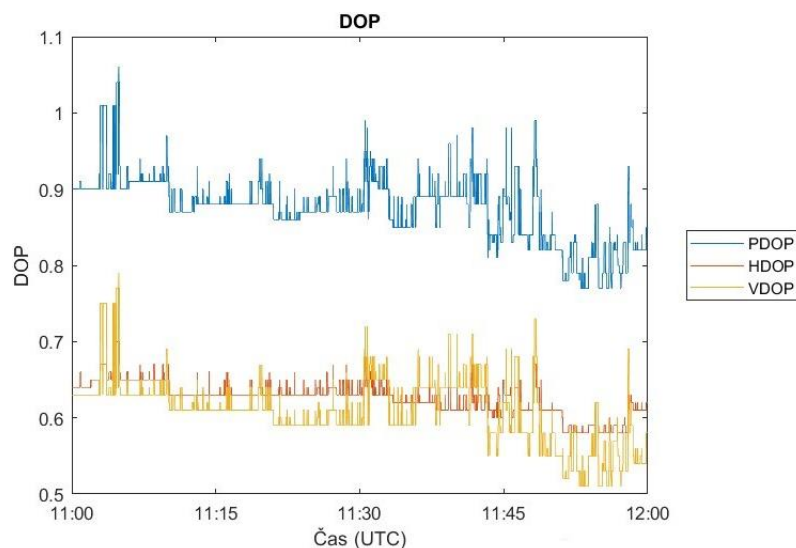
Obrázok 43 zobrazuje počty sledovaných satelitov za celú dobu nahrávania dát pre jednotlivé GNSS systémy. Obrázok 43 vľavo zobrazuje počty sledovaných satelitov na frekvencii L1, vpravo sú zobrazené počty sledovaných satelitov na frekvencii L5. V rámci tohto prípadu smartfón počas celej doby nahrávania dát sledoval v priemere **31,22 satelitov**. Priebeh celkového počtu sledovaných družíc, zahŕňajúci všetky sledované frekvencie a GNSS systémy, je vyznačený na Obrázku 43 vľavo červenou farbou. Najviac satelitov bolo sledovaných zo systému GPS. Na frekvencii L5 smartfón počas Sc2_H sledoval približne 2,96 satelitov zo systému GPS a 4,44 satelitov zo systému Galileo.



Obrázok 43: NSV pre Sc2_H v čase

DOP

Priemerná hodnota PDOP je pre prípad Sc2_H **0,87**. Hodnota z nameraných dát je o 0,68 nižšia ako najnižšia predpokladaná hodnota, ktorá bola 1,55. Ako je zrejmé z Obrázku 44, hodnota tohto parametra sa v priebehu času postupne znižovala a ku koncu merania dosahovalo PDOP hodnoty medzi 0,80 – 0,85.



Obrázok 44: DOP pre Sc2_H v čase

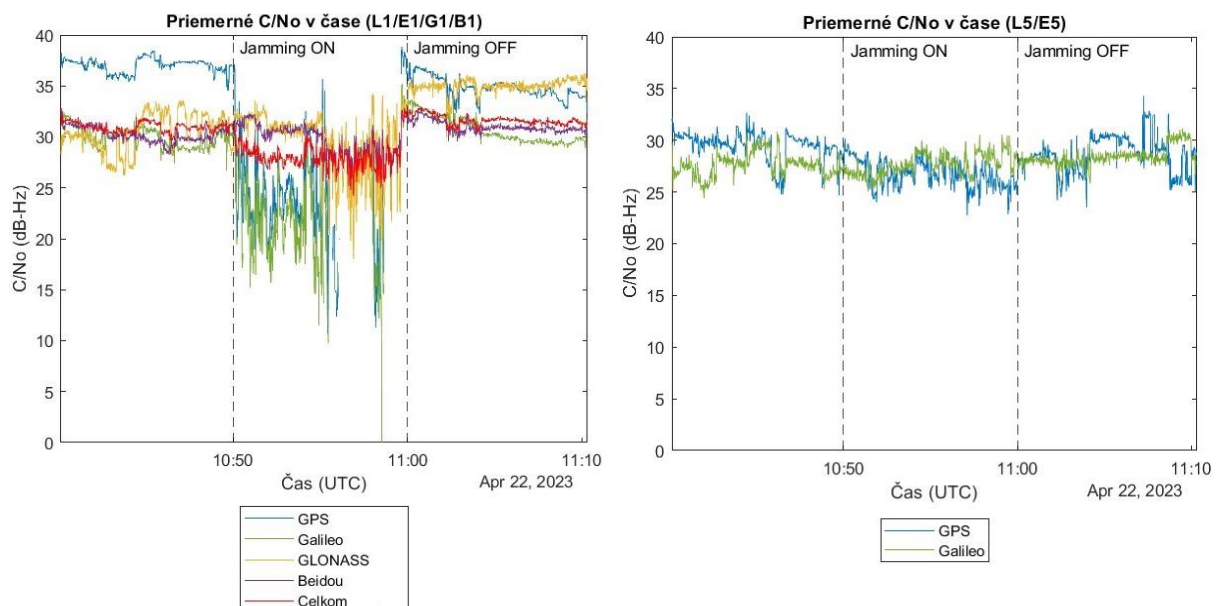
4.3. Scenár 3

U obidvoch prípadov Sc3 sú vo výsledkoch zahrnuté priebehy SQM parametrov C/No, NSV, DOP a AGC, pričom sa posudzujú ich priemerné hodnoty v dobe bez rušenia a v dobe s rušením. Výsledky pre Sc3_S sú vyhodnocované pre každú z použitých antén jednotlivo. Keďže v prípade úspešného spoofingu môže dochádzať okrem zmeny polohy aj k zmene času, sú vyhodnocované tiež časové diskontinuity. Vykreslenie polohy v závere slúži k predstave, či sa smartfón podarilo úspešne zaspoofovať.

4.3.1. Jamming

C/No

Časové priebehy priemerných hodnôt C/No pre jednotlivé GNSS systémy a podporované frekvencie sú zobrazené na Obrázku 45. Vo frekvenčnom pásme L1 je možné vidieť značný pokles priemerných hodnôt od času 10:50, kedy bolo započaté rušenie na úrovni 3 (14 dBm). Od času 10:55, kedy bola zvýšená intenzita rušenia na úroveň 4 (28 dBm), je možné pozorovať dočasný výpadok v dátach u systému GPS a Galileo. Vo frekvenčnom pásme L5 nie sú pozorované výrazné zmeny. Celková priemerná hodnota C/No zahŕňajúca všetky GNSS systémy a frekvencie dosahovala v dobe bez rušenia hodnoty **31,33 dB-Hz**. Počas celej doby rušenia (10 min, nastavenie 3 a 4) bola táto hodnota **28,23 dB-Hz**.



Obrázok 45: Priemerné hodnoty C/No pre Sc3_J v čase



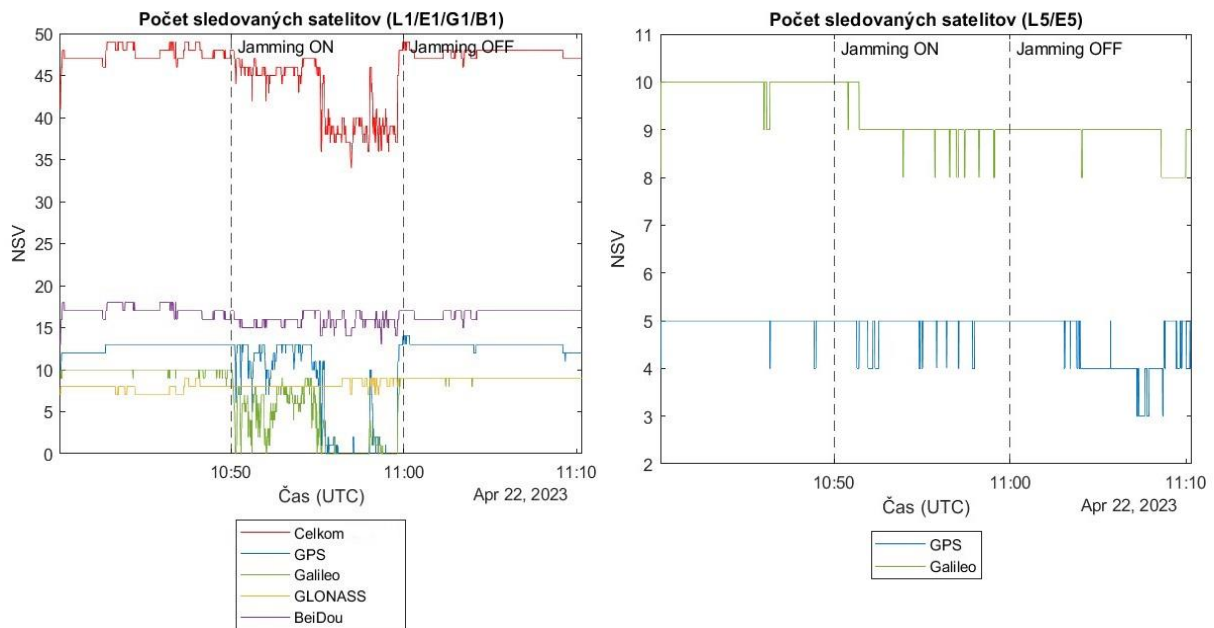
Tabuľka 19 zobrazuje dosiahnuté priemerné hodnoty C/No jednotlivých GNSS systémov pre dobu s rušením (Jamming ON) a pre dobu bez rušenia (Jamming OFF). V poslednom stĺpci tabuľky je uvedené, o koľko sa priemerná hodnota C/No zmenila v dobe s rušením voči dobe bez rušenia. Najväčší pokles priemernej hodnoty C/No sa vyskytuje u systému GPS, pri ktorom táto hodnota na frekvencii L1 poklesla o 10,23 dB-Hz.

Tabuľka 19: Priemerné hodnoty C/No pre jednotlivé GNSS systémy pre Sc3_J, uvedené v dB-Hz

		Jamming OFF	Jamming ON	
GPS	L1	35,87	25,64	- 10,23
	L5	28,95	26,74	- 2,21
Galileo	E1	30,29	23,33	- 6,96
	E5	28,00	27,64	- 0,36
GLONASS		32,92	29,59	- 3,33
BeiDou		30,61	26,69	- 3,92

NSV

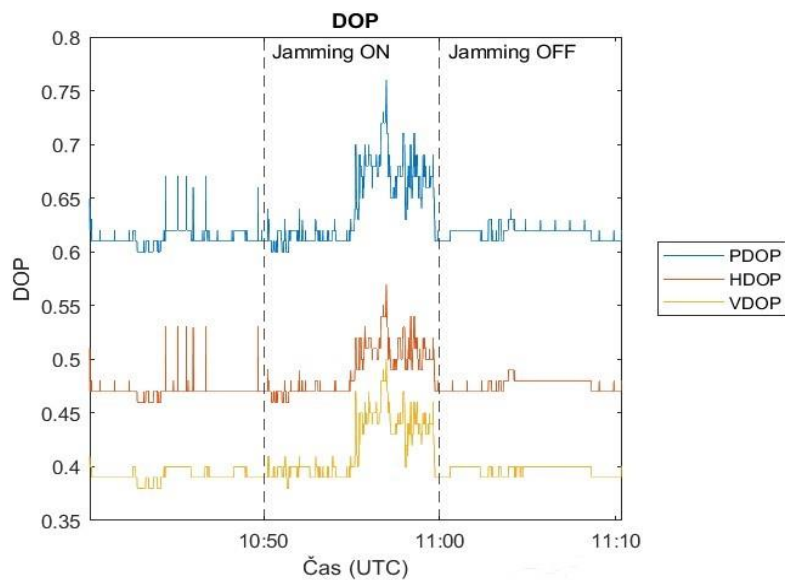
Priebehy počtov sledovaných satelitov v rámci frekvenčných pásiem L1 a L5 v čase sú zobrazené na Obrázku 46. Už v dobe započatia rušenia na nižšej intenzite je možné si všimnúť pokles počtu sledovaných satelitov u systémov GPS a Galileo. Ešte výraznejší pokles je viditeľný v druhej fáze rušenia, kedy bola rušička prepnutá na vyššiu intenzitu. V tejto časti smartfón na určitú dobu úplne prestáva sledovať satelity systémov GPS a Galileo na frekvencii L1/E1. V dobe bez rušenia smartfón sledoval priemerne **47,53 satelitov**, v dobe rušenia sledoval priemerne **42,75 satelitov**.



Obrázok 46: NSV pre Sc3_J v čase

DOP

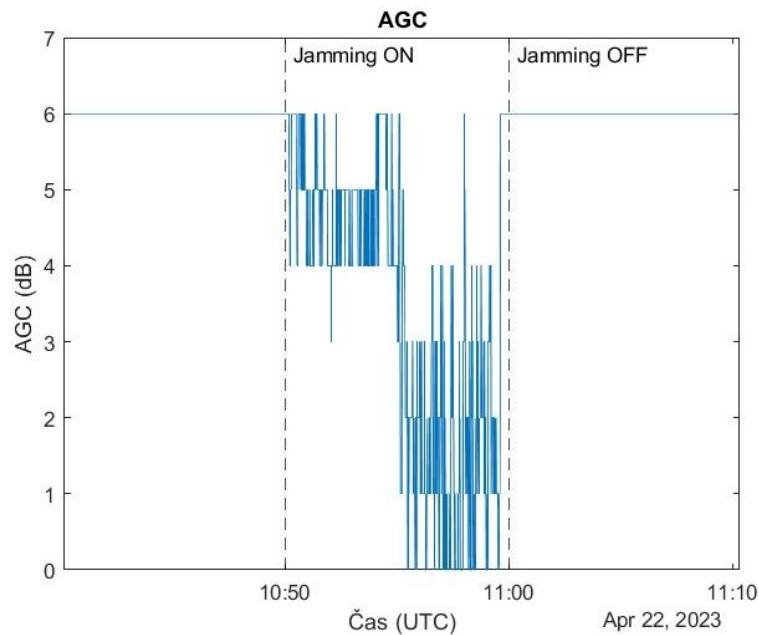
Na Obrázku 47 je zobrazený priebeh parametrov PDOP, HDOP a VDOP v čase. Výraznejší nárast všetkých troch hodnôt je znateľný len v druhej polovici rušenia od času 10:55, kedy bolo započaté rušenie na vyššej intenzite. Priemerná hodnota PDOP je v dobe bez rušenia **0,62** a v dobe s rušením **0,64**.



Obrázok 47: DOP pre Sc3_J v čase

AGC

Časový priebeh parametra AGC behom Sc3_J je zobrazený na Obrázku 48. Pokles AGC hodnôt je viditeľný naprieč celým obdobím rušenia, pričom sú viditeľné dva skokové poklesy hodnôt, odpovedajúce zmenám v intenzite rušiacoho signálu. Hodnota AGC dosahovala v období bez rušenia konštantných **6 dB**, rovnako ako to bolo v prípadoch Sc1 a Sc2. Priemerná hodnota AGC za celé obdobie rušenia činila **3,43 dB**.



Obrázok 48: AGC pre Sc3_J v čase

Po detailnejšom preskúmaní nameraných surových GNSS dát obsahujúcich informácie o polohe bolo zistené, že určovanie polohy prebiehalo kontinuálne bez prerušenia, aj v dobe s aktívnym rušením. V dátach sa nenachádzajú žiadne výpadky v čase, čo svedčí o schopnosti telefónu určovať svoju polohu na základe signálov prijímaných z druhej dostupnej frekvencie a ostatných GNSS systémov.

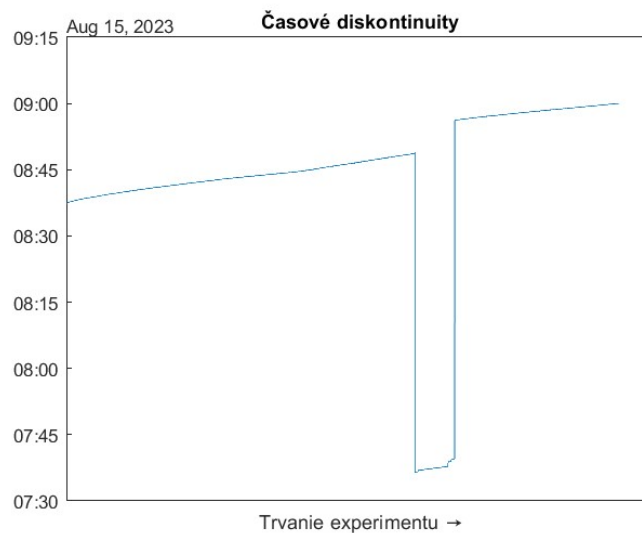
4.3.2. Spoofing

4.3.2.1. Výsledky pre Anténu 1

Časové diskontinuity

V prípade použitia Antény 1 sa v dátach vyskytuje výrazný časový skok, ako je zobrazené na Obrázku 49. Konkrétne v čase 8:48:42 sa čas v dátach skokovo mení na 7:36:31. Spoofer bol zapnutý v čase 8:44:30, k zmene času teda došlo presne o 4 minúty a 12 sekúnd po jeho

zapnutí. Čas sa obnovil späť do správneho času v čase 8:56:10, teda 10 sekúnd po vypnutí spooferu.

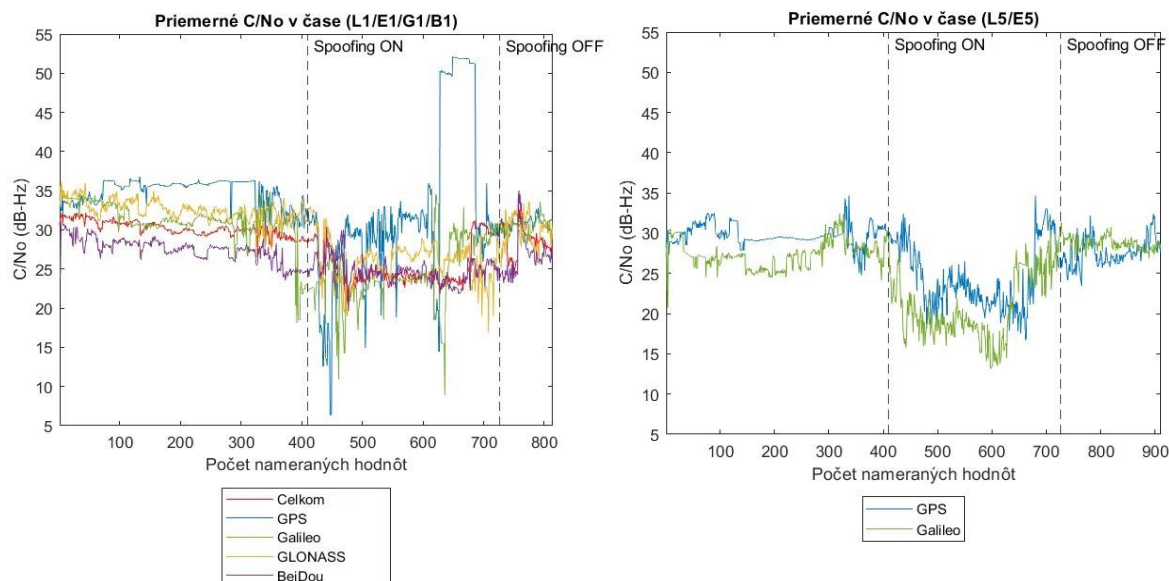


Obrázok 49: Časové diskontinuity v rámci Sc3_S pre Anténu 1

Keďže je v prípade použitia Antény 1 v dátach prítomná časová diskontinuita, nasledujúce SQM parametre sú do grafov vykresľované nie voči času, ale voči počtu nameraných hodnôt v priebehu merania. U grafov pre SQM parametre C/No a NSV nižšie je možné si všimnúť, že u frekvenčného pásma L1 bolo nameraných menej hodnôt než u pásma L5.

C/No

Priebehy priemerných hodnôt C/No jednotlivých GNSS konštelácií a frekvencií v čase sú zobrazené na Obrázku 50. Celková priemerná hodnota C/No zahŕňajúca všetky sledované GNSS systémy a frekvencie je v dobe bez spoofingu **29,77 dB-Hz**, v dobe so zapnutým spoofovacím zariadením **25,53 dB-Hz**. Počas spoofingu teda celková priemerná hodnota C/No poklesla o 4,24 dB-Hz. U systému GPS je na frekvencii L1 možné pozorovať skokový nárast hodnôt ku koncu nahrávania dát. Vo frekvenčnom pásme L5 dochádza v priebehu nahrávania dát k výraznému poklesu priemerných hodnôt C/No.



Obrázok 50: Priemerné hodnoty C/No pre Sc3_S v čase (Anténa 1)

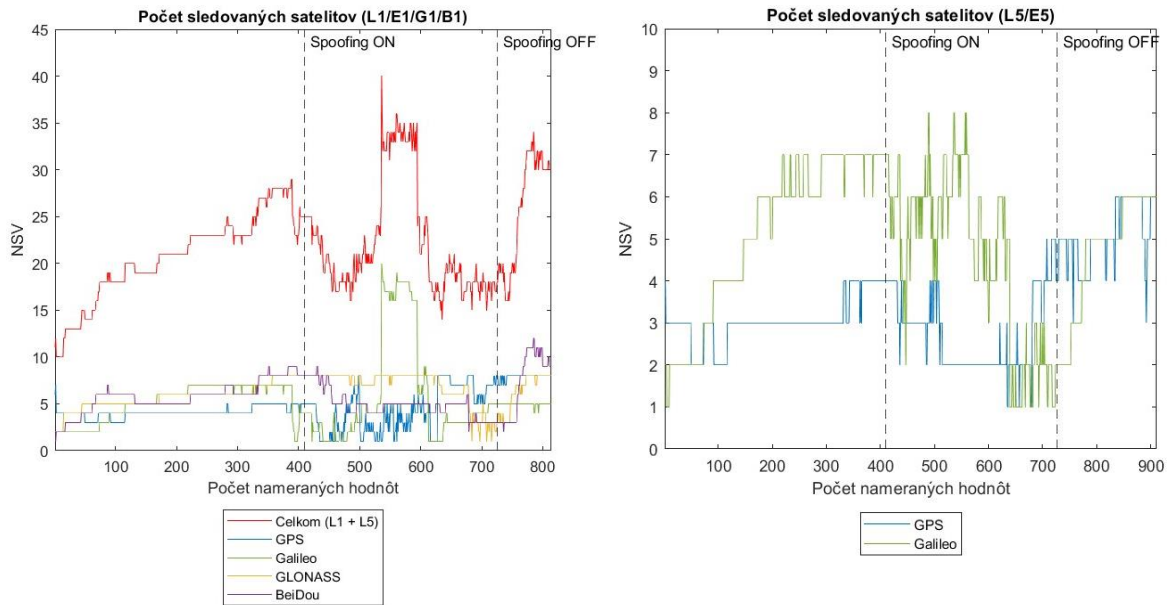
Tabuľka 20 obsahuje priemerné hodnoty C/No pre jednotlivé GNSS systémy po dobu so spoofingom (Spoofing ON) a po dobu bez spoofingu (Spoofing OFF). V poslednom stĺpci tabuľky sú uvedené zmeny priemerných hodnôt C/No v dobe bez rušenia voči dobe s rušením. U systému GPS si je na frekvencii L1 možné všimnúť zvýšenie priemernej hodnoty o 4,70 dB-Hz, pričom u všetkých ostatných GNSS systémov a frekvencií došlo k poklesu hodnôt.

Tabuľka 20: Priemerné hodnoty C/No pre jednotlivé GNSS systémy, uvedené v dB-Hz (Anténa 1)

		Spoofing OFF	Spoofing ON	
GPS	L1	32,88	37,58	+ 4,70
	L5	28,89	23,28	- 5,60
Galileo	E1	30,78	23,49	- 7,29
	E5	27,68	20,48	- 7,20
GLONASS		31,76	26,01	- 5,75
BeiDou		27,57	24,65	- 2,92

NSV

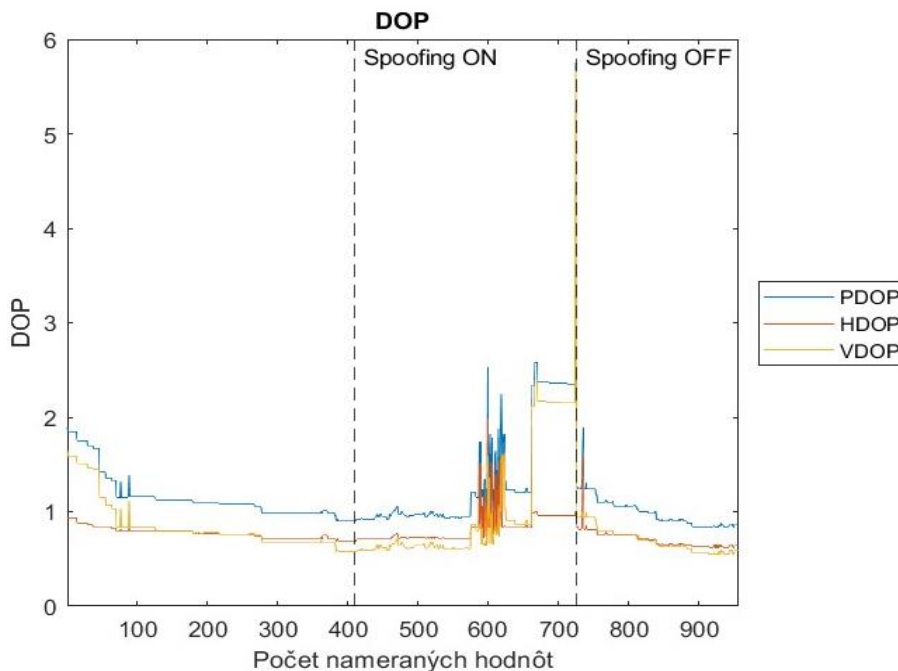
Priebehy počtov sledovaných satelitov jednotlivých GNSS konštelácií a frekvenčných pásiem v čase sú zobrazené na Obrázku 51. Skokový nárast v počte sledovaných satelitov je možné pozorovať u GNSS systému Galileo na frekvencii E1 (Obrázok 51 vľavo). V dobe spoofingu smartfón sledoval priemerne **24,97 satelitov**, v dobe bez spoofingu to bolo priemerne **23,61 satelitov**.



Obrázok 51: NSV pre Sc3_S v čase (Anténa 1)

DOP

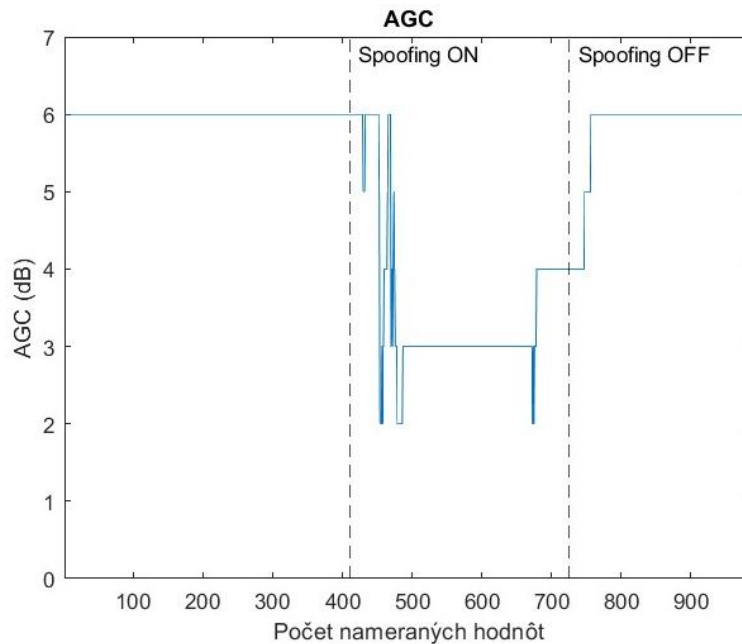
Na Obrázku 52, zobrazujúceho priebeh činiteľov DOP v čase, je možné v dobe spoofingu pozorovať nárast hodnôt PDOP, HDOP a VDOP. Parameter PDOP nadobúdal v dobe spoofingu priemernej hodnoty **1,35**, v dobe bez spoofingu bola jeho priemerná hodnota **1,09**.



Obrázok 52: DOP v čase pre Sc3_S (Anténa 1)

AGC

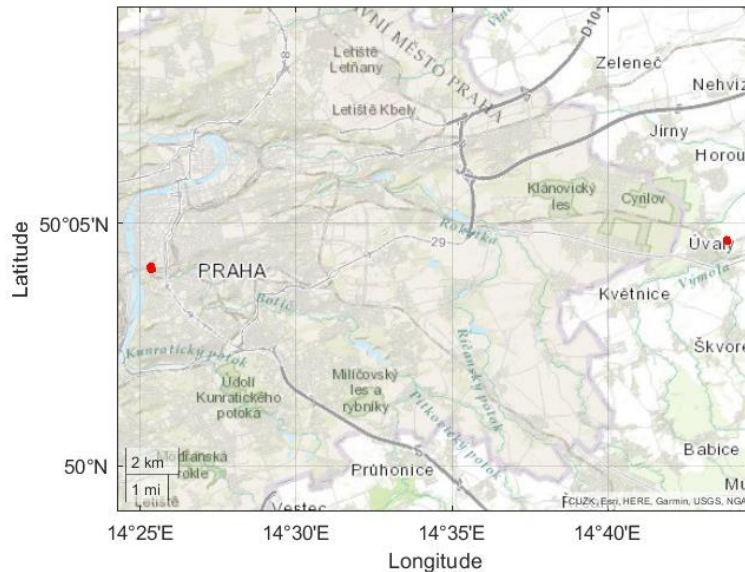
Podobne ako v prípade Sc3_J sa aj v prípade spoofingu rušenie výrazne odráža na priebehu parametra AGC, u ktorého dochádza k poklesu hodnôt, ako je zobrazené na Obrázku 53. Priemerná hodnota v dobe bez spoofingu bola **6 dB**, v dobe so zapnutým GNSS simulátorom dosahovala priemerne len **3,53 dB**. Pokles hodnôt parametra AGC sa v dátach vyskytuje v rovnakej dobe, kedy sa v dátach vyskytuje aj skoková zmena času.



Obrázok 53: AGC v čase pre Sc3_S (Anténa 1)

Vypočítaná poloha

Telefón sa v prípade použitia Antény 1 podarilo úspešne zaspoofovať, o čom svedčí vypočítaná poloha z nameraných surových GNSS dát, ktorá bola po dobu spoofingu určovaná v nastavenej fiktívnej lokalite v obci Úvaly tak, ako je zobrazené na Obrázku 54.

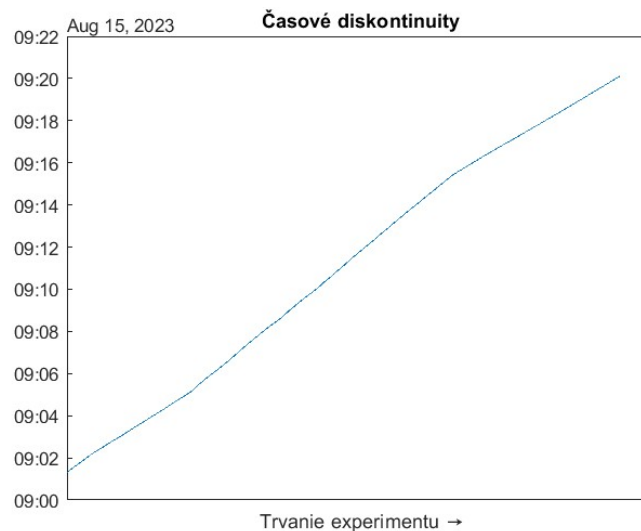


Obrázok 54: Vypočítaná poloha z nameraných surových dát pre Sc3_S (Anténa 1)

4.3.2.2. Výsledky pre Anténu 2

Časové diskontinuity

Ako zobrazuje Obrázok 55, v dátach nameraných v prípade použitia Antény 2 nie sú prítomné žiadne časové skoky. Nasledujúce grafy sú teda vykresľované opäť na časovej ose.

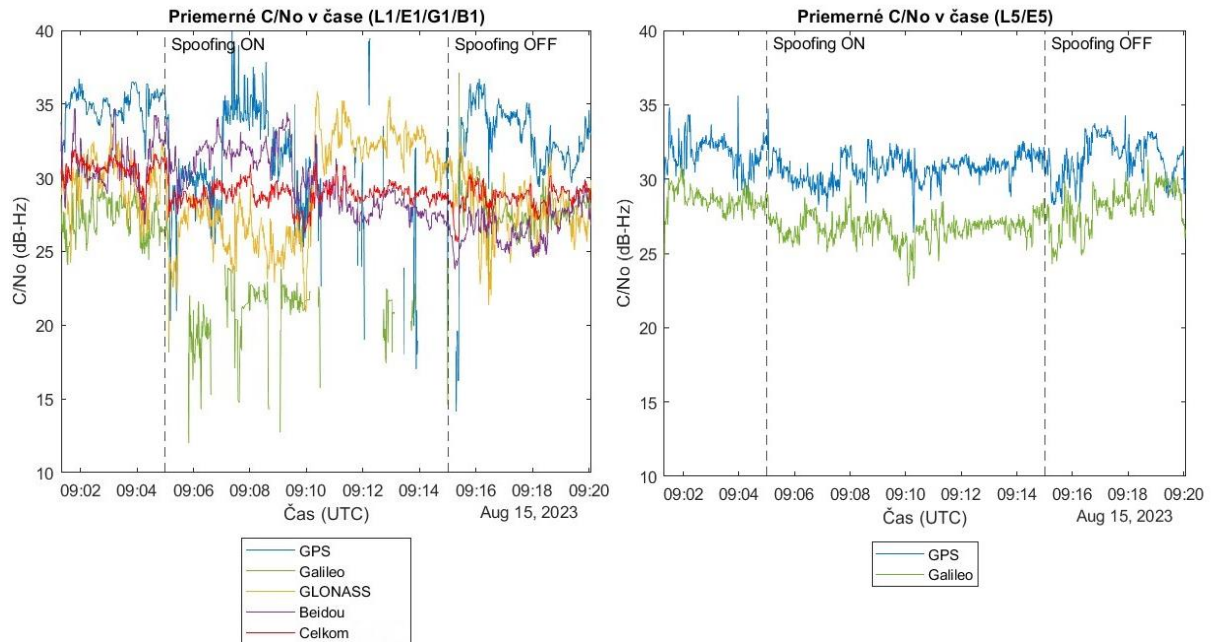


Obrázok 55: Časové diskontinuity (Anténa 2)

C/No

Od zapnutia spooferu v čase 9:05:00 je v nameraných dátach možné pozorovať prvé výpadky u systémov GPS a Galileo vo frekvenčnom pásme L1, ako je zobrazené na Obrázku 56 vľavo.

V pásme L5 nie sú pozorovateľné žiadne výrazné odchýlky (Obrázok 56 vpravo). Priemerná hodnota C/No po dobu bez spoofingu bola **29,46 dB-Hz**, v dobe so zapnutým spooferom **28,88 dB-Hz**.



Obrázok 56: Priemerné hodnoty C/No pre Sc3_S v čase (Anténa 2)

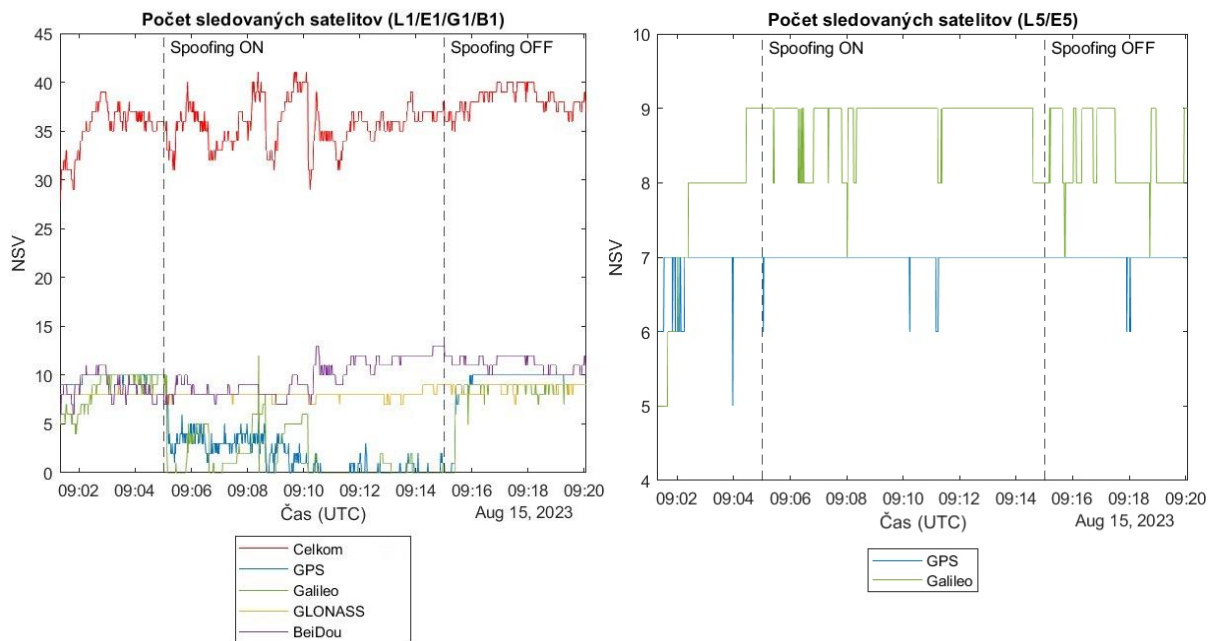
Priemerné hodnoty C/No pre jednotlivé GNSS systémy po dobu so spoofingom (Spoofing ON) a po dobu bez spoofingu (Spoofing OFF) sú uvedené v Tabuľke 21, kde posledný stĺpec tabuľky uvádza zmeny priemerných hodnôt C/No po zapnutí GNSS simulátoru. U systémov GPS a Galileo došlo k poklesu hodnôt na oboch frekvenciách, pričom u systémov GLONASS a BeiDou priemerné hodnoty počas spoofingu vzrástli.

Tabuľka 21: Priemerné hodnoty C/No pre jednotlivé GNSS systémy, uvedené v dB-Hz (Anténa 2)

		Spoofing OFF	Spoofing ON	
GPS	L1	33,83	31,60	- 2,23
	L5	31,54	30,71	- 0,83
Galileo	E1	27,64	21,43	- 6,21
	E5	28,24	26,70	- 1,54
GLONASS		28,64	29,13	+ 0,49
BeiDou		28,09	29,58	+ 1,49

NSV

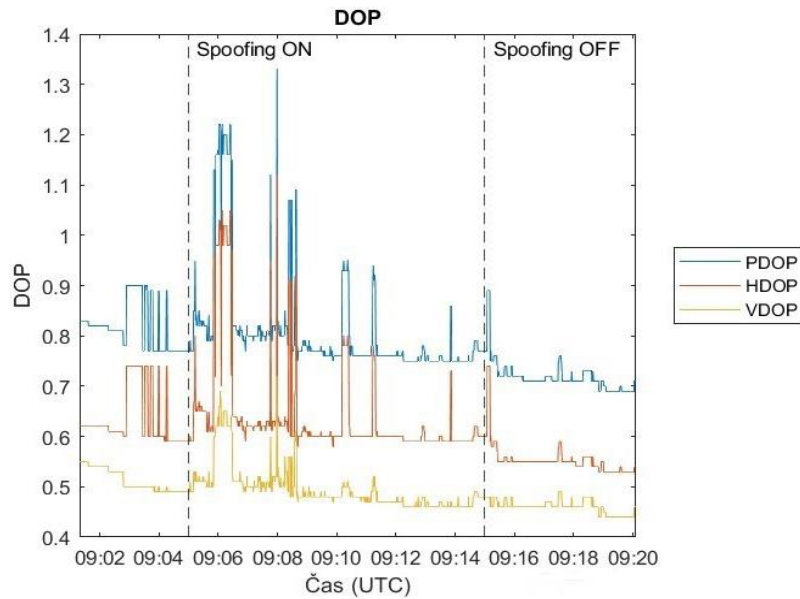
Ako je vidieť z Obrázku 57 vľavo, v dobe spoofingu došlo k výraznému poklesu počtu sledovaných satelitov u GNSS systémov GPS a Galileo vo frekvenčnom pásme L1. V pásme L5 nie sú ani v tomto prípade pozorovateľné žiadne významné zmeny. Po dobu spoofingu telefón sledoval priemerne **35,71 satelitov**, v dobe bez spoofingu to bolo priemerne **37,02 satelitov**.



Obrázok 57: NSV v čase pre Sc3_S (Anténa 2)

DOP

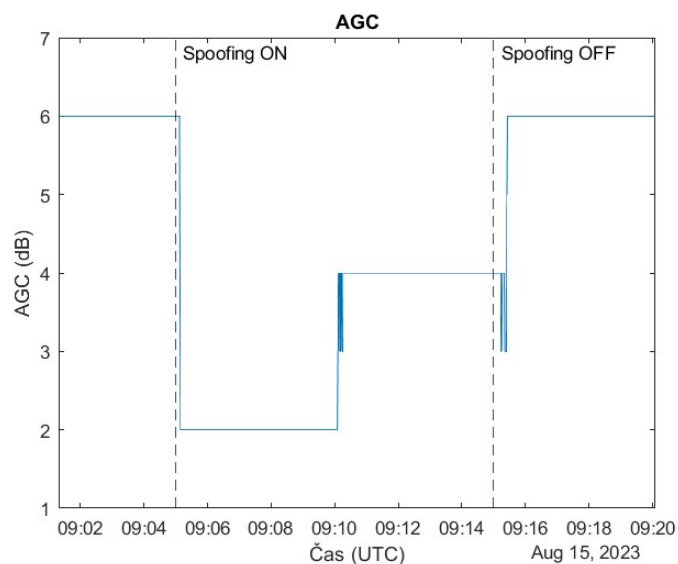
V prípade použitia Antény 2 dochádza v časovom priebehu parametrov DOP k náhodným skokovým nárastom hodnôt, pričom tie najväčšie odchýlky sa nachádzajú krátko po začatí spoofingu v čase 9:05, ako je zobrazené na Obrázku 58. Priemerná hodnota PDOP v dobe spoofingu bola **0,81**, v dobe bez spoofingu **0,76**.



Obrázok 58: DOP v čase pre Sc3_S (Anténa 2)

AGC

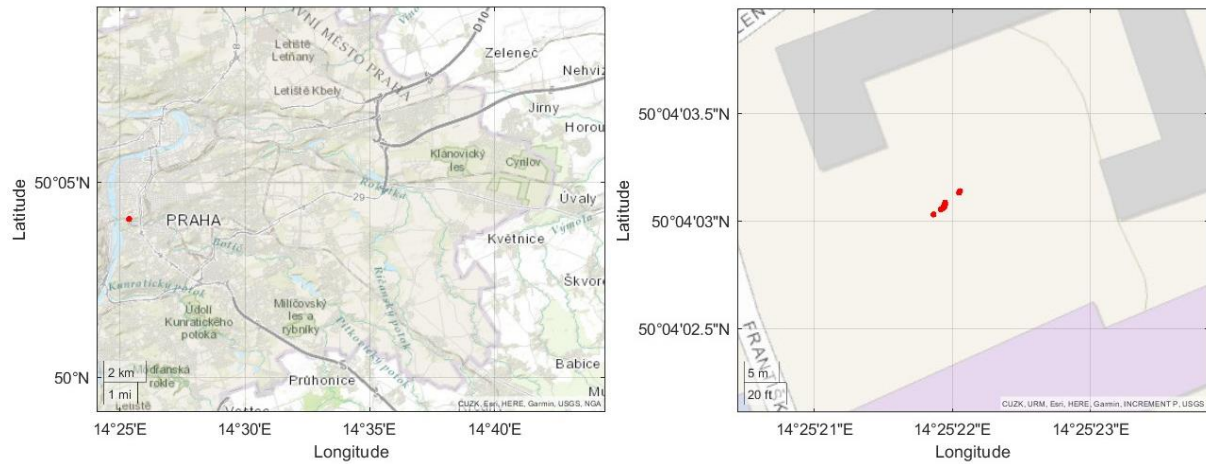
Ako zobrazuje Obrázok 59, v priebehu parametra AGC v čase je opäť možné pozorovať pokles hodnôt, svedčiacich o prítomnosti rušiaceho signálu v prostredí. Priemerná hodnota sa v dobe bez spoofingu udržiavala na **6 dB**, s výnimkou krátkej doby regenerácie po ukončení spoofingu. K prudkému poklesu hodnôt AGC došlo ihneď po začatí spoofingu. Priemerná hodnota AGC v dobe spoofingu bola **3,03 dB**.



Obrázok 59: AGC v čase pre Sc3_S (Anténa 2)

Vypočítaná poloha

Smartfón sa v prípade použitia Antény 2 nepodarilo zaspoofovať. Poloha bola po celú dobu nahrávania dát určovaná v Prahe na mieste merania tak, ako je zobrazené na Obrázku 60.



Obrázok 60: Vypočítaná poloha z nameraných surových dát pre Sc3_S (Anténa 2)



5. Porovnanie výsledkov a diskusia

Výsledky scenárov 1 a 2 prezentované v predchádzajúcej kapitole sú v tejto kapitole navzájom porovnané z hľadiska vplyvu typu prostredia na kvalitu GNSS signálu. Výsledky Sc3 sú diskutované predovšetkým z hľadiska schopnosti detekcie GNSS rušenia pomocou daných SQM parametrov. Na základe dosiahnutých výsledkov je možné vyvodit' závery o výhodách a limitáciách plynúcich z potenciálneho využitia smartfónov pre účely merania kvality GNSS signálu, ktoré sú diskutované na konci tejto kapitoly.

5.1. Vplyv typu prostredia na SQM parametre

Z uvedených výsledkov z predchádzajúcej kapitoly je možné pozorovať, ako sa do kvality nameraných GNSS dát premieta vplyv prostredia, v ktorom sa smartfón nachádza. Výsledné celkové priemerné hodnoty SQM parametrov zo smartfónu a zariadenia COLOSSUS sú pre porovnanie uvedené v Tabuľke 22. Celkové priemerné hodnoty C/No v rámci prípadov Sc1 boli v porovnaní so zariadením COLOSSUS o 7,99 až 10,03 dB-Hz nižšie. Čo sa týka počtu sledovaných satelitov, tu dosahoval vyšších hodnôt v porovnaní so zariadením COLOSSUS smartfón. Tieto výsledky súvisia prevažne s inštalovanou anténou v telefóne, ktorá umožňuje príjem signálu z viacerých družíc na úkor kvality prijatého signálu z nich. Vyšší počet sledovaných satelitov u smartfónu súvisí taktiež s príjmom signálu z jedného GNSS systému navyše, konkrétne z BeiDou.

Tabuľka 22: Porovnanie priemerných hodnôt SQM parametrov Sc1 a Sc2 zo smartfónu a zariadenia COLOSSUS

		Sc1		Sc2	
		Sc1_L	Sc1_H	Sc2_L	Sc2_H
C/No [dB-Hz]	Smartfón	33,95	32,79	23,13	25,29
	COLOSSUS	43,98	43,15	-	-
NSV	Smartfón	49,31	46,33	31,85	31,22
	COLOSSUS	41,32	37,59	-	-
PDOP	Smartfón	0,70	0,67	0,84	0,87
AGC [dB]	Smartfón	6,00	6,00	6,00	6,00

U Sc2 sú výsledné celkové priemerné hodnoty parametra C/No v oboch prípadoch v porovnaní s Sc1 nižšie o 7,5 až 10,82 dB-Hz. Ako bolo uvedené v kapitole 1.3.1.1, priemerné hodnoty



tohto parametra by pre dosiahnutie kvalitného PVT riešenia mali ideálne dosahovať hodnôt v rozmedzí 35 – 45 dB-Hz, čo sa v prostredí typu *urban canyon* ukázalo byť len veľmi ťažko dosiahnuteľné. U Sc1 meraného v prostredí typu *clear sky* celkové priemerné hodnoty C/No taktiež nenadobúdali optimálnych hodnôt, avšak výrazne sa k tomuto rozmedziu blížili. Ak sa u Sc1_L a Sc1_H pozrieme na dosiahnuté priemerné hodnoty C/No jednotlivých družíc, najlepšie hodnoty vykazujú družice systémov GPS, Galileo a GLONASS vo frekvenčnom pásme L1.

V oboch meraných prípadoch Sc2 smartfón celkovo sledoval okolo 31 družíc, čo je o 15 – 17 družíc menej ako u Sc1. Hodnoty PDOP sú v oboch meraných prípadoch Sc2 vyššie ako u Sc1, avšak rozdiel medzi nimi sa pohybuje v rozmedzí od 0,14 až 0,2. Na parameter AGC nemal typ prostredia žiadny vplyv.

Rozdiel medzi jednotlivými meranými prípadmi Sc1 je zreteľný predovšetkým na hodnotách polohových chýb, ktoré sú pre porovnanie uvedené v Tabuľke 23. Výsledná hodnota priestorovej RMSE sa u Sc1_L v porovnaní s Sc1_H zlepšila až o 1,6 m. Významnú nepresnosť do 3D RMSE pridáva práve vertikálna zložka vypočítanej polohy. V prípade Sc1_L sa smartfónu podarilo v horizontálnej rovine dosiahnuť decimetrovú presnosť, čo je v porovnaní s Sc1_H zlepšenie skoro o 1 m. V rámci vykreslenia vypočítanej polohy na mapovom podklade sa očakávalo vykreslenie typického „mračna bodov“, keďže väčšinou GNSS prijímač neurčuje polohu v čase v tom istom bode. Polohové súradnice sa však v nameraných surových GNSS dátach za celú dobu merania nijak nemenili, čo malo za následok aj konštantné výsledné hodnoty odchýlok polohy. Príčinou tohto výsledku môže byť teoreticky to, že smartfón využíva k určeniu polohy fázové merania, ktoré sú oproti kódovým omnoho presnejšie.

Tabuľka 23: Porovnanie vypočítaných odchýlok polohy v rámci Sc1

	N	E	Up	3D RMSE	2D RMSE	Vert. RMSE
Sc1_L	-0,2128 m	0,1775 m	2,9650 m	2,9779 m	0,2771 m	2,9650 m
Sc1_H	0,5287 m	1,1329 m	4,4650 m	4,6367 m	1,2502 m	4,4650 m

Vplyv typu prostredia *urban canyon* a viaccestného šírenia spôsobeného prítomnosťou vysokých budov v priamej blízkosti smartfónu sa priamo odráža v kvalite nameraných dát, čo je vidieť obzvlášť z výraznejšie zašumených časových priebehov SQM parametrov v porovnaní s Sc1. Tento rozdiel je možné vidieť konkrétne napríklad na Obrázkoch 23 a 37 z kapitol 4.1.1 a 4.2.1, ktoré zobrazujú časové priebehy parametra C/No prípadov Sc1_L a Sc2_L. Ďalšou príčinou zašumených dát však taktiež môže byť už spomínaný hardvér



smartfónu, ktorý je z hľadiska kvality neporovnateľný s GNSS prijímačmi z vyššej cenovej kategórie používanými pre profesionálne aplikácie.

Dôležité je tu tiež poukázať na limitáciu samotného mestského prostredia v Prahe, kde lokálne podmienky neumožňujú nájsť miesto, ktoré môže byť charakterizované ako typický *urban canyon*. Mestská zástavba v Prahe nedosahuje porovnateľnú hustotu a rozmer s omnoho väčšími veľkomestami ako napríklad Londýn alebo New York. Rovnako nebola možnosť dáta nahrávať v prostredí s veľmi vysokou hodnotou DOP. Tuzemské podmienky sú charakteristické tým, že sa nevyznačujú vysokými hodnotami parametra DOP a väčšinu času nepresahujú hodnoty 1. V prípade umiestnenia smartfónu v prostredí s ďaleko vyššími hodnotami DOP teda môžu byť dáta so smartfónu teoreticky poznačené šumom v oveľa väčšej miere a SQM parametre môžu nadobúdať ešte nižších, prípadne vyšších výsledných hodnôt.

5.2. Vplyv GNSS RFI na SQM parametre

V Sc3, meraným s GNSS rušením, sa v časových priebehoch všetkých SQM parametrov rušenie prejavilo náhlymi poklesmi, prípadne nárastmi hodnôt, ktoré korešpondovali s obdobím aktívneho rušenia. V Tabuľke 24 sú pre prehľad a porovnanie uvedené celkové priemerné dosiahnuté hodnoty hodnotených SQM parametrov pre jednotlivé merané prípady počas doby bez rušenia (RFI OFF) a doby s rušením (RFI ON).

Tabuľka 24: Porovnanie jednotlivých prípadov Sc3 v dobe bez rušenia (RFI OFF) a s rušením (RFI ON)

		Sc3_J	Sc3_S	
			Anténa 1	Anténa 2
C/No [dB-Hz]	RFI OFF	31,33	29,77	29,46
	RFI ON	28,23	25,53	28,88
NSV	RFI OFF	47,63	23,61	37,02
	RFI ON	42,75	24,97	35,71
PDOP	RFI OFF	0,62	1,09	0,76
	RFI ON	0,64	1,35	0,81
AGC [dB]	RFI OFF	6,00	6,00	6,00
	RFI ON	3,43	3,53	3,03

V prípade jammingu sa zmeny v hodnotách SQM parametrov prejavili výraznejšie až v dobe rušenia na vyššej nastavenej intenzite, ako je možné vidieť z časových priebehov na Obrázkoch 45 až 48 v kapitole 4.3.1. V smartfóne však počas celej doby rušenia nedošlo



k úplnému výpadku GNSS signálu a poloha bola v priebehu merania kontinuálne vypočítavaná. Keďže je signál Galileo E1 vysielaný v L pásme na rovnakej frekvencii ako GPS L1 (1575,42 MHz), jamming sa prejavil aj na SQM parametroch tohto GNSS systému. Na tejto frekvencii smartfón počas rušenia na vyššej intenzite na určitú dobu úplne prestal sledovať družice týchto dvoch systémov. Celkové priemerné hodnoty SQM parametrov boli v rámci Sc3_J v dobe bez rušenia porovnateľné s dosiahnutými hodnotami v Sc1.

Celkové priemerné hodnoty C/No a NSV v prípade Sc3_S sú v dobe bez rušenia znateľne horšie než v prípade Sc3_J, čo je čiastočne spôsobené lokalitou, v ktorej boli scenáre merané. Prípád jammingu bol meraný na kopci, ktorý možno považovať za typ prostredia *clear sky*, zatiaľ čo spoofing bol meraný na parkovisku obklopenom budovami, ktoré však boli v porovnaní s lokalitou Sc2 nižšie a od telefónu vzdialenejšie.

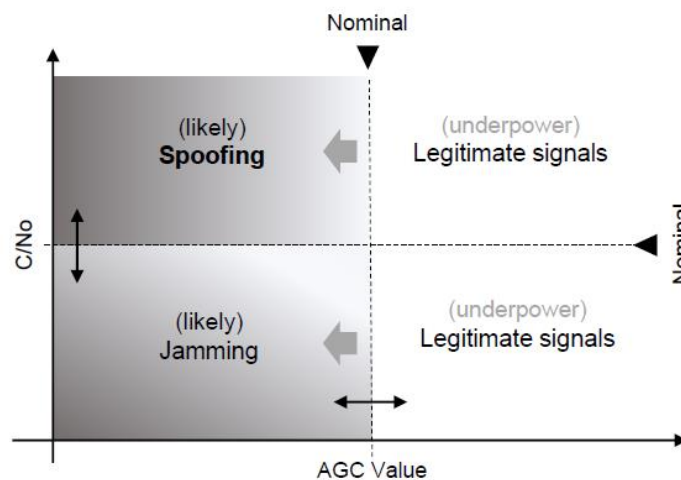
Je možné si všimnúť, že v rámci Sc3_S sú výsledky pre Anténu 1 a Anténu 2 značne odlišné. V prípade použitia Antény 1 sa podarilo smartfón úspešne zaspoofovať, u Antény 2 bol spoofing neúspešný, avšak rušenie sa na SQM parametroch aj napriek tomu prejavilo. Zaujímavý výsledok vzišiel z prípadu použitia Antény 1, kedy došlo k skokovému nárastu počtu sledovaných satelitov systému Galileo, po ktorom nasledoval prudký skokový nárast priemernej hodnoty C/No u systému GPS. Pri použití Antény 2 sa na rozdiel od predchádzajúceho prípadu v dátach vyskytujú výpadky a nedochádza k žiadnym skokovým zmenám hodnôt C/No a NSV.

Veľmi podobné chovanie parametrov DOP je pozorovateľné u Sc3_J a Sc3_S v prípade použitia Antény 1, kedy k nárastu hodnôt DOP dochádza až ku koncu doby rušenia. U Sc3_S v prípade použitia Antény 2 zase v priebehu času dochádza k viacerým skokovým nárastom hodnôt DOP na začiatku rušenia, ktoré sa ku koncu rušenia miernia. Tieto náhle zmeny hodnôt DOP sa však u všetkých prípadoch Sc3 nedajú považovať za veľmi významné, keďže rozdiel medzi dobou bez rušenia a dobou s rušením sa pohybuje len v rozmedzí od 0,02 až 0,26.

Najspôhlivejšie kopíruje dobu rušenia v rámci celého Sc3 parameter AGC, ktorý po dobu rušenia poklesol o rádovo až 3 dB. Stalo sa tak v oboch prípadoch Sc3, pričom smartfón sa od zdroja rušenia nachádzal v rôznych vzdialenostiach. V prípade jammingu to bolo 10 m, v prípade spoofingu len 0-5 cm. Hodnotu 6 dB je v prípade tohto typu smartfónu teoreticky možné považovať za východiskovú alebo základnú hodnotu, ktorá bola určená na základe experimentálneho nahrávania dát v rôznych typoch prostredí za rozdielnych predpokladaných hodnôt DOP, a je možné voči nej posudzovať potenciálne narušenia GNSS signálu v okolí

smartfónu. Pre ostatné SQM parametre sa tieto východiskové hodnoty líšia v závislosti od prostredia, v ktorom sa smartfón nachádza.

Podľa publikovaných článkov na tému detekcie GNSS rušenia pomocou surových GNSS dát zo smartfónov je možné kategorizovať detegované GNSS rušenie na základe hodnôt parametrov C/No a AGC, ako je zobrazené na Obrázku 61. Ak zároveň poklesnú hodnoty AGC aj C/No, v najpravdepodobnejšom prípade sa jedná o rušenie typu jamming. Ak však poklesnú hodnoty AGC a zároveň sa hodnoty C/No nemenia, prípadne sa zvýšia, s najväčšou pravdepodobnosťou je možné povedať, že sa jedná o spoofing [18], [53].



Obrázok 61: Kategorizácia typu GNSS rušenia [53]

V prípade vykonaných meraní v rámci tejto práce vyššie uvedené tvrdenia nie je možné jednoznačne potvrdiť. Na základe dosiahnutých výsledkov vo všetkých prípadoch Sc3 by smartfón rušenie kategorizoval ako jamming, keďže priemerné hodnoty C/No poklesli aj u prípadu so spoofingom, s výnimkou GPS L1 v rámci použitia Antény 1. K detekcii GNSS rušenia pomocou použitého smartfónu v tejto práci je teda možné konštatovať, že detekcia GNSS rušenia za pomoci výstupných SQM parametrov je možná, avšak správna charakteristika identifikovaného rušenia už ďalej možná nie je z dôvodu nejednoznačnosti výsledných hodnôt. Tento záver sa však viaže len na použitý smartfón v tejto práci. Výsledky iných modelov smartfónov, respektíve smartfónov iných značiek môžu byť rozdielne.

5.3. Výhody a limitácie využitia smartfónov pre meranie kvality GNSS signálu

Z vyššie zhrnutých výsledkov a ich vzájomných porovnaní vyplýva niekoľko výhod a nevýhod súvisiacich s využitím smartfónov pre účely merania kvality GNSS signálu. Medzi hlavné



výhody tohto typu merania patrí jednoznačne nízka cena a vysoká dostupnosť týchto zariadení, preto by ich potenciálna implementácia k účelom merania kvality GNSS signálu bola veľmi jednoduchá a časovo aj finančne efektívna.

Smartfóny majú v sfére analyzovania kvality GNSS signálu bezpochyby veľký potenciál, avšak v súčasnej dobe ich využitiu v kritickejších odvetviach infraštruktúry stále bráni niekoľko prekážok. Jednou z najobmedzujúcejších limitácií je už spomínaný hardvér smartfónu. Pokrok v čípoch inštalovaných do týchto zariadení je predmetom záujmu každý rok, avšak o vylepšení charakteristík inštalovaných antén veľa zmienok nekoluje. Antény smartfónov sú stále veľmi náchylné na zachytenie GNSS signálov nízkej kvality, čo do nameraných dát vnáša chyby a viac šumu.

Ďalším obmedzením súvisiacim s využitím smartfónov pre tento účel je ich rôznorodosť z hľadiska poskytovaných výstupných informácií. Každá značka a model môže na výstupe prezentovať dané SQM parametre rôzne, prípadne môžu niektoré SQM parametre na výstupe chýbať úplne. Pre stanovenie hodnôt SQM parametrov môžu byť naprieč rôznymi zariadeniami definované rôzne mechanizmy pre ich výpočet. Medzi zariadeniami sa teda vzájomne môžu líšiť jednotlivé východiskové a hraničné hodnoty, ktoré sú charakteristické pre daný typ smartfónu v danom type prostredia. Príkladom môžu byť napríklad hodnoty AGC (viď kapitola 1.3.1.6), ktoré môžu byť na výstupe zo smartfónov prezentované buď relatívne alebo absolútne.

Kvalita GNSS signálu sa podľa meraní uskutočnených v rôznych prostrediach a s rôznymi typmi GNSS rušenia odpovedajúcim spôsobom odráža vo výsledných hodnotách SQM parametrov. Smartfóny je preto do istej miery možné použiť pre účely monitorovania kvality GNSS signálu, avšak je nutné brať do úvahy rozdiely vo výstupných informáciách medzi jednotlivými zariadeniami. S týmto úzko súvisí potreba komplexnejšieho popisu chovania dostupných SQM parametrov naprieč rôznymi zariadeniami a súvisiacich chybových charakteristík, čím by sa o väčšej implementácii smartfónov dalo diskutovať jasnejšie, rovnako ako by sa značne zjednodušilo ich samotné praktické využitie. Takýto popis by taktiež teoreticky mohol otvoriť možnosť doplnenia množiny SQM o výpočet parametrov HPL a VPL, na základe ktorých by boli informácie o kvalite GNSS signálu v danej oblasti rozšírené o úroveň spoľahlivosti PVT riešenia.



6. Prínos a ďalší rozvoj

Hlavným dôvodom monitorovania kvality GNSS signálu v letectve je detekcia anomálií s cieľom zabezpečenia požadovanej výkonnosti GNSS signálu v súlade s požiadavkami uvedenými v ICAO Annex 10 (Tabuľka 3.7.2.4-1) [54]. Práve kvôli veľkému nárastu incidentov súvisiacich s GNSS rušením za posledné roky je nutné zdôrazniť význam monitorovania GNSS a tým aj znížiť dopad rušenia na bezpečnú a efektívnu leteckú prevádzku [55], [56].

Využitie smartfónov pre monitorovanie kvality GNSS signálu má istý potenciál aj v leteckom odvetví. Na základe informácií obsiahnutých v tejto práci a vytvoreného Matlab skriptu by bolo možné vyvinúť Android aplikáciu, ktorá by kontinuálne analyzovala dostupné SQM parametre v danom zariadení a vydávala upozornenia o identifikovaných anomáliách v prijatom GNSS signáli. Takáto aplikácia by zároveň mohla byť postavená na princípe crowdsourcingu, čím by sa umožnila analýza, zaznamenávanie a uchovávanie GNSS dát od viacerých užívateľov súčasne v paralelne vytvorenej centrálnej databáze. Potenciálne praktické využitie v leteckom odvetví by takáto aplikácia mohla mať napríklad na menších letiskách, kde by mohla byť spustená na pozadí smartfónov personálu letiska, čím by bolo možné do istej miery získať povedomie o kvalite GNSS signálu na danom letisku aj bez pomoci drahých profesionálnych zariadení. Limitáciou by tu však bol prípad, kedy by sa daný smartfón nachádzal v hangári alebo inom uzavretom priestore, v ktorom by bol príjem GNSS signálu obmedzený. Možnosťou pre vyriešenie tohto problému by bolo pre tento účel vyčleniť jeden alebo niekoľko dedikovaných smartfónov.

V prípade väčších letísk, na ktorých sú publikované RNP procedúry, plynú pre poskytovateľov letových navigačných služieb (ANSP, Air Navigation Service Provider) podľa ICAO Annex 10 požiadavky pre monitorovanie kvality GNSS signálu a hlásenie stavu navigačných systémov založených na GNSS. V prípade identifikovanej degradácie výkonnosti je povinnosťou ANSP o danej situácii oboznámiť pilotov, prípadne pre danú oblasť vydať príslušný NOTAM, ktorý o tom bude informovať [54]. Smartfóny by sa v tomto prípade mohli použiť ako komplementárny zdroj informácií o kvalite GNSS signálu v danej oblasti. Nahrané surové GNSS dáta sa navyše automaticky ukladajú do pamäti telefónu, čo umožňuje ich spätné využitie pre účely vyšetrovania rôznych incidentov súvisiacich s degradovanou výkonnosťou GNSS v danom okolí.

Kedže dostupnosť SQM parametrov sa naprieč rôznymi značkami a modelmi smartfónov líši a rovnako tiež nie sú jasne definované chybové charakteristiky ich výstupných SQM



parametrov, nie je možné tieto zariadenia v súčasnej dobe použiť ako osobitný nástroj pre monitorovanie kvality GNSS signálu. Aj napriek tomu však tieto zariadenia bezpochyby poskytujú cenný doplnkový zdroj informácií o kvalite GNSS signálu v danom okolí. S obmedzeniami a limitáciami tohto typu merania kvality GNSS signálu zhrnutých v predchádzajúcej kapitole sa vytvára ďalší priestor pre hlbší rozvoj tejto problematiky.

Vykonané merania v rámci tejto práce by sa dali rozšíriť na merania s väčšou množinou zariadení, zahŕňajúcou rôzne modely a značky smartfónov. Týmto by bolo možné lepšie popísať dostupnosť a správanie jednotlivých SQM parametrov, prípadne aj stanoviť všeobecné východiskové a hraničné hodnoty SQM parametrov, ktoré by boli aplikovateľné na dané modely a značky. Uvažovať by sa taktiež dalo o rozšírení scenárov o dynamické testy. V rámci spoofingu sa ponúka možnosť otestovania dopadu synchronného typu spoofingu na dostupné SQM parametre.

S ohľadom na ďalší rozvoj samotného Matlab skriptu, prípadne programovanie samotnej Android aplikácie je možné daný kód rozšíriť o pokročilejšie metódy vyhodnotenia SQM parametrov zahŕňajúce napríklad analýzu fázových a kódových meraní alebo identifikáciu fázových skokov v nahraných dátach. Ideálnym variantom by bola Android aplikácia schopná analyzovať SQM parametre v reálnom čase s následnou možnosťou post-processingu, čo by otvorilo možnosť jej využitia a otestovania práve aj v leteckom prostredí.



Záver

Cieľom tejto diplomovej práce bolo vykonanie štúdie uskutočniteľnosti merania kvality GNSS signálu za pomoci smartfónov a existujúcich Android aplikácií. Úvodná časť práce obsahuje všeobecný popis GNSS systémov, GNSS rušenia a monitorovania kvality GNSS signálu, v ktorej sú obsiahnuté najvyužívanejšie SQM parametre spolu s rešeršou dostupných profesionálnych nástrojov k analýze kvality GNSS signálu. Ďalej teoretická časť obsahuje všeobecný náhľad do surových GNSS dát z Android smartfónov, využívaných formátov dát a dostupných Android aplikácií.

V rámci praktickej časti boli pre nahrávanie surových GNSS dát navrhnuté tri scenáre s rôznou očakávanou kvalitou GNSS signálu. Pre záznam surových GNSS dát bol použitý smartfón Xiaomi 11T a Android aplikácia GNSS Logger. Namerané dáta boli vyhodnotené z hľadiska dostupných SQM parametrov na výstupe zo smartfónu pomocou vytvoreného Matlab skriptu. Súčasťou výsledkov je taktiež porovnanie dostupných hodnôt SQM parametrov s profesionálnym zariadením pre meranie kvality GNSS signálu COLOSSUS.

Prezentované výsledky dokazujú, že rôzne typy prostredia sa odpovedajúco odrážajú v kvalite nameraných surových GNSS dát. Obdobne sa v dátach prejavuje aj GNSS rušenie, ktoré je v časových priebehoch hodnôt SQM parametrov charakterizované náhlymi skokovými zmenami. V odvetví leteckej dopravy má využitie smartfónov pre účely monitorovania kvality GNSS signálu prínos predovšetkým z dôvodu vzrastajúcich hrozieb súvisiacich s GNSS rušením. Tieto zariadenia má pri sebe každý účastník leteckej prevádzky, preto ich implementácia by bola k tomuto účelu značne časovo aj finančne efektívna. Potenciálne konkrétne využitie je napríklad na malých letiskách, vďaka čomu je možné získať povedomie o kvalite GNSS signálu na danom letisku. Vďaka jednoduchosti tohto riešenia je možné smartfóny využiť aj ako komplementárny zdroj informácií o kvalite GNSS signálu na väčších letiskách. Surové GNSS dáta zo smartfónov tu môžu byť nápomocné tiež v prípade šetrenia rôznych incidentov súvisiacich s GNSS rušením, alebo v rámci plnenia povinností monitorovania kvality GNSS signálu uvedených v predpise ICAO Annex 10.

Od roku 2016 až do dnešného dňa si smartfóny prešli výrazným zlepšením súvisiacim s GNSS funkciami a využitím surových GNSS dát, ako napríklad umožnenie príjmu GNSS signálu z druhej frekvencie, umožnenie vypnutia funkcie duty cycling alebo všeobecný technologický pokrok v inštalovaných čipových sadách. Smartfóny môžu bezpochyby slúžiť ako cenný zdroj informácií o kvalite GNSS signálu v danej lokalite, avšak v súčasnej dobe je ich väčšie využitie



limitované predovšetkým nedostatočným opisom jednotlivých výstupných SQM parametrov a ich chybových vlastností naprieč rôznymi zariadeniami. Hlavným predmetom budúceho rozvoja tejto práce preto môže byť rozšírenie meraní o niekoľko rôznych modelov zariadení, vďaka čomu by bolo možné výstupné SQM parametre opísať komplexnejšie. Následne by bolo možné pristúpiť k vyvinutiu samotnej Android aplikácie, ktorej hlavným zámerom by bola analýza dostupných SQM parametrov v reálnom čase a vydávanie upozornení o degradovanej kvalite GNSS signálu v okolí smartfónu.



Zoznam použitej literatúry

- [1] PLENINGER, Stanislav. *GNSS (Global Navigation Satellite System) - výukové materiály k předmětu CNS systémy*. Fakulta dopravní ČVUT. Praha, 2021.
- [2] ELLIOTT, Kaplan a Hegarty CHRISTOPHER J. *Understanding GPS: Principles and Applications*. Second Edition. Norwood, MA, USA: Artech House, 2017. ISBN 1-58053-894-0.
- [3] SUBIRANA, J., J. ZORNOZA a M. HERNÁNDEZ-PAJARES. *GNSS DATA PROCESSING: Volume I: Fundamentals and Algorithms*. Netherlands: ESA Communications, 2013. ISBN 978-92-9221-886-7.
- [4] SUBIRANA, J., J.M. SORNOZA a M. HERNANDEZ-PAJARES. *GNSS Basic Observables* [online]. Spain: ESA Navipedia, 2011 [cit. 2021-06-21]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_Basic_Observables
- [5] GMV, ed. *CDMA FDMA Techniques*. In: *ESA Navipedia* [online]. [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/CDMA_FDMA_Techniques
- [6] *RTCA SC-159: DO-235B Assessment of Radio Frequency Interference Relevant to the GNSS*. Washington DC, USA: Radio Technical Commission for Aeronautics, 2008.
- [7] DOVIS, Fabio, ed. *GNSS Interference, Threats, and Countermeasures*. Norwood, MA, USA: Artech House, 2015. ISBN 978-1608078103.
- [8] *GNSS PATRON. Types of GNSS Spoofing* [online]. 2020 [cit. 2023-11-01]. Dostupné z: <https://gpspatron.com/types-of-gnss-spoofing/>
- [9] *Global Navigation Satellite System Outage Leading to Navigation/Surveillance Degradation*. Safety Information Bulletin (SIB) [online]. EASA, 2023, (2022-022) [cit. 2023-11-22]. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/en/newsroom-and-events/news/easa-updates-sib-gnss-outage-and-alterations>
- [10] *What happened to GPS in Denver?* [online]. USA: *GPS World*, 2022 [cit. 2022-09-23]. Dostupné z: <https://www.gpsworld.com/what-happened-to-gps-in-denver/>
- [11] OPSGROUP. *FAA warning issued, further serious navigation failures reported* [online]. 2023 [cit. 2023-11-01]. Dostupné z: <https://ops.group/blog/faa-warning-navigation-failures/>
- [12] GRAAS, Frank a Sabrina UGAZIO. *GNSS Signal Quality Monitoring*. Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite



- Navigation, Sensor Systems, and *Civil Applications* [online]. 2021, 215-231 [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: doi:10.1002/9781119458449.ch10
- [13] Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation: Volume I - Aeronautical Telecommunications [online]. 7th edition. Montreal, Quebec, Canada: ICAO, 2018 [cit. 2023-03-12]. ISBN 978-92-9258-504-4. Dostupné z: <https://ffac.ch/wp-content/uploads/2020/09/ICAO-Annex-10-Aeronautical-Telecommunications-Vol-I-Radio-Navigation-Aids.pdf>
- [14] *Measuring* GNSS Signal Strength. In: Inside GNSS [online]. New Jersey, USA: InsideGNSS [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: <https://insidegnss.com/measuring-gnss-signal-strength/>
- [15] Integrity [online]. *ESA Navipedia, GMV, 2011* [cit. 2021-06-12]. Dostupné z: <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Integrity>
- [16] VOLKMANN, Walter. GNSS Basics for the Drone Mapper [online]. Gainesville, Florida, USA: Micro Aerial Projects, 2018 [cit. 2021-07-16]. Dostupné z: <https://microaerialprojects.com/wp-content/uploads/2018/10/GNSS-FOR-THE-DRONE-MAPPER-9-30-2018-1.pdf>
- [17] BOROWSKI, Holly, Oscar ISOZ, Fredrick EKLÖF, Sherman LO a Dennis AKOS. Detecting False Signals with Automatic Gain Control. In: *GPS World* [online]. 2011 [cit. 2021-06-12]. Dostupné z: <https://www.gpsworld.com/detecting-false-signals-automatic-gain-control-12804/>
- [18] SPENS, Nicholas, Dong-Kyeong LEE, Filip NEDELKOV a Dennis AKOS. Detecting GNSS Jamming and Spoofing on Android Devices. *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation* [online]. 2022, 69(3) [cit. 2022-11-16]. Dostupné z: doi:10.1002/navi.437
- [19] DONG-KYEONG, Lee, Nicholas SPENS, Benon GATTIS a Dennis AKOS. AGC on Android Devices for GNSS. Proceedings of the 2021 International Technical Meeting of The Institute of Navigation [online]. 2021, 33-41 [cit. 2022-11-16]. Dostupné z: doi:10.33012/2021.17823
- [20] MultipathIndicator Enum [online]. *Microsoft* [cit. 2023-09-08]. Dostupné z: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/api/android.locations.multipathindicator?view=xamarin-android-sdk-13&viewFallbackFrom=xamarin-android-sdk-12>
- [21] GMV NSL. COLOSSUS Description: Presentation. 2022.



- [22] *GPSPATRON for GNSS Signal Monitoring*. In: GPSPatron [online]. 2020 [cit. 2022-11-16]. Dostupné z: <https://gpspatron.com/gnss-signal-monitoring/>
- [23] *G-Nut/Anubis* [online]. ČR: G-Nut Software s.r.o., 2022 [cit. 2022-11-16]. Dostupné z: <https://gnutsoftware.com/software/anubis>
- [24] *MuSNAT* [online]. Universität der Bundeswehr München, 2019 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.unibw.de/lrt9/lrt-9.2/software-packages/musnat>
- [25] 076 - GNSS Integrity and Authentication Services user-Oriented Network (GIASONE) [online]. ESA NAVISP, 2020 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://navisp.esa.int/project/details/126/show>
- [26] GNSS Monitoring. In: NAVBLUE An Airbus Company [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://www.navblue.aero/product/gnss-monitoring/>
- [27] ZHANG, X., X. TAO, F. ZHU, X. SHI a F. WANG. Quality assessment of GNSS observations from an Android N smartphone and positioning performance analysis using time-differenced filtering approach. *GPS Solutions* 22 [online]. 2018, (70) [cit. 2023-09-09]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10291-018-0736-8>
- [28] *ELMEZAYEN, Abdelsatar a Ahmed EL-RABBANY*. Precise Point Positioning Using World's First Dual-Frequency GPS/GALILEO Smartphone. *Sensors* 2019 [online]. 2019, 19(11), 2593 [cit. 2022-12-20]. Dostupné z: doi:10.3390/s19112593
- [29] *World's first dual-frequency GNSS smartphone hits the market*. In: EUSPA [online]. 2018 [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://www.euspa.europa.eu/newsroom/news/world-s-first-dual-frequency-gnss-smartphone-hits-market>
- [30] *Smartphones Sold in EU Now Required to Leverage Galileo Signals*. In: InsideGNSS [online]. New Jersey, USA, 2022 [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://insidegnss.com/smartphones-sold-in-eu-now-required-to-leverage-galileo-signals/>
- [31] *Raw GNSS Measurements* [online]. Android Developers [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: <https://developer.android.com/guide/topics/sensors/gnss>
- [32] *GPSTest Database* [online]. USA: GPSTest, 2022 [cit. 2022-12-01]. Dostupné z: https://docs.google.com/spreadsheets/d/1jXtRCoEnnFNWj6_oFIVWflsf-b0jkfZpyhN-BXsv7uo/edit#gid=0
- [33] *A-GNSS*. In: Wikipedia [online]. [cit. 2023-01-06]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Assisted_GNSS#/media/File:A-GPS.svg



- [34] *RINEX 4.0 Announced*. In: *InsideGNSS [online]*. New Jersey, USA: InsideGNSS, 2021 [cit. 2022-12-01]. Dostupné z: <https://insidegnss.com/rinex-4-0-announced/>
- [35] *EL-RABBANY, Ahmed*. Introduction to GPS: The Global Positioning System. Norwood, MA: Artech House, 2002. ISBN 1-58053-183-0.
- [36] *CZEPOS [online]*. Zeměměřický úřad, 2023 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <http://czeapos.cuzk.cz/>
- [37] *USING GNSS RAW MEASUREMENTS ON ANDROID DEVICES: White Book [online]*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017 [cit. 2021-06-03]. ISBN 978-92-9206-033-6. Dostupné z: https://www.euspa.europa.eu/system/files/reports/gnss_raw_measurement_web_0.pdf
- [38] *GNSS Logger App [online]*. Google [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.google.android.apps.location.gps.gnsslogger&hl=cs&gl=US>
- [39] *Geo++ Rinex Logger App [online]*. Geo++ GmbH [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: <https://play.google.com/store/apps/details?id=de.geopp.rinexlogger&hl=cs&gl=US>
- [40] *GNSS/IMU Logger [online]*. Google Play Store [cit. 2023-01-06]. Dostupné z: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.ista.android.apps.location.gps.gnsslogger&hl=en&gl=US>
- [41] *GPS Test [online]*. Google Play Store [cit. 2023-01-06]. Dostupné z: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.android.gpstest&hl=en&gl=US>
- [42] *PPP Wizlite App [online]*. CNES/PPP – managed by JOCS [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: https://play.google.com/store/apps/details?id=jocs.fr.ppp_wizlite
- [43] *3PGo [online]*. Google Play Store [cit. 2023-01-06]. Dostupné z: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.spaceopal.pppgo&hl=en&gl=US>
- [44] *RTCM Converter App [online]*. CNES/PPP – managed by JOCS [cit. 2021-06-03]. Dostupné z: https://play.google.com/store/apps/details?id=jocs.fr.rtcn_converter
- [45] *Xiaomi 11T*. In: *Mi.com [online]*. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.mi.com/global/product/xiaomi-11t/specs>
- [46] *Trimble GNSS Planning Online [online]*. Germany: Trimble Terrasat GmbH [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <http://www.gnssplanning.com/>
- [47] *TG-5CA jammer cellphone / GPS / WiFi*. In: *AllWan Security [online]*. France, 2020 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://www.allwan.eu/en/jammers/598-tg-5ca-jammer-cellphone-gps-wifi.html>



- [48] ČESKÝ TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD. *Zpráva č 1304-394-00, Měření vybraných technických parametrů VRZ – rušiče signálů GPS, GSM, IMTS a RLAN (typ TG 5 CA)*. Praha, 2013.
- [49] New Assembled HackRF Portapack H2 HackRF One 1MHz to 6GHz SDR With Mayhem 1.7.4 Firmware Flashed. In: Aliexpress [online]. c2010-2022 [cit. 2023-10-16]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/4000247041639.html>
- [50] GitHub - osqzss/gps-sdr-sim: Software-Defined GPS Signal Simulator. In: GitHub [online]. c2015-2023 [cit. 2023-10-16]. Dostupné z: <https://github.com/osqzss/gps-sdr-sim>
- [51] SLEZÁČEK, Jan. Možnosti simulace GNSS signálu se zaměřením na SDR. Praha, 2023. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní.
- [52] ANDROID DEVELOPERS. *GnssMeasurement* [online]. 2023 [cit. 2023-09-24]. Dostupné z: [https://developer.android.com/reference/android/location/GnssMeasurement#getConstellationType\(\)](https://developer.android.com/reference/android/location/GnssMeasurement#getConstellationType())
- [53] MINETTO, Alex, Akmal RUSTAMOV a Fabio DOVIS. Detecting single-antenna spoofing attacks by correlation in time series of raw measurements. Institute of Navigation (ION) [online]. 2023, 73-84 [cit. 2023-10-25]. Dostupné z: doi:10.33012/2023.19205
- [54] Annex 10, Aeronautical Telecommunications, Volume I [online]. 7th Edition. Montreal, Canada: ICAO, 2018 [cit. 2023-10-29]. ISBN 978-92-9258-504-4. Dostupné z: https://www.icao.int/icao/en/airm/annex10/vol1/Annex_10_Vol1_Aeronautical_Telecommunications_7ed._2018_rev.91_01.07.18.pdf
- [55] Aviation Intelligence Unit Think Paper #9 [online]. EUROCONTROL, 2021 [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2021-03/eurocontrol-think-paper-9-radio-frequency-interference-satellite-navigation.pdf>
- [56] GNSS vulnerability & mitigation in Czech republic, NAVISP ESA Contract No. 4000128749/19/NL/MP: Report on vulnerability per CI. 2023.



Príloha 1 – Matlab skript pre vyhodnotenie surových GNSS dát zo smartfónu na priloženom CD

- raw_GNSS_measurements_SQM.m